COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Poudre de tungstène

Propriétés physiques et chimiques, préparation et applications

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Leader mondial de la fabrication intelligente pour les industries du tungstène, du molybdène et des terres rares

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

PRÉSENTATION DU GROUPE CTIA

CTIA GROUP LTD , filiale à 100 % dotée d'une personnalité juridique indépendante et créée par CHINATUNGSTEN ONLINE, se consacre à la promotion de la conception et de la fabrication intelligentes, intégrées et flexibles de matériaux en tungstène et en molybdène à l'ère de l'Internet industriel. Fondée en 1997 avec www.chinatungsten.com comme point de départ – le premier site web chinois de produits en tungstène de premier plan –, CHINATUNGSTEN ONLINE est une entreprise pionnière du e-commerce en Chine, spécialisée dans les industries du tungstène, du molybdène et des terres rares. Fort de près de trois décennies d'expérience approfondie dans les domaines du tungstène et du molybdène, CTIA GROUP hérite des capacités exceptionnelles de conception et de fabrication de sa société mère, de ses services de qualité supérieure et de sa réputation commerciale mondiale, devenant ainsi un fournisseur de solutions d'application complètes dans les domaines des produits chimiques à base de tungstène, des métaux tungstène, des carbures cémentés, des alliages haute densité, du molybdène et de ses alliages.

Au cours des 30 dernières années, CHINATUNGSTEN ONLINE a créé plus de 200 sites web professionnels multilingues sur le tungstène et le molybdène, couvrant plus de 20 langues, avec plus d'un million de pages d'actualités, de prix et d'analyses de marché liées au tungstène, au molybdène et aux terres rares. Depuis 2013, son compte officiel WeChat « CHINATUNGSTEN ONLINE » a publié plus de 40 000 informations, alimentant près de 100 000 abonnés et fournissant quotidiennement des informations gratuites à des centaines de milliers de professionnels du secteur dans le monde entier. Avec des milliards de visites cumulées sur son site web et son compte officiel, CHINATUNGSTEN ONLINE est devenu une plateforme d'information mondiale reconnue et faisant autorité pour les industries du tungstène, du molybdène et des terres rares, fournissant 24 h/24 et 7 j/7 des informations multilingues, des informations sur les performances des produits, les prix et les tendances du marché.

S'appuyant sur la technologie et l'expérience de CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP s'attache à répondre aux besoins personnalisés de ses clients. Grâce à l'IA, CTIA GROUP conçoit et fabrique en collaboration avec ses clients des produits en tungstène et en molybdène présentant des compositions chimiques et des propriétés physiques spécifiques (telles que la granulométrie, la densité, la dureté, la résistance, les dimensions et les tolérances). L'entreprise propose des services intégrés complets, allant de l'ouverture du moule à la production d'essai, en passant par la finition, l'emballage et la logistique. Au cours des 30 dernières années, CHINATUNGSTEN ONLINE a fourni des services de R&D, de conception et de production pour plus de 500 000 types de produits en tungstène et en molybdène à plus de 130 000 clients dans le monde, posant ainsi les bases d'une fabrication personnalisée, flexible et intelligente. Fort de ce socle, CTIA GROUP approfondit la fabrication intelligente et l'innovation intégrée des matériaux en tungstène et en molybdène à l'ère de l'Internet industriel.

Forts de plus de 30 ans d'expérience dans le secteur, le Dr Hanns et son équipe du CTIA GROUP ont également rédigé et publié des analyses de connaissances, de technologies, de prix et de tendances du marché du tungstène, du molybdène et des terres rares, qu'ils partagent librement avec l'industrie du tungstène. Fort de plus de 30 ans d'expérience depuis les années 1990 dans le commerce électronique et le commerce international de produits en tungstène et en molybdène, ainsi que dans la conception et la fabrication de carbures cémentés et d'alliages haute densité, le Dr Han est un expert reconnu des produits en tungstène et en molybdène, tant au niveau national qu'international. Fidèle à sa volonté de fournir des informations professionnelles et de qualité à l'industrie, l'équipe du CTIA GROUP rédige régulièrement des articles de recherche technique, des articles et des rapports sectoriels basés sur les pratiques de production et les besoins des clients, ce qui lui vaut une large reconnaissance au sein du secteur. Ces réalisations apportent un soutien solide à l'innovation technologique, à la promotion des produits et aux échanges industriels du CTIA GROUP, le propulsant pour devenir un leader mondial dans la fabrication de produits en tungstène et en molybdène et dans les services d'information.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CONTENU

Préface

La valeur scientifique et industrielle de la poudre de tungstène

Structure et objectifs du livre

Remerciements et sources de données

Partie 1 Science fondamentale de la poudre de tungstène

Chapitre 1 Propriétés physiques et chimiques du tungstène

1.1 Structure atomique et propriétés électroniques du tungstène

1.2 Structure cristalline (BCC, transition de phase HCP et défauts cristallins)

1.3 Propriétés thermodynamiques (point de fusion, coefficient de dilatation thermique, pression de vapeur)

1.4 Stabilité chimique (résistance à la corrosion, comportement à l'oxydation et réactivité)

Chapitre 2 Morphologie et classification de la poudre de tungstène

2.1 Distribution granulométrique et morphologie (structure sphérique, en paillettes, poreuse)

2.2 Poudre de tungstène ultrafine (submicronique) et poudre de tungstène nanométrique (<100 nm)

2.3 Poudre de tungstène de haute pureté (>99,95 %) et poudre de tungstène dopée (La_2O_3, K, Y_2O_3)

2.4 Morphologie de l'oxyde de tungstène (WO_3, $WO_{2.9}$, $WO_{2.72}$) et ses caractéristiques

2.5 Avantages et inconvénients de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène

2.6 Importance industrielle de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène

Partie 2 Technologie de préparation de la poudre de tungstène

Chapitre 3 Procédés métallurgiques traditionnels

3.1 Réduction de l'hydrogène (réduction APT/WO_3, optimisation des paramètres du procédé)

3.2 Réduction carbothermique (cinétique de réaction et contrôle de la teneur en carbone)

3.3 Électrolyse des sels fondus (système NaCl-KCl-WO_3 et paramètres d'électrolyse)

Chapitre 4 Technologie de préparation avancée moderne

4.1 Technologie de sphéroïdisation au plasma (procédés plasma RF et DC)

4.2 Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et dépôt physique en phase vapeur (PVD)

4.3 Alliage mécanique (broyage à billes à haute énergie et poudre de tungstène nanocristallin)

4.4 Synthèse de poudre de nano-tungstène (méthode hydrothermale, méthode sol-gel, pyrolyse par pulvérisation)

Chapitre 5 Modification de surface et technologie composite

5.1 Revêtement de surface (Effets du Ni, Cu, Ag sur le frittage et les performances)

5.2 Matériaux composites à base de tungstène (W-Cu, W-Ni-Fe, W-ZrO_2)

5.3 Poudre de tungstène fonctionnalisée (modification antibactérienne, conductrice, de protection contre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

les radiations)

5.4 Préparation de la dispersion (processus de dispersion à base d'eau, à base d'alcool et stabilité)

Partie 3 Propriétés et caractérisation de la poudre de tungstène

Chapitre 6 Propriétés physiques et mécaniques

6.1 Densité et porosité (comparaison de la densité de tassement et de la densité théorique)

6.2 Dureté et résistance à l'usure (dureté Vickers, essai de nanoindentation)

6.3 Propriétés à haute température (résistance au fluage, fatigue thermique et comportement de transformation de phase)

Chapitre 7 Propriétés thermiques et électriques

7.1 Conductivité thermique et coefficient de dilatation thermique (dépendance à la température et tests)

7.2 Propriétés de conductivité électrique et d'émission d'électrons (émission de champ, émission thermoionique)

7.3 Propriétés de blindage électromagnétique et d'absorption (performances en bande GHz)

Chapitre 8 Propriétés chimiques et optiques

8.1 Cinétique d'oxydation (modèle d'oxydation à haute température et stratégie de protection)

8.2 Résistance à la corrosion (mécanisme de dégradation dans les milieux acides et alcalins)

8.3 Propriétés optiques (bande interdite, absorption de la lumière et propriétés électrochromes)

Partie 4 Technologie de caractérisation et d'analyse de la poudre de tungstène

Chapitre 9 Analyse de la microstructure et de la morphologie

9.1 Microscopie électronique à balayage (MEB) et microscopie électronique à transmission (MET)

9.2 Diffraction des rayons X (DRX) et diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD)

9.3 Analyse de la surface spécifique et de la porosité (BET, porosimétrie par intrusion de mercure)

Chapitre 10 Analyse de la composition et de la surface

10.1 Spectroscopie de photoélectrons à rayons X (XPS) et spectroscopie d'électrons Auger (AES)

10.2 Spectroscopie à plasma à couplage inductif (ICP-MS) et spectroscopie dispersive en énergie (EDS)

10.3 Détection de l'état chimique de surface et de la contamination (TOF-SIMS)

Chapitre 11 Technologie de test de performance de la poudre de tungstène

11.1 Test de performance mécanique (traction, compression, flexion trois points)

11.2 Technologie d'analyse thermique (DSC, TGA, dilatomètre thermique)

11.3 Tests électriques et électromagnétiques (méthode à quatre sondes, analyseur de réseau vectoriel)

Partie 5 Applications industrielles et émergentes de la poudre de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chapitre 12 Carbure cémenté et outils de coupe

12.1 Processus de synthèse et de frittage du carbure de tungstène (WC)

12.2 Optimisation des performances des outils en carbure cémenté (outils de tournage, fraises)

12.3 Revêtements ultra-durs (CVD-WC, revêtements diamantés)

Chapitre 13 Applications électroniques et énergétiques

13.1 Matériaux de cathode (cathodes thermoioniques et à émission de champ)

13.2 Boîtiers de semi-conducteurs et dissipateurs thermiques (W-Cu, W-Ag)

13.3 Stockage d'énergie (électrodes de batterie, supercondensateurs)

13.4 Blindage électrochromique et thermique (fenêtres intelligentes, revêtements économes en énergie)

Chapitre 14 Applications de l'industrie militaire et nucléaire

14.1 Projectiles perforants et matériaux de blindage (alliage W-Ni-Fe)

14.2 Matériaux de première paroi pour la fusion nucléaire (performances anti-pulvérisation)

14.3 Protection contre les radiations (absorption des rayons γ et des neutrons)

Chapitre 15 Fabrication additive et aérospatiale

15.1 Caractéristiques morphologiques de la poudre de tungstène sphérique pour l'impression 3D

15.2 Caractéristiques, déroulement du processus, avantages et applications appropriées de la fusion sélective par laser (SLM) et de la fusion par faisceau d'électrons (EBM)

15.3 Composants aérospatiaux haute température (aubes de turbine, chambres de combustion)

15.4 Impression 3D de pâte conductrice et de matériaux composites

15.5 État d'application et perspectives d'avenir des produits en poudre de tungstène sphérique et en alliage 3D

Chapitre 16 Autres applications émergentes

16.1 Dispositifs médicaux (collimateurs de radiothérapie, outils chirurgicaux)

16.2 Pigments et revêtements (protection contre l'incendie, blindage, pigments artistiques)

16.3 Capteurs de gaz et photocatalyse (applications environnementales et chimiques)

16.4 Industries du sport, des loisirs, de la culture et de l'art

Partie 6 Recherche de pointe et tendances futures

Chapitre 17 Technologie quantique et intelligente de la poudre de nano-tungstène

17.1 Effet de confinement quantique et tungstène à couche atomique unique

17.2 Application de la poudre de nano-tungstène dans les points quantiques et les dispositifs optoélectroniques

17.3 Matériaux intelligents (mémoire de forme, conception auto-réparatrice)

Chapitre 18 Développement durable et économie circulaire

18.1 Historique et état actuel du recyclage des déchets de tungstène (technologies hydrométallurgiques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

et pyrométallurgiques)
18.2 Technologie et procédé de récupération des déchets de tungstène hydrométallurgiques
18.3 Technologie et procédé de récupération des déchets de tungstène pyrométallurgiques et hydrométallurgiques
18.4 Production à faible émission de carbone (réduction de l'hydrogène et chimie verte)
18.5 Analyse du cycle de vie (ACV) et empreinte carbone
18.6 Revue historique et développement futur de la technologie de production de poudre de tungstène

Chapitre 19 Tendances du marché mondial et de la technologie de l'industrie de la poudre de tungstène
19.1 État de l'offre et de la demande et tendances des prix (Chine, Europe, Amérique du Nord)
19.2 Principaux fabricants et paysage concurrentiel
19.3 Innovation technologique (automatisation, production intelligente)

Chapitre 20 Perspectives d'avenir de la recherche sur la poudre de tungstène
20.1 Intégration interdisciplinaire et application de la poudre de tungstène (matériaux, énergie, technologie quantique)
20.2 Défis et solutions technologiques de production de la poudre de tungstène
20.3 Importance stratégique de la poudre de tungstène dans le développement durable
20.4 Facteurs non techniques et non commerciaux affectant la poudre de tungstène et leurs tendances futures possibles

Annexe
Annexe Normes et spécifications internationales (ASTM, ISO, GB/T)
Annexe : Tableau de recherche rapide des propriétés physiques de la poudre de tungstène (densité, point de fusion, conductivité, etc.)
Annexe : Liste des brevets relatifs à la poudre de tungstène (numéro de brevet mondial et résumé)
Annexe : Liste des équipements et instruments de production de poudre de tungstène
Annexe Références sur la poudre de tungstène (versions multilingues : chinois, anglais, japonais, allemand, russe, coréen)
Annexe Guide de sécurité pour la manipulation de la poudre de tungstène (FDS et mesures de protection)
Annexe : Glossaire chinois et anglais

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Introduction of High Purity Tungsten Powder

1. High Purity Tungsten Powder Overview

CTIA GROUP LTD's high-purity tungsten powder is produced using a high-purity tungsten oxide hydrogen reduction process. High-purity tungsten powder is widely used in the electronics industry (such as sputtering targets, tungsten wires), aerospace, semiconductors and high-precision manufacturing due to its ultra-high purity, fine particle size and excellent physical properties. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality tungsten powder products to meet cutting-edge technology needs.

2. High Purity Tungsten Powder Features

Chemical composition: Tungsten (W), high purity metal powder.

Purity: ≥99.99% (4N), with extremely low impurity content.

Appearance: Grey or dark grey powder, uniform color.

Ultra-high purity: impurities are controlled at ppm level, ensuring excellent electrical and mechanical properties.

Fine particles: The particle size can reach 0.1-5 μm, which can meet high-precision applications.

Low oxygen content: oxygen content ≤ 0.02%, improving sintering performance and material stability.

3. High Purity Tungsten Powder Specifications

Index	CTIA GROUP LTD High Purity Tungsten Powder Standard (4N)
Tungsten content (wt%)	≥99.99
Impurities (wt%, max)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0010, Si≤0.0005, Al≤0.0005, Ca≤0.0005, Mg≤0.0005, Na≤0.0010, K≤0.0010, O≤0.0200, C≤0.0050, N≤0.0020, P≤0.0005, S≤0.0005
Water content (wt%)	≤0.02
Particle size (μm, FSSS)	0.1-5.0 (superfine 0.1-1.0, fine 1.0-5.0)
Bulk density (g/ cm^3)	4.5-6.5
Particle size	Provide ultra-fine (0.1-1.0 μm) and fine (1.0-5.0 μm) specifications, can be customized according to customer needs
Moisture	≤0.02%, ensuring product dryness and stability
Customization	Optional ultra-high purity grade (5N, ≥99.999%), with further reduction of impurities (e.g. O≤0.01%)

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner sealed vacuum aluminum foil bag, outer iron barrel or plastic barrel, net weight 5kg, 10kg or 25kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: With quality certificate, including tungsten content, impurity analysis (ICP-MS), particle size (FSSS method), bulk density and moisture data, shelf life is 12 months (sealed and dry conditions).

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129696

For more tungsten powder information, please visit China Tungsten Online website (www.tungsten-powder.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Préface

Le tungstène, métal de transition reconnu pour son point de fusion élevé, sa densité élevée et son excellente résistance à la corrosion, est devenu un élément essentiel de l'industrie moderne et des technologies de pointe depuis sa découverte au XVIIIe siècle. Des premiers filaments incandescents aux outils de coupe en carbure actuels, en passant par le premier matériau de paroi des dispositifs de fusion nucléaire et les dispositifs optoélectroniques nanométriques, ses nombreuses applications démontrent sa position unique dans le domaine de la science des matériaux. Principale forme de tungstène, la poudre de tungstène est non seulement la matière première de base pour la production de matériaux à base de tungstène, mais aussi un vecteur essentiel de l'innovation technologique. Ces dernières années, notamment avec l'essor des nanotechnologies, la poudre de nano-tungstène de haute pureté a rapidement repoussé les limites d'application du tungstène grâce à ses excellentes propriétés photocatalytiques, électrochromiques et de blindage électromagnétique, ouvrant de nouvelles perspectives dans des domaines tels que l'énergie, l'environnement et la fabrication intelligente.

La rédaction de cet ouvrage répond à la nécessité d'une compréhension approfondie de la poudre de tungstène, un matériau multifonctionnel. Sous l'impulsion de l'accélération de l'industrialisation mondiale et de l'objectif de développement durable, la recherche et l'application de la poudre de tungstène connaissent de profondes mutations. De l'exploration microscopique en laboratoire à la production industrielle à grande échelle, chaque particule de poudre de tungstène intègre principes scientifiques et pratiques d'ingénierie. Cependant, la littérature existante se concentre souvent sur un domaine spécifique, manque de systématisation et d'exhaustivité et ne répond pas aux besoins de connaissances approfondies des chercheurs, des ingénieurs et des décideurs industriels. C'est pourquoi, grâce à cet ouvrage, nous espérons établir un lien entre la science fondamentale, les technologies de production et les pratiques d'application, et fournir aux praticiens du domaine de la poudre de tungstène un guide de référence fiable, pratique et avant-gardiste.

Les objectifs de cet ouvrage sont multiples. Premièrement, nous cherchons à révéler la nature scientifique de la poudre de tungstène en analysant systématiquement ses propriétés physiques, chimiques et optiques, de sa structure atomique et cristalline à ses effets de surface à l'échelle nanométrique, jetant ainsi les bases théoriques du développement technologique ultérieur. Deuxièmement, nous avons passé au peigne fin le processus de préparation de la poudre de tungstène, de la méthode traditionnelle de réduction par l'hydrogène aux technologies modernes de pointe telles que la sphéroïdisation par plasma et la synthèse hydrothermale, couvrant l'intégralité du processus, à l'échelle laboratoire et industrielle, et explorant les dernières avancées en matière de modification de surface et de technologie des composites. De plus, cet ouvrage présente en détail les méthodes de caractérisation et les techniques de test de performance de la poudre de tungstène afin de permettre aux lecteurs d'évaluer avec précision sa qualité et ses fonctionnalités. Plus important encore, nous avons exploré en profondeur les applications de la poudre de tungstène dans des domaines traditionnels tels que le carbure cémenté, les dispositifs électroniques, l'industrie nucléaire militaire et la fabrication additive, tout en analysant son potentiel dans des domaines de pointe tels que les technologies quantiques, les matériaux intelligents et le développement durable.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Grâce à l'analyse du marché mondial et à la prévision des tendances technologiques, nous espérons que les lecteurs comprendront non seulement l'état actuel de la technologie, mais auront également un aperçu des orientations de développement futures.

L'ouvrage est structuré en six parties, vingt chapitres et huit annexes, dans un souci d'exhaustivité et d'organisation. La première partie, « Science fondamentale de la poudre de tungstène », se concentre sur les propriétés essentielles du tungstène et de sa forme pulvérulente ; la deuxième partie, « Technologie de préparation de la poudre de tungstène », détaille les procédés de fabrication, des plus traditionnels aux plus avancés ; la troisième partie, « Performances et caractérisation de la poudre de tungstène », analyse ses propriétés physiques, chimiques et fonctionnelles ; la quatrième partie, « Technologie de caractérisation et d'analyse de la poudre de tungstène », présente des méthodes d'essai micro et macro ; la cinquième partie, « Applications industrielles et émergentes de la poudre de tungstène », aborde les scénarios d'application traditionnels et nouveaux ; la sixième partie, « Recherche de pointe et tendances futures », se penche sur le rôle futur de la poudre de tungstène dans la science, la technologie et la société. Les annexes fournissent des ressources pratiques telles que des normes, des brevets et des listes d'équipements pour enrichir la valeur de référence de cet ouvrage.

Pour rédiger cet ouvrage, nous nous sommes appuyés sur de nombreux documents faisant autorité, notamment les derniers résultats de recherche de revues de renom telles que Nature et Acta Materialia, ainsi que sur des normes internationales telles que ASTM, ISO et GB/T, et sur des données intégrées et des informations sur les brevets des principaux fournisseurs mondiaux de poudre de tungstène (tels qu'American Elements et HC Starck). Afin de garantir la pertinence du contenu, nous avons visité de nombreuses entreprises du secteur du tungstène et invité des experts en science des matériaux, en génie métallurgique et en nanotechnologie à participer à la révision. Nous remercions tout particulièrement CTIA GROUP LTD pour son soutien. Leurs connaissances sectorielles et leurs informations techniques ont enrichi cet ouvrage.

Les lecteurs ciblés par cet ouvrage incluent, sans s'y limiter : les chercheurs en science et ingénierie des matériaux désireux de comprendre en profondeur le mécanisme microscopique de la poudre de tungstène ; les ingénieurs des industries du carbure cémenté, de l'électronique, de l'armée et de l'aérospatiale cherchant à optimiser leurs procédés de production et leurs solutions d'application ; les enseignants et étudiants en matériaux des collèges et universités ayant besoin de manuels et de références de recherche systématiques ; et les analystes industriels et décideurs politiques préoccupés par la structure mondiale et la stratégie de développement durable du marché de la poudre de tungstène. Que vous soyez novice en matière de poudre de tungstène ou expert expérimenté dans ce domaine, nous sommes convaincus que cet ouvrage saura vous inspirer et vous accompagner.

Le monde de la poudre de tungstène est à la fois minuscule et vaste. D'une nanoparticule à un gigantesque système supportant la civilisation industrielle, il a été témoin des progrès de la technologie humaine et porte en lui un espoir pour l'avenir. Nous espérons que ce livre sera non seulement une compilation de connaissances, mais aussi une invitation à explorer les mystères de la poudre de tungstène et à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

promouvoir conjointement son nouveau chapitre dans la science et l'industrie. Dans ce processus, vos commentaires et votre participation sont essentiels. N'hésitez pas à nous contacter aux coordonnées figurant en annexe pour nous faire part de vos idées et de vos besoins.

Que ce livre soit un bon compagnon dans vos recherches et votre pratique, et que le potentiel de la poudre de tungstène brille entre vos mains !

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Partie 1 Science fondamentale de la poudre de tungstène

La poudre de tungstène est une poudre métallique dont le composant principal est le tungstène (W, numéro atomique 74). Elle est devenue un matériau incontournable dans les domaines industriel et technologique grâce à son point de fusion élevé (3422 °C), sa masse volumique élevée (19,25 g/cm³) et ses excellentes propriétés mécaniques. Cet article présente les propriétés physiques, chimiques et microstructurales de la poudre de tungstène et explique ses principes scientifiques fondamentaux.

1. Propriétés physiques de la poudre de tungstène

La poudre de tungstène est grise à noire, et présente une large gamme de granulométries (0,05 à 100 µm), notamment des grains nanométriques, ultrafins et grossiers. Sa densité élevée la rend irremplaçable dans les alliages lourds et les contrepoids, tandis que son point de fusion et sa conductivité thermique (173 W/m·K) la rendent adaptée aux environnements à haute température. La granulométrie et la morphologie (sphérique ou irrégulière) influent directement sur la fluidité (10 à 50 s/50 g) et les propriétés de frittage. Les principales propriétés physiques de la poudre de tungstène sont les suivantes :

Aspect de la poudre de tungstène : poudre métallique grise à noire, inodore.
Taille des particules de poudre de tungstène : 0,05 à 100 µm (couvrant des particules de taille nanométrique à grossière).
Densité de la poudre de tungstène : 19,25 g/cm³ (tungstène en morceaux, poudre légèrement inférieure selon la granulométrie).
Le point de fusion de la poudre de tungstène est de 3422°C.
Le point d'ébullition de la poudre de tungstène est de 5555°C.
Conductivité thermique de la poudre de tungstène : 173 W/m·K.
Conductivité électrique de la poudre de tungstène : 18,2 × 10 ⁶ S/m.
Surface spécifique de la poudre de tungstène : 0,5-20 m²/g (augmente à mesure que la taille des particules diminue).
La fluidité de la poudre de tungstène : 10-50 s/50g (selon la morphologie et la distribution granulométrique).
La structure cristalline de la poudre de tungstène est cubique centrée (BCC), avec une constante de réseau d'environ 3,165 Å.
Dureté de la poudre de tungstène : 300-450 HV (mesurée après pressage de la poudre).
Masse volumique apparente de la poudre de tungstène : 5-12 g/cm³ (selon la taille des particules et la morphologie).
La densité de tassement de la poudre de tungstène est de 8 à 15 g/cm³.

2. Propriétés chimiques de la poudre de tungstène

Le tungstène présente une excellente stabilité chimique et ne réagit ni avec l'eau ni avec l'air à température ambiante. Cependant, il peut être oxydé par l'oxygène à haute température pour former de l'oxyde de tungstène (WO_3). La pureté de la poudre de tungstène est généralement comprise entre 99,9 % et 99,999 %, et la teneur en impuretés (telles que l'oxygène et le carbone) doit être maintenue entre 0,01 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

et 0,05 % pour garantir ses performances. Une poudre de tungstène de haute pureté est particulièrement importante dans les domaines de l'électronique et de la catalyse. Ses principales propriétés chimiques sont :

Stabilité chimique de la poudre de tungstène : ne réagit pas avec l'eau, l'air ou l'acide dilué à température ambiante.
Propriété oxydante de la poudre de tungstène : Elle réagit avec l'oxygène à haute température (> 500 °C) pour générer du WO_3.
Pureté de la poudre de tungstène : 99,9 % à 99,999 % (qualité industrielle à haute pureté).
Impuretés dans la poudre de tungstène : oxygène (<0,05%), carbone (<0,01%), fer et autres oligo-éléments.
Résistance à la corrosion de la poudre de tungstène : résistante à la corrosion acide et alcaline (sauf acide nitrique concentré et acide fluorhydrique).
Réactivité de la poudre de tungstène : réagit lentement avec les oxydants forts (tels que l'acide nitrique, l'acide perchlorique).
Combustibilité de la poudre de tungstène : les particules fines peuvent former des poussières explosives lorsqu'elles sont en forte concentration dans l'air.
Solubilité de la poudre de tungstène : insoluble dans l'eau, légèrement soluble dans l'acide fort.

3. Microstructure de la poudre de tungstène

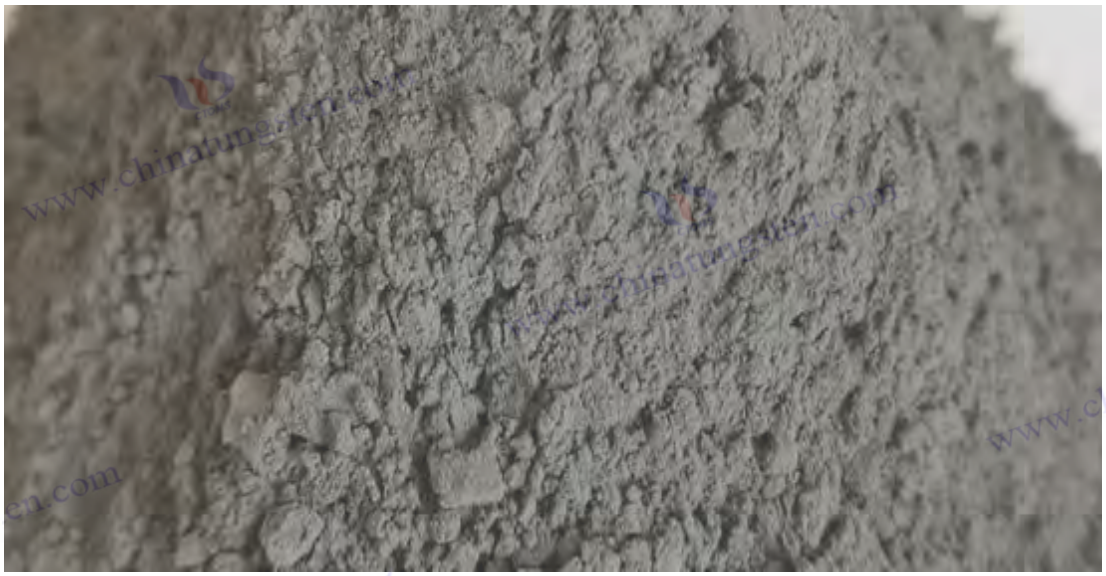
La structure cristalline du tungstène est cubique centrée (BCC) avec une constante de réseau d'environ 3,165 Å. La poudre de nano-tungstène présente une grande surface spécifique (jusqu'à 20 m^2/g) et une petite granulométrie (< 100 nm), ce qui lui confère des effets de surface et des effets quantiques uniques. La microscopie électronique à balayage (MEB) et la diffraction des rayons X (DRX) montrent que sa microstructure et l'intégrité de ses cristaux sont cruciales pour les traitements ultérieurs (comme le frittage en carbure cémenté).

4. Importance scientifique

Les propriétés de la poudre de tungstène proviennent de sa structure électronique ($5d^4\ 6s^2$). Sa forte densité électronique lui confère une excellente conductivité ($18,2 \times 10^6$ S/m) et une excellente résistance à la corrosion. Sa stabilité thermodynamique lui permet de maintenir son intégrité structurelle dans des conditions extrêmes, ce qui lui confère une position fondamentale dans le carbure cémenté, la fabrication additive et les cibles électroniques.

Cet article pose les bases théoriques d'une étude approfondie de la poudre de tungstène. Les chapitres suivants exploreront son processus de préparation et son application.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chapitre 1 Propriétés physiques et chimiques du tungstène
(Propriétés physiques et chimiques)

1.1 Structure atomique du tungstène

Propriétés électroniques

Le tungstène (symbole W) est un métal de transition de la sixième période du tableau périodique, groupe VI B, de numéro atomique 74 et de masse atomique moyenne de 183,84 u (selon son abondance naturelle). Son noyau est constitué de 74 protons et généralement de 110 neutrons (en prenant l'isotope le plus courant ^{184}W comme exemple), entourés de 74 électrons. La configuration électronique du tungstène est [Xe] $4f^{14}5d^{4}6s^{2}$, où l'orbitale 4f est entièrement remplie, et le remplissage partiel des orbitales 5d et 6s lui confère des propriétés chimiques et physiques uniques. Les quatre électrons de l'orbitale 5d et les deux électrons de l'orbitale 6s jouent un rôle clé dans la liaison, ce qui confère au tungstène une conductivité élevée, une dureté élevée et une excellente capacité d'émission d'électrons. Cette structure électronique confère également au tungstène une électronégativité élevée (environ 2,36, échelle de Pauling), qui se situe entre les métaux typiques et les non-métaux, reflétant ses caractéristiques de métal de transition.

Tableau des caractéristiques de la structure atomique et de l'influence du tungstène

Caractéristiques de la structure atomique	Décrire	Impact sur les propriétés
Configuration électronique	[Xe] $4f^{14}5d^{4}6s^{2}$, 5d et 6s électrons externes, 4f entièrement rempli protégeant les électrons internes.	- Point de fusion élevé (3422°C) : les électrons 5d et 6s forment des liaisons métalliques fortes avec des énergies de liaison pouvant atteindre 850 kJ/mol. - Conductivité électrique ($18,2 \times 10^{6}$ S/m) : Les électrons 5d partiellement peuplés offrent une grande mobilité.
Rayon atomique	Environ 139 pm, taille moyenne, densité électronique élevée.	- Haute densité (19,25 g/cm³) : La masse atomique est concentrée et le nuage électronique est dense.
Électronégativité	1,7 (échelle de Pauling), activité chimique modérée.	- Stabilité chimique : la distribution électronique externe est stable, la réactivité est faible et elle est résistante à la corrosion à température ambiante.
Structure cristalline	Cubique centré (BCC), constante de réseau d'environ 3,165 Å, numéro de coordination 8.	- Dureté élevée (300-450 HV) : l'emballage serré BCC améliore les forces interatomiques. - Stabilité thermique : La structure ne se déforme pas facilement à haute température. FABRIQUÉ PAR : CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Caractéristiques de la structure atomique	Décrire	Impact sur les propriétés
Liaison métallique solide	Les électrons 5d et 6s participent et l'énergie de liaison est élevée.	- Point de fusion et conductivité thermique élevés (173 W/m·K) : des liaisons solides prennent en charge les applications à haute température telles que le frittage et la projection thermique.
Effets quantiques (échelle nanométrique)	L'activité de surface à l'échelle nanométrique est amplifiée en raison de l'augmentation de la surface spécifique.	- Performances catalytiques améliorées : la poudre de nano-tungstène (<100 nm) présente une réactivité et une sélectivité améliorées dans les supports de catalyseurs.

1.2 Propriétés électroniques du tungstène

Les propriétés électroniques des atomes de tungstène ont un impact profond sur leurs applications. Par exemple, le travail de sortie du tungstène est d'environ 4,52-4,55 eV, ce qui est inférieur à celui de nombreux métaux nobles (comme l'or 5,1 eV), mais supérieur à celui du fer (fer 4,5 eV), ce qui lui confère d'excellentes performances d'émission thermique d'électrons à haute température. C'est pourquoi le tungstène est largement utilisé dans les filaments incandescents, les cathodes de tubes à rayons X et les sources de microscopes électroniques. L'ampleur du travail de sortie est étroitement liée à l'état de surface. Des études ont montré que des traces d'oxydes (oxydes, comme WO_3) ou un dopage (dopage, comme ThO_2) à la surface du tungstène pur peuvent réduire considérablement le travail de sortie à 2,6-3,0 eV, améliorant ainsi l'efficacité d'émission. De plus, le tungstène présente une densité de nuage électronique plus élevée, liée à son rayon atomique plus petit (environ 139 pm, contre 126 pm pour le fer). Cette densité électronique élevée renforce la résistance des liaisons métalliques entre les atomes, ce qui confère au tungstène une dureté extrêmement élevée (dureté Mohs d'environ 7,5) et une résistance à la traction (environ 1 510 MPa) à température ambiante.

1. Propriétés électroniques du tungstène

Configuration électronique :
[Xe] $4f^{14}5d^{4}6s^{2}$.
La couche externe comprend $5d^{4}$ (orbitales d partiellement remplies) et $6s^{2}$ (orbitales s entièrement remplies), avec 4 électrons f remplissant entièrement la molécule, fournissant un effet de blindage.

Mobilité des électrons :
Les électrons 5d sont partiellement remplis, formant un nuage d'électrons libres à haute densité avec une mobilité élevée.

Structure de la bande :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Le niveau de Fermi du tungstène est situé dans la bande d, et le chevauchement des bandes ne crée aucune bande interdite évidente entre la bande de conduction et la bande de valence, ce qui montre des propriétés métalliques typiques.

Électronégativité :
1,7 (échelle de Pauling), ce qui est modérément faible, reflétant sa faible affinité électronique.

2. Impact des propriétés électroniques sur les performances

(1) Haute conductivité
Propriétés électroniques : Les états non remplis et la grande mobilité des électrons $5d^4$ fournissent un grand nombre d'électrons libres.
Impact : Le tungstène a une conductivité électrique de $18,2 \times 10^6$ S/m, ce qui en fait un excellent matériau conducteur et largement utilisé dans les cibles électroniques, les fils de tungstène et les composants semi-conducteurs.

(2) Excellente conductivité thermique
Propriétés électroniques : La densité élevée et la grande mobilité des électrons libres favorisent le transfert d'énergie thermique, et l'interaction entre les électrons et le réseau améliore la conduction thermique.
Impact : Le tungstène a une conductivité thermique de 173 W/m·K, ce qui le rend adapté aux applications de conductivité thermique à haute température telles que la projection thermique et les alliages à haute température.

(3) Point de fusion élevé et stabilité thermique
Propriétés électroniques : les électrons 5d et 6s forment des liaisons métalliques fortes avec une énergie de liaison allant jusqu'à 850 kJ/mol, et la densité élevée du nuage d'électrons améliore l'attraction entre les atomes.
Impact : Le tungstène a un point de fusion de 3422 °C, ce qui garantit qu'il conserve son intégrité structurelle sous des températures extrêmement élevées (comme la fabrication additive et les composants aérospatiaux).

(4) Stabilité chimique
Propriétés électroniques : L'effet de blindage des électrons 4f protège les électrons externes et la distribution des électrons 5d et 6s est stable, réduisant la tendance à réagir avec les atomes externes.
Impact : Le tungstène est résistant à la corrosion à température ambiante et réagit lentement avec l'oxygène uniquement à des températures élevées, ce qui le rend adapté aux environnements chimiques difficiles (tels que les supports de catalyseurs).

(5) Effets électroniques à l'échelle nanométrique
Propriétés électroniques : À l'échelle nanométrique (par exemple < 100 nm), l'activité électronique de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

surface est améliorée en raison de l'effet de confinement quantique et la surface spécifique augmente. Impact : La poudre de nano-tungstène présente une activité électrocatalytique plus élevée et convient aux électrodes et catalyseurs de batterie.

Propriétés électroniques du tungstène et leur impact sur les performances

Propriétés électroniques	décrire	Impact sur les performances
Configuration électronique	[Xe] 4f ¹ ⁴ 5d ⁴ 6s ² , 5d ⁴ remplit partiellement, 6s ² remplit complètement, 4f fournit un effet de blindage.	- Point de fusion élevé (3422°C) : les électrons 5d et 6s forment une forte liaison métallique avec une énergie de liaison de 850 kJ/mol. - Stabilité chimique : le blindage 4f réduit la réactivité et résiste à la corrosion à température ambiante.
Mobilité des électrons	Les électrons 5d⁴ ne sont pas remplis, formant un nuage d'électrons libres à haute densité avec une mobilité élevée.	- Conductivité électrique élevée (18,2 × 10 ⁶ S/m) : les électrons libres soutiennent la conductivité électrique, adaptée aux cibles électroniques et aux filaments de tungstène. - Conductivité thermique (173 W/m·K) : les électrons transfèrent l'énergie thermique, adaptée à la conduction thermique à haute température.
Structure de bande	Le niveau de Fermi est situé dans la bande d, la bande de conduction et la bande de valence se chevauchent, il n'y a pas de bande interdite évidente et c'est une caractéristique métallique typique.	- Excellente conductivité : aucune bande interdite ne garantit la libre circulation des électrons, adaptée aux composants semi-conducteurs et aux matériaux d'électrodes.
Électronégativité	1,7 (échelle de Pauling), moyenne à faible, faible affinité électronique.	- Inertie chimique : Il ne réagit lentement qu'avec les oxydants forts à température ambiante et convient aux environnements chimiques agressifs (tels que les supports de catalyseurs).
Effets électroniques à l'échelle nanométrique	À l'échelle nanométrique (<100 nm), l'activité électronique de surface est améliorée en raison de l'effet de confinement quantique et la surface spécifique augmente.	- Activité électrocatalytique améliorée : La poudre de nano-tungstène présente une réactivité élevée dans le domaine des électrodes et des catalyseurs de batterie. FABRIQUÉ PAR : CTIA GROUP LTD

1.3 Distribution isotopique du tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

La distribution isotopique du tungstène mérite également d'être soulignée. Il existe cinq isotopes stables de tungstène dans la nature : ^{180}W (0,12 %), ^{182}W (26,50 %), ^{183}W (14,31 %), ^{184}W (30,64 %) et ^{186}W (28,43 %), ainsi qu'une trace de l'isotope radioactif ^{187}W (demi-vie d'environ 23,72 heures). La plus grande abondance de ^{184}W en fait la principale forme de tungstène, et la diversité des isotopes est d'une grande importance pour les applications de l'industrie nucléaire (comme le blindage contre les radiations). Par exemple, le ^{186}W présente une section efficace de capture de neutrons élevée (environ 38,1 barns), ce qui en fait un excellent candidat pour une utilisation comme matériau de blindage dans les réacteurs nucléaires. Les techniques de séparation des isotopes du tungstène (comme la centrifugation) ne sont pas largement utilisées dans l'industrie, mais ont montré un potentiel en recherche pour optimiser davantage les propriétés nucléaires du tungstène.

Du point de vue de la mécanique quantique, les électrons 5d du tungstène contribuent de manière significative à la bande de valence, et la division de ses orbitales d (t_2g et e_g, par exemple) affecte la structure électronique des composés de tungstène. Par exemple, dans la structure monoclinique de WO_3, les atomes de tungstène sont en coordination octaédrique, et la localisation des électrons 5d conduit à une bande interdite d'environ 2,4-2,8 eV, présentant des caractéristiques de semi-conducteur de type n. Cette propriété électronique constitue la base de l'application de la poudre de tungstène dans les domaines de la photocatalyse, de l'électrochromisme et de la détection de gaz. De plus, l'énergie d'ionisation élevée (énergie d'ionisation, première énergie d'ionisation 7,98 eV) du tungstène indique qu'il ne perd pas facilement d'électrons, ce qui renforce encore sa stabilité chimique.

Distribution isotopique du tungstène

La distribution isotopique naturelle du tungstène est la suivante (d'après les données de l'AIEA)

Isotope	Abondance(%)	Masse (u)	Décrire
Tungstène-180 (^{180}W)	0,12	179.9467	L'isotope le plus léger, avec la plus faible abondance
Tungstène -182 (^{182}W)	26,50	181.9482	Abondance modérée, qualité lumineuse
Tungstène -183 (^{183}W)	14.31	182.9502	Abondance modérée
Tungstène-184 (^{184}W)	30,64	183.9509	Isotope le plus abondant, proche de la masse moyenne
Tungstène-186 (^{186}W)	28,43	185.9544	Isotopes plus lourds, plus abondants
Poids atomique moyen	-	183,84	Moyenne pondérée de l'abondance naturelle
Illustrer	Ces isotopes sont tous stables, non radioactifs, et la différence de masse est principalement due à la variation du nombre de neutrons (de 106 à 112). Tableau : CTIA GROUP LTD		

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Effet de la distribution isotopique du tungstène sur les performances

(1) Propriétés liées à la densité et à la qualité

Mécanisme d'influence : La différence de masse isotopique (179,9467 u à 185,9544 u) provoque un léger changement dans la masse atomique, affectant la densité moyenne du tungstène.

Impact sur les performances :

La densité du tungstène naturel est de 19,25 g/cm³. S'il est enrichi d'un isotope spécifique (par exemple ^{186}W), sa densité augmente légèrement (en théorie, d'environ 0,1 à 0,3 %).

Dans les contrepoids de haute précision (tels que les gyroscopes d'aviation), les différences de densité peuvent affecter l'uniformité de la distribution de masse, mais sont généralement négligeables.

Importance de l'application : les utilisations industrielles générales (telles que le carbure cémenté) sont peu affectées, mais elles doivent être prises en compte dans le domaine de l'ultra-précision.

(2) Propriétés thermiques

Mécanisme d'influence : Les isotopes plus lourds (^{1} ^{86}W) ont une masse accrue et une fréquence de vibration du réseau plus faible, ce qui peut légèrement affecter la capacité thermique et la conductivité thermique.

Impact sur les performances :

La conductivité thermique (173 W/m·K) diminue théoriquement légèrement (<1%) avec l'augmentation de la proportion d'isotopes lourds en raison de la diffusion améliorée des phonons.

Le point de fusion (3422°C) n'est en grande partie pas affecté, car il est déterminé principalement par la liaison électronique.

Importance de l'application : L'impact peut être ignoré dans les composants conducteurs de chaleur à haute température (tels que la projection thermique), mais il doit être évalué dans des conditions extrêmes.

(3) Propriétés mécaniques

Mécanisme d'influence : Les différences de masse isotopique ont peu d'effet sur la constante de réseau (3,165 Å), mais peuvent modifier la distribution locale des contraintes.

Impact sur les performances :

La dureté (300-450 HV) et la résistance à la compression (> 6 000 MPa) restent quasiment inchangées, car les propriétés mécaniques macroscopiques sont dominées par la structure cristalline et la force de liaison.

Dans la poudre de tungstène à l'échelle nanométrique, les isotopes plus lourds peuvent légèrement augmenter la stabilité des joints de grains.

Importance de l'application : Aucun impact significatif sur le carbure cémenté et la fabrication additive.

(4) Séparation isotopique et applications spéciales

Mécanisme d'influence : La séparation des isotopes par centrifugation ou diffusion peut modifier le rapport de distribution (par exemple enrichissement ^{1} ^{84}W ou ^{1} ^{86}W).

Impact sur les performances :

L'enrichissement avec des isotopes légers (par exemple, ^{1} ^{80}W) améliore la conductivité thermique et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

électrique (de < 2 %) en raison de la diffusion électron-phonon réduite.
avec des isotopes lourds (tels que ^{186}W) augmente la densité et les capacités de blindage nucléaire.
Importance de l'application : Dans l'industrie nucléaire (par exemple, le blindage contre les radiations) ou dans les cibles électroniques de haute précision, une distribution isotopique sur mesure peut optimiser les performances.

(5) Stabilité chimique

Mécanisme d'influence : La masse isotopique a peu d'effet sur la vitesse de réaction chimique (effet isotopique), car les propriétés chimiques du tungstène sont principalement déterminées par la couche électronique.
Il n'y a pas de changement significatif dans la résistance à l'oxydation (WO_3 est généré à haute température) et la résistance à la corrosion.
Importance de l'application : Dans les applications chimiques telles que les supports de catalyseurs, l'effet de la distribution isotopique peut être ignoré.

Effet de la distribution isotopique sur les performances

Catégorie de performance	Mécanisme d'impact	Impact spécifique	Importance de l'application
Propriétés liées à la densité et à la qualité	Les différences de masse isotopique (179,9467-185,9544 u) affectent la densité moyenne	- La masse volumique naturelle est de 19,25 g/cm³ et augmente légèrement après enrichissement avec W (environ 0,1 %-0,3 %). - L'uniformité de la distribution de masse change légèrement.	- Faible impact pour une utilisation industrielle, des contrepoids ultra-précis doivent être envisagés.
Propriétés thermiques	Les isotopes lourds (tels que ^{186}W) réduisent la fréquence des vibrations du réseau	- La conductivité thermique (173 W/m·K) a légèrement diminué (<1%) en raison d'une diffusion accrue des phonons. - Le point de fusion (3422°C) est resté essentiellement inchangé.	- L'impact des applications de conductivité thermique à haute température peut être ignoré et les conditions extrêmes doivent être évaluées.
Propriétés mécaniques	La différence de masse a peu d'effet sur la constante de réseau (3,165 Å)	- Pas de changements significatifs dans la dureté (300-450 HV) et la résistance à la compression (> 6000 MPa). - Légère augmentation de la stabilité des joints de grains à l'échelle nanométrique.	- L'impact du carbure cémenté et de la fabrication additive n'est pas significatif.
Séparation isotopique et applications spéciales	Ajuster le rapport de distribution (par exemple enrichir ^{180}W ou ^{186}W)	- Enrichi^{180}W améliore la conductivité thermique et électrique (<2%). - Amélioration de la densité	- Industrie nucléaire (blindage), cibles électroniques pour optimiser les performances.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Catégorie de performance	Mécanisme d'impact	Impact spécifique	Importance de l'application
		enrichie[1] [86] W et capacités de blindage nucléaire.	
Stabilité chimique	La masse isotopique a peu d'effet sur la vitesse de réaction (effet isotopique)	- Aucune modification de la résistance à l'oxydation (WO_3 est généré à haute température) et de la résistance à la corrosion. FABRIQUÉ PAR : CTIA GROUP LTD	- L'influence des applications chimiques telles que les supports de catalyseurs est négligeable.

La distribution isotopique du tungstène a peu d'effet sur ses performances globales, principalement reflétées par le réglage fin des propriétés physiques telles que la densité et la conductivité thermique. La poudre de tungstène à l'état naturel ([1] [84] W étant la plus abondante) répond à la plupart des besoins industriels, notamment pour le carbure cémenté et les matériaux électroniques. Cependant, dans des domaines spécifiques (comme la technologie nucléaire ou la fabrication de haute précision), les performances peuvent être optimisées en ajustant la distribution par séparation isotopique. Par exemple, l'enrichissement en [1] [86] W peut améliorer les effets de protection contre les radiations, tandis que les isotopes légers (comme [1] [80] W) peuvent légèrement augmenter la conductivité. Ce réglage fin doit tenir compte du coût et des avantages pratiques.

1.4 Structure cristalline du tungstène

Le tungstène se présente sous la forme d'une structure cristalline cubique centrée (BCC) à température ambiante, avec un groupe d'espace de Im3m et une constante de réseau de a = 3,165 Å (à température ambiante). Chaque maille élémentaire de la structure BCC contient 2 atomes de tungstène, un nombre de coordination de 8 et un facteur de remplissage atomique de 68 %, inférieur à celui de la cubique à faces centrées (FCC, 74 %) et de la hexagonale compacte (HCP, 74 %). Cette structure confère au tungstène une densité extrêmement élevée (densité, 19,25 g/cm³), ce qui en fait l'un des métaux communs les plus lourds, juste derrière l'or (19,32 g/cm³). La stabilité de la structure BCC provient des fortes liaisons métalliques des atomes de tungstène, avec une énergie de liaison d'environ 850 kJ/mol, bien supérieure à celle du fer (environ 410 kJ/mol). Cependant, la faible symétrie de la structure BCC conduit à une mauvaise ductilité du tungstène, qui est sujet à une fracture fragile à température ambiante, et la température de transition ductile-fragile (DBTT) est d'environ 200 à 400 °C, selon la pureté et les conditions de traitement.

Dans des conditions de température élevée (> 2500 °C), les cristaux de tungstène peuvent subir une transition de phase. Des études ont montré que sous haute pression (haute pression, par exemple supérieure à 10 GPa) ou dopage (comme l'ajout de Re, Mo), le tungstène peut se transformer en une structure hexagonale compacte (HCP) avec des constantes de réseau a ≈ 2,76 Å et c ≈ 4,48 Å. L'émergence de cette phase métastable est liée au réarrangement des électrons d, mais elle est rare dans

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

l'industrie et est principalement observée dans les études théoriques et les environnements extrêmes (tels que les dispositifs de fusion nucléaire). De plus, le tungstène peut brièvement former un état amorphe à des températures extrêmement élevées (proche du point de fusion), suivi d'une recristallisation rapide en une structure BCC, un comportement cohérent avec son point de fusion élevé et sa forte énergie de liaison.

Les défauts des cristaux de tungstène ont un impact significatif sur leurs propriétés. Les dislocations sont les principaux types de défauts, notamment les dislocations de bord et les dislocations vis. Dans le tungstène écroui, la densité de dislocations peut atteindre 10^{10}-10^{12} cm^{-2}, ce qui entraîne une dureté accrue mais une ténacité réduite. Un recuit à haute température (1 000 à 1 500 °C) peut réduire la densité de dislocations à 10^{8} cm^{-2} et améliorer la ductilité. Les joints de grains sont un autre défaut clé. Le tungstène à petits grains (taille de grain < 10 μm) présente une résistance élevée en raison de sa grande surface de joint de grains, mais est sujet à la fracture le long du joint de grains ; le tungstène à gros grains (> 100 μm) est plus ductile. Les éléments dopants (tels que 0,5 à 1 % en poids de La_2O_3 ou de K) améliorent considérablement la résistance à la fragilité du tungstène en fixant les dislocations et en stabilisant les joints de grains. Par exemple, un fil de tungstène dopé au potassium peut inhiber la croissance des grains et prolonger la durée de vie dans les applications de filaments.

La structure cristalline de la poudre de tungstène de taille nanométrique est plus complexe. Prenons l'exemple de WO_3 : sa forme courante est monoclinique, groupe d'espace P_1/n, constantes de réseau a = 7,306 Å, b = 7,540 Å, c = 7,692 Å, β = 90,91°. Les atomes de tungstène de cette structure sont en coordination octaédrique WO_6, et la disposition asymétrique des atomes d'oxygène conduit à la formation d'une bande interdite, rendant WO_3 jaune et photocatalytiquement actif. En revanche, la poudre de tungstène métallique conserve une structure BCC, mais les effets de surface peuvent induire un désordre local, en particulier lorsque la taille des particules est inférieure à 20 nm, la proportion d'atomes de surface (> 30 %) affecte significativement la stabilité du cristal. De plus, les sous-oxydes tels que $WO_{2.9}$ ($W_{18}O_{49}$) présentent souvent une structure monoclinique en forme d'aiguille (Needle-like Monoclinic, P2/m) et présentent des caractéristiques d'absorption infrarouge uniques.

Structure cristalline du tungstène

Caractéristiques	Décrire
Taper	Cubique centrée (bcc)
Constante de réseau	Environ 3,165 å (à température ambiante)
Numéro de coordination	8 (chaque atome a 8 voisins les plus proches)
Densité apparente	L'efficacité d'empilement théorique est de 68 %, ce qui est relativement compact mais inférieur à celui du fcc
Stabilité	Maintenir le bcc de la température ambiante au point de fusion (3422°c), sans changement de phase FABRIQUÉ PAR :: ctia group ltd

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Effet de la structure cristalline sur les performances

Catégorie de performance	Mécanisme d'impact	Impact spécifique	Importance de l'application
Point de fusion élevé et stabilité thermique	L'emballage serré du BCC et les fortes liaisons métalliques (énergie de liaison 850 kJ/mol) nécessitent une énergie élevée pour se rompre.	- Le point de fusion est de 3422°C, le plus élevé parmi les métaux. - La structure est stable à haute température et il n'y a pas de transformation cristalline.	- Convient aux alliages à haute température, à la fabrication additive, à la projection thermique.
Dureté et résistance mécanique élevées	Le BCC présente un nombre de coordination élevé, une forte force interatomique et une forte résistance à la déformation	- Dureté 300-450 HV, résistance à la compression >6000 MPa. - Excellente résistance à l'usure et ténacité.	- Pour outils de coupe, revêtements anti-usure, carbures cémentés.
Conductivité thermique et conductivité électrique	Le nuage d'électrons BCC est uniforme, les électrons 5d et 6s se déplacent librement, mais la diffusion des phonons est élevée	- La conductivité thermique est de 173 W/m·K, la conductivité électrique est de 18,2 × 10 ⁶ S/m, légèrement inférieure aux métaux FCC. - La conductivité électrique est affectée par les joints de grains.	- Applicable aux cibles électroniques et aux fils de tungstène, les défauts doivent être optimisés.
densité	Le BCC n'est pas le plus dense, mais la masse atomique élevée et la compacité du réseau fonctionnent ensemble	- Densité 19,25 g/cm³, deuxième après les métaux précieux.	- Utilisé comme contrepoids, protection contre les radiations.
Stabilité chimique et aptitude au traitement	Les atomes de surface du BCC sont disposés de manière lâche et ont une faible réactivité ; la déformation plastique est difficile	- Anticorrosion à température ambiante, oxydé lentement en WO_3 à haute température. - Faible ductilité, nécessite un traitement par métallurgie des poudres.	- Adapté aux environnements difficiles, le traitement repose sur une technologie spéciale.
Effets cristallins à l'échelle nanométrique	À l'échelle nanométrique, la taille des grains est réduite, le rapport entre les limites des grains est augmenté et l'effet de surface est amélioré.	- Surface spécifique de 20 m²/g, améliorant l'activité catalytique. - La dureté et la résistance augmentent avec l'affinement du grain (effet Hall-Page).	- La poudre de nano-tungstène est utilisée comme support de catalyseur et électrode de batterie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

1.5 Propriétés thermodynamiques du tungstène

Les propriétés thermodynamiques du tungstène constituent son principal atout dans les applications à haute température. Son point de fusion est de 3 422 °C (3 695 K), le plus élevé de tous les métaux purs, juste derrière le point de sublimation du carbone (environ 3 900 °C). Cette propriété résulte de sa forte liaison métallique et de sa forte densité de nuages électroniques, avec une énergie de dissociation de liaison pouvant atteindre 8,82 eV/atome. Son point d'ébullition est de 5 555 °C (5 828 K) et sa pression de vapeur est extrêmement faible, par exemple seulement 10^{-4} Pa à 2 000 °C et environ 0,1 Pa à 3 000 °C. Cette faible pression de vapeur confère au tungstène une excellente stabilité dans un environnement sous vide à haute température (comme un évaporateur à faisceau d'électrons), évitant ainsi toute perte de matière.

Le coefficient de dilatation thermique linéaire du tungstène est de $4,5 \times 10^{-6}$ K^{-1} (20-1000 °C), ce qui est bien inférieur à celui du cuivre ($16,5 \times 10^{-6}$ K^{-1}) et de l'aluminium ($23,1 \times 10^{-6}$ K^{-1}). Ce faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité dimensionnelle du tungstène face aux variations de température. Par exemple, dans les aubes de turbines aérospatiales, les composites à base de tungstène peuvent supporter des chocs thermiques supérieurs à 1000 °C sans déformation. La capacité thermique massique est de 0,13 J/(g·K) (25 °C), qui augmente légèrement avec la température, atteignant environ 0,15 J/(g·K) à 1000 °C. Cette capacité thermique spécifique plus faible signifie que le tungstène nécessite moins d'énergie pour chauffer, mais il peut toujours stocker suffisamment de chaleur à des températures élevées pour convenir aux applications de dissipateur thermique.

La conductivité thermique du tungstène est de 173 W/(m·K) (température ambiante), ce qui est moyen à élevé parmi les métaux, supérieur à celui du fer (80 W/(m·K)) mais inférieur à celui du cuivre (401 W/(m·K)). La conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la température, atteignant environ 130 W/(m·K) à 1 000 °C et chutant à 100 W/(m·K) à 2 000 °C. Cette dépendance à la température est liée à l'augmentation de la diffusion des électrons, mais elle reste suffisante pour répondre aux exigences de conduction thermique à haute température. Par exemple, dans le matériau dissipateur thermique W-Cu, le tungstène assure le support structurel tandis que le cuivre améliore la conductivité thermique. La diffusivité thermique du tungstène est d'environ $6,8 \times 10^{-5}$ m^2/s (température ambiante), reflétant son taux de transfert thermique modéré.

L'enthalpie de fusion du tungstène est de 52,31 kJ/mol, et son enthalpie de vaporisation peut atteindre 774 kJ/mol, ce qui indique que sa transition de phase nécessite beaucoup d'énergie. Cette valeur d'enthalpie élevée limite le traitement par fusion du tungstène, et la technologie de la métallurgie des poudres est principalement utilisée dans l'industrie. Par exemple, la poudre de tungstène peut être frittée à 1 400-1 600 °C pour former un corps dense, évitant ainsi la forte consommation d'énergie d'une fusion directe. De plus, la stabilité thermodynamique du tungstène est particulièrement importante en atmosphère inerte ou réductrice (comme Ar, H_2), mais il s'oxyde facilement en milieu oxygéné (voir 1.4 pour plus de détails). Une attention particulière doit donc être portée à ce sujet.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Propriétés thermodynamiques du tungstène

Propriétés thermodynamiques	Valeur/Description	Remarque
Point de fusion	3422°C (3695 K)	Le plus élevé parmi tous les métaux
Point d'ébullition	5555°C (5828 K)	Très faible volatilité
Chaleur spécifique	0,132 J/(g·K) (25 °C)	Moins d'énergie nécessaire pour chauffer
Conductivité thermique	173 W/(m·K) (température ambiante)	conductivité thermique élevée
Coefficient de dilatation thermique	4,5 × 10 $^{-6}$ /K (20-1000°C)	Dilatation thermique minimale
Pression de vapeur	1,0 × 10 $^{-7}$ Pa (environ 3000 °C)	Moins de volatilité à haute température
Enthalpie de fusion	52,31 kJ/mol	Forte énergie nécessaire à la fusion
Entropie molaire standard	32,6 J/(mol·K) (298 K) Fabrication intelligente au tungstène	Structure cristalline hautement ordonnée

Effet des propriétés thermodynamiques sur les performances

Catégorie de performance	Notions de base sur la thermodynamique	Impact spécifique	Importance de l'application
Stabilité à haute température	Point de fusion élevé (3422°C) et faible pression de vapeur (10 $^{-7}$ Pa à 3000°C)	- Il peut être utilisé pendant une longue période à une température proche du point de fusion (par exemple 3000°C) avec une perte par volatilisation minimale.	- Utilisé dans les composants de fours à haute température, les buses de fusée, la projection thermique.
Conductivité thermique	Conductivité thermique 173 W/(m·K), les électrons et les réseaux coopèrent pour conduire la chaleur	- Dissipation rapide de la chaleur, surchauffe locale réduite, performances stables.	- Convient aux cibles électroniques, aux fils de tungstène et aux composants de dissipation thermique à haute température.
Faible dilatation thermique	Coefficient de dilatation thermique 4,5 × 10 $^{-6}$ /K, la structure BCC limite le déplacement	- Faible variation dimensionnelle à haute température, évitant les dommages dus aux contraintes thermiques.	- Utilisé dans les pièces de précision, le carbure cémenté, l'aérospatiale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Catégorie de performance	Notions de base sur la thermodynamique	Impact spécifique	Importance de l'application
Absorption et stockage d'énergie	Faible capacité thermique massique (0,132 J/(g·K)), enthalpie de fusion élevée (52,31 kJ/mol)	- Il chauffe rapidement, nécessite beaucoup d'énergie pour fondre et possède une forte résistance à la chaleur.	- Convient pour les températures élevées instantanées (comme le frittage laser).
Réactivité chimique (oxydation)	Un changement d'enthalpie à haute température entraîne l'oxydation, une faible pression de vapeur ralentit la réaction.	- >500°C s'oxyde lentement en WO_3 , stable en dessous de cette température.	- Fonctionne mieux dans une atmosphère sous vide/inerte (comme les ampoules au tungstène).
Effets thermodynamiques à l'échelle nanométrique	L'échelle nanométrique a une grande surface spécifique (20 m^2/g), ce qui augmente l'énergie de surface	- Réduction du point de fusion local (50-100°C) et augmentation de la réactivité thermique.	- Utilisé pour les catalyseurs et les matériaux sensibles à la chaleur. Fabrication intelligente au tungstène FABRIQUÉ PAR :

1.6 Stabilité chimique du tungstène

Le tungstène présente une stabilité chimique extrêmement élevée à température ambiante et résiste à la corrosion par la plupart des acides et des bases. À température ambiante, il ne réagit pratiquement pas à l'acide chlorhydrique (HCl), à l'acide sulfurique (H_2SO_4) et à l'acide phosphorique (H_3PO_4). Même après plusieurs mois d'immersion dans des solutions concentrées, la vitesse de corrosion est inférieure à 0,01 mm/an. Ceci est dû à la fine couche de WO_3 (2 à 5 nm d'épaisseur) qui se forme spontanément à la surface du tungstène, dont la structure dense bloque toute réaction chimique ultérieure. Cependant, dans les acides oxydants forts, la stabilité du tungstène diminue. Par exemple, dans l'acide nitrique concentré (HNO_3, 68 %), le tungstène se dissout lentement pour former du WO_3 jaune, avec une vitesse de réaction d'environ 0,1 à 0,5 mm/an (25 °C). Dans l'acide fluorhydrique (HF), la vitesse de corrosion du tungstène augmente considérablement (> 1 mm/an), générant du H_2WO_4 ou du WO_2F_2 soluble, et la réaction est la suivante :

$W+6HF \rightarrow H2WO4+3H2$ W + 6HF
$\rightarrow H_2WO_4 + 3H_2W+6HF \rightarrow H2WO4 + 3H2$

En milieu alcalin, le tungstène est stable dans une solution diluée de NaOH ou de KOH à froid, mais dans un alcali concentré à haute température (comme NaOH fondu, > 300 °C), le tungstène est corrodé pour former du tungstate :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

W+2NaOH+O2
→Na2WO4+H2O W + 2NaOH + O_2
→ $Na_2WO_4 + H_2O$ W+2NaOH+O_2
→ $Na_2WO_4 + H_2O$
Cette réaction est souvent utilisée dans la purification industrielle des minerais de tungstène (comme la scheelite), mais elle doit être évitée pour les produits à base de tungstène.

Le comportement à l'oxydation du tungstène est le principal facteur limitant sa stabilité chimique. À l'air, le tungstène s'oxyde très lentement en dessous de 400 °C, ne formant qu'une fine couche de WO_3 à la surface, et l'épaisseur croît selon la loi logarithmique ($d \propto \ln(t)$). Entre 500 et 800 °C, la vitesse d'oxydation s'accélère et l'épaisseur du film de WO_3 augmente jusqu'à atteindre l'échelle du micromètre, selon la loi parabolique ($d^2 \propto t$). La réaction est la suivante :
2W+3O2→2WO3 2W + $3O_2$
→ $2WO_3$ 2W+$3O_2$ →2WO_3
Au-dessus de 1 000 °C, le WO_3 commence à se volatiliser (point de fusion 1 473 °C, pression de vapeur importante), entraînant une perte de masse rapide du tungstène. Par exemple, à 1 200 °C dans l'air, la perte de masse par oxydation du tungstène peut atteindre 10 mg/cm²·h. Afin de ralentir l'oxydation, des revêtements protecteurs (tels que SiC, Al_2O_3) ou des atmosphères inertes (telles que Ar, N_2) sont souvent utilisés dans l'industrie. En atmosphère H_2, le tungstène est non seulement stable, mais peut également être préparé par réduction du WO_3 pour obtenir de la poudre de tungstène. La réaction est la suivante :
WO3+3H2
→W+3H2O $WO_3 + 3H_2$
→ W + $3H_2O$ WO 3 + 3H_2
→W + 3H2O

Le tungstène présente une faible réactivité avec les non-métaux. À température ambiante, il ne réagit pas de manière évidente avec l'azote (N_2), le soufre (S) ou le chlore (Cl_2). Cependant, à haute température (> 1 000 °C), il peut réagir avec le carbone pour former du carbure de tungstène (carbure de tungstène, WC, point de fusion 2 870 °C, dureté > 9 Mohs) et avec l'azote pour former du nitrure de tungstène (nitrure de tungstène, WN, température de décomposition ~ 600 °C). Ces composés sont largement utilisés dans les alliages durs et les revêtements résistants à l'usure. Le tungstène n'a pas de réaction chimique directe avec l'hydrogène (H_2), mais dans une atmosphère H_2 à 400-700°C, WO_3 est réduit en tungstène métallique pour produire de la poudre de tungstène avec une taille de particule contrôlable (10 nm-100 μm), qui est la méthode principale pour la production industrielle.

La stabilité chimique du tungstène est également affectée par la présence d'impuretés. Le tungstène de haute pureté (> 99,99 %) est plus résistant à la corrosion que le tungstène contenant des impuretés telles que le fer et le molybdène. Par exemple, lorsque la teneur en fer est supérieure à 50 ppm, le taux de corrosion du tungstène en milieu acide augmente de 20 à 30 %. Par conséquent, la préparation de poudre de tungstène de haute pureté nécessite un contrôle strict des matières premières et des procédés (tels que la purification par échange d'ions, les rinçages multiples, etc.).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Stabilité chimique du tungstène

Caractéristiques	Décrire	Base chimique
Stabilité de la température ambiante	À température ambiante (25°C), il ne réagit pas avec l'eau, l'oxygène, les acides dilués (hcl, h_2so_4) ou les alcalis (naoh), et présente une fine couche d'oxyde (wo_3) à la surface.	Effet de blindage électronique 4f, les liaisons métalliques fortes réduisent la réactivité.
Stabilité à haute température	L'oxydation à < 500 °C est très lente dans l'air et présente une résistance élevée à la corrosion aux acides non oxydants et aux solvants organiques.	L'électronégativité est de 1,7 et l'affinité chimique est moyenne à faible.

Effet de la stabilité chimique sur les performances

Impact sur les performances	Impact spécifique	Importance de l'application
Résistance à la corrosion	Il peut résister à la corrosion acide et alcaline à température ambiante à température moyenne et prolonger la durée de vie.	Composants de réacteur chimique, ampoules en tungstène (vide/inerte).
Stabilité d'application à haute température	<500°C La couche d'oxyde croît lentement et présente une structure complète.	Composants de fours à haute température, matériaux aérospatiaux.
Traitement et stockage pratiques	Aucune protection particulière n'est requise à température ambiante, ce qui simplifie le stockage et le transport.	Les procédés de métallurgie des poudres bénéficient de l'inertie chimique.

Facteurs limitatifs affectant la stabilité chimique

Facteurs limitatifs	mécanisme	Impact spécifique	Contre-mesures
Oxydation à haute température	>500°C réagit avec O_2 pour former WO_3 ($W + 3/2\ O_2 \rightarrow WO_3$) , et WO_3 se volatilise à haute température .	L'oxydation de surface s'intensifie, les propriétés mécaniques se détériorent et la qualité est perdue.	Utiliser une protection sous vide ou par gaz inerte (tel que Ar, N_2).
Oxydants forts	L'acide nitrique concentré (HNO_3), l'acide perchlorique	Corrosion superficielle et durabilité réduite.	Éviter le contact avec des solutions oxydantes fortes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Facteurs limitatifs	mécanisme	Impact spécifique	Contre-mesures
	($HClO_4$), etc. dissolvent lentement le tungstène pour produire du H_2WO_4 ou du tungstate.		
Halogènes et halogénures	>300°C réagit avec F_2 et Cl_2 pour former des halogénures volatils (tels que WF_6, point d'ébullition 17,1°C).	Le matériau est rapidement perdu et la structure est endommagée.	Évitez les environnements halogènes ou utilisez des revêtements protecteurs.
Fragilisation par l'hydrogène	>800°C Il absorbe l'hydrogène dans H_2, formant une phase cassante (comme WH_x), et les joints de grains sont affaiblis.	La ténacité diminue et une rupture fragile se produit facilement.	Contrôler la concentration en hydrogène ou utiliser des matériaux composites résistants à l'hydrogène.
Nano-agent de surface actif	La poudre de nano-tungstène (<100 nm) a une grande surface spécifique (20 m^2/g), une énergie de surface élevée et est facilement réactive avec l'oxygène/l'eau.	L'oxydation à température ambiante est accélérée et la stabilité au stockage est réduite.	Stockage étanche ou traitement de passivation de surface. FABRIQUÉ PAR : CTIA GROUP LTD

Références

Lassner, E., et Schubert, WD (1999). *Tungstène : propriétés, chimie, technologie de l'élément, alliages et composés chimiques* . Springer.

Des données complètes sur la structure atomique, les propriétés cristallines, la thermodynamique et la stabilité chimique du tungstène sont fournies.

Cotton, FA, Wilkinson, G., et Gaus, PL (1988). *Chimie inorganique avancée* (5e éd.). Wiley.

La configuration électronique, la fonction de travail et la réactivité chimique du tungstène sont décrites en détail.

Yih, SWH, et Wang, CT (1979). *Tungstène : sources, métallurgie, propriétés et applications* . Plenum Press.

Les propriétés physiques, le comportement à haute température et le contexte d'application industrielle du tungstène sont présentés.

Zhang, J., et Wang, Y. (2018). « Synthèse et propriétés photocatalytiques de l'oxyde de tungstène nanométrique de haute pureté ». *Journal of Materials Chemistry A* , 6(15), 6543-6550.

Des données expérimentales sur la structure cristalline et les propriétés semi-conductrices du WO_3 sont fournies.

Bartha, L., et Lassner, E. (2000). « Propriétés à haute température du tungstène et de ses alliages ». *Revue internationale des métaux réfractaires et des matériaux durs* , 18(4-5), 245-251.

La dilatation thermique, la conductivité thermique et le comportement d'oxydation à haute température du tungstène sont discutés.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

CTIA GROUP LTD
Introduction of High Purity Tungsten Powder

1. High Purity Tungsten Powder Overview

CTIA GROUP LTD's high-purity tungsten powder is produced using a high-purity tungsten oxide hydrogen reduction process. High-purity tungsten powder is widely used in the electronics industry (such as sputtering targets, tungsten wires), aerospace, semiconductors and high-precision manufacturing due to its ultra-high purity, fine particle size and excellent physical properties. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality tungsten powder products to meet cutting-edge technology needs.

2. High Purity Tungsten Powder Features

Chemical composition: Tungsten (W), high purity metal powder.

Purity: ≥99.99% (4N), with extremely low impurity content.

Appearance: Grey or dark grey powder, uniform color.

Ultra-high purity: impurities are controlled at ppm level, ensuring excellent electrical and mechanical properties.

Fine particles: The particle size can reach 0.1-5 μm, which can meet high-precision applications.

Low oxygen content: oxygen content ≤ 0.02%, improving sintering performance and material stability.

3. High Purity Tungsten Powder Specifications

Index	CTIA GROUP LTD High Purity Tungsten Powder Standard (4N)
Tungsten content (wt%)	≥99.99
Impurities (wt%, max)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0010, Si≤0.0005, Al≤0.0005, Ca≤0.0005, Mg≤0.0005, Na≤0.0010, K≤0.0010, O≤0.0200, C≤0.0050, N≤0.0020, P≤0.0005, S≤0.0005
Water content (wt%)	≤0.02
Particle size (μm, FSSS)	0.1-5.0 (superfine 0.1-1.0, fine 1.0-5.0)
Bulk density (g/ cm^3)	4.5-6.5
Particle size	Provide ultra-fine (0.1-1.0 μm) and fine (1.0-5.0 μm) specifications, can be customized according to customer needs
Moisture	≤0.02%, ensuring product dryness and stability
Customization	Optional ultra-high purity grade (5N, ≥99.999%), with further reduction of impurities (e.g. O≤0.01%)

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner sealed vacuum aluminum foil bag, outer iron barrel or plastic barrel, net weight 5kg, 10kg or 25kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: With quality certificate, including tungsten content, impurity analysis (ICP-MS), particle size (FSSS method), bulk density and moisture data, shelf life is 12 months (sealed and dry conditions).

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129696

For more tungsten powder information, please visit China Tungsten Online website (www.tungsten-powder.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chapitre 2 Forme et classification de la poudre de tungstène

2.1 Aperçu de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène

La poudre de tungstène est la forme de base du tungstène métallique et de ses composés destinés à la transformation et à l'application. Sa granulométrie est l'une des caractéristiques essentielles qui déterminent ses propriétés physiques, son activité chimique et ses procédés de transformation ultérieurs (tels que le frittage et le compactage). La granulométrie de la poudre de tungstène est très variable, allant du nanomètre (< 100 nm) au micromètre (1-100 μm), voire au millimètre (> 1 000 μm) dans certaines conditions.

La granulométrie moyenne de la poudre de tungstène couramment utilisée dans l'industrie se situe généralement entre 1 et 10 μm. La poudre de nano-tungstène de haute pureté peut être raffinée jusqu'à 10 à 50 nm, voire jusqu'à 5 nm, selon le procédé de préparation et les exigences de l'application. Par exemple, une poudre de tungstène dont la granulométrie médiane (D50) est de 5 μm présente une densité plus élevée (généralement supérieure à 95 % de la densité théorique) lors du frittage, ce qui est adapté aux alliages durs. En revanche, les particules grossières dont la granulométrie est de 50 μm peuvent être plus adaptées aux matériaux poreux de faible densité en raison de leur porosité accrue. L'uniformité de la distribution granulométrique est caractérisée par les paramètres D10, D50 et D90, où D10 signifie que 10 % des particules sont plus petites que cette taille, D50 est la granulométrie médiane et D90 signifie que 90 % des particules sont plus petites que cette taille. Ces paramètres reflètent la largeur et l'asymétrie de la distribution. Une distribution étroite (D90/D10 < 2) indique une concentration granulométrique. Par exemple, une poudre de tungstène avec D10 = 4 μm, D50 = 5 μm et D90 = 6 μm se rétracte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

uniformément lors du frittage (retrait uniforme) et présente peu de défauts dans le produit fini. Une distribution large (D90/D10 > 5) telle que D10 = 1 μm, D50 = 10 μm et D90 = 50 μm indique des différences significatives de granulométrie, ce qui peut entraîner une porosité irrégulière ou une diminution de la résistance lors du frittage.

2.1.1 Caractéristiques et propriétés de trois granulométries de poudre de tungstène et leur impact sur les applications

La granulométrie de la poudre de tungstène est l'une de ses propriétés physiques clés, qui influence directement ses performances de mise en œuvre, les propriétés mécaniques du produit final et ses domaines d'application. Selon les pratiques industrielles et les besoins de production réels, la poudre de tungstène est généralement divisée en trois types de granulométrie : la poudre de tungstène grossière (granulométrie de 5 à 50 μm), la poudre de tungstène fine (granulométrie de 0,1 à 5 μm) et la poudre de tungstène nanométrique (granulométrie < 0,1 μm ou < 100 nm). Voici une analyse détaillée de la granulométrie, des caractéristiques, des performances et des applications.

1. Poudre de tungstène grossière

Distribution granulométrique

Plage : 5-50 μm

D50 typique (taille médiane des particules) : 10-20 μm

Caractéristiques de distribution : La granulométrie est relativement large et est généralement obtenue par tamisage ou classification par flux d'air. La forme des particules est généralement polyédrique irrégulière ou sphérique (comme dans le cas d'une préparation par atomisation plasma).

Caractéristiques

Bonne fluidité : en raison des particules plus grosses, la poudre de tungstène grossière a une meilleure fluidité et la valeur de mesure du débitmètre à effet Hall est généralement comprise entre 20 et 30 s/50 g.

Densité apparente élevée : la densité apparente est généralement de 5 à 10 g/cm³, ce qui est proche de 25 à 50 % de la densité théorique (19,25 g/cm³), et l'efficacité d'empilage est élevée.

₃) ou paratungstate d'ammonium (APT) à l'aide d'un four de réduction à l'hydrogène ou d'un four tubulaire rotatif. Le procédé est mature et le rendement est élevé (jusqu'à 50 kg/h ou plus).

Faible activité de surface : petite surface spécifique (0,1-0,5 m²/g), petite surface de contact entre les particules, facile à stocker et à transporter, pas facile à oxyder ou à absorber l'humidité.

performance

Propriétés mécaniques : Le corps vert formé par pressage et frittage de la poudre de tungstène grossière a des grains plus gros (10-50 μm) et une dureté inférieure (HRA 80-85), mais une meilleure ténacité et une forte résistance aux chocs.

Performances de frittage : La température de frittage est élevée (1800-2000°C), le taux de retrait est faible (10%-15%), et il convient au moulage de produits de grande taille.

Stabilité thermique : En raison de sa grande taille de particules et de sa faible énergie de surface, la poudre de tungstène grossière n'est pas sujette à l'agglomération ou à l'oxydation à haute température (teneur en O_2 < 0,05 % en poids).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Usinabilité : Bonne fluidité, adaptée aux procédés de pressage traditionnels de la métallurgie des poudres (tels que le pressage à froid ou le pressage à chaud), mais ne convient pas à la fabrication additive qui nécessite une grande précision.

Impact sur l'utilisation

Application principale : La poudre de tungstène brute est largement utilisée dans les produits traditionnels de métallurgie des poudres, tels que les tiges de tungstène, les plaques de tungstène, les creusets en tungstène et les alliages à densité élevée (W-Ni-Fe/Cu).

Analyse d'impact :

Dans les alliages lourds, la densité apparente élevée et la bonne fluidité de la poudre de tungstène grossière garantissent un remplissage uniforme et une densité élevée (> 17 g/cm³), ce qui convient à la fabrication de contrepoids (tels que les contrepoids aérospatiaux) ou de matériaux de protection contre les radiations.

Dans les électrodes en tungstène (telles que les électrodes de soudage TIG), les particules grossières offrent une résistance suffisante et une résistance aux températures élevées, prolongeant ainsi la durée de vie.

Limitations : Une granulométrie trop importante conduit à des grains grossiers après frittage, ce qui limite son application dans les outils à haute dureté (tels que les outils en carbure) ou les pièces structurelles fines.

2. Poudre de tungstène fine

Distribution granulométrique

Plage : 0,1-5 μm

D50 typique : 1-3 μm

Caractéristiques de distribution : La distribution granulométrique est étroite et est généralement préparée par broyage à boulets, concassage à flux d'air ou réduction par micro-ondes. Les particules sont principalement des polyèdres irréguliers avec une petite quantité de particules sphériques.

Caractéristiques

Fluidité moyenne : Les particules sont petites et la fluidité est réduite. La valeur mesurée par le débitmètre à effet Hall est généralement de 30 à 50 s/50 g. Il est nécessaire d'ajouter un agent fluidifiant (par exemple, 0,1 % en poids de SiO_2) pour l'améliorer.

Masse volumique apparente moyenne : la densité apparente est de 3 à 6 g/cm³, il y a plus d'espaces entre les particules et l'efficacité d'empilement est inférieure à celle de la poudre de tungstène grossière.

Le processus de préparation est complexe : un four de réduction à l'hydrogène (basse température 600-800°C) ou un broyeur à jet est utilisé pour le traitement fin, et les conditions de réduction (telles que le débit de H_2 et le gradient de température) sont contrôlées pour obtenir une granulométrie uniforme.

Activité de surface élevée : la surface spécifique est de 0,5 à 2 m²/g, l'énergie de surface des particules est augmentée et elles absorbent facilement l'humidité ou s'oxydent (la teneur en O_2 peut atteindre 0,1 à 0,2 % en poids) et doivent être emballées sous vide pour le stockage.

performance

Propriétés mécaniques : Après frittage, la granulométrie est plus petite (1-5 μm), la dureté est améliorée (HRA 85-90), mais la ténacité est légèrement inférieure à celle de la poudre de tungstène grossière,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

adaptée aux applications nécessitant une résistance à l'usure.

Performances de frittage : La température de frittage est réduite (1500-1800°C), le taux de retrait est plus élevé (15%-20%), et la densité peut atteindre 95%-98% (18-19 g/cm³).

Stabilité thermique : Il a une activité de surface élevée et a tendance à s'agréger légèrement à des températures élevées, mais il peut toujours maintenir une bonne stabilité (O_2 < 0,1 % en poids).

Processabilité : Convient au moulage par presse et à la fabrication additive à petite échelle (comme la pulvérisation), mais la fluidité limite son application dans la production automatisée à grande échelle.

Impact sur l'utilisation

Application principale : La poudre de tungstène fine est principalement utilisée pour le carbure cémenté (tels que les outils de coupe WC-Co), le fil de tungstène, les revêtements par projection thermique et certains matériaux électroniques.

Analyse d'impact :

Dans le carbure cémenté, la poudre de tungstène fine réagit avec le noir de carbone pour former du carbure de tungstène (WC), qui a des grains fins (< 5 μm) et améliore la dureté et la résistance à l'usure (HRA> 88), le rendant adapté aux outils de coupe et aux pièces résistantes à l'usure (telles que les forets et les fraises).

Dans la production de fil de tungstène, les particules fines assurent l'uniformité du corps vert fritté, qui convient à l'étirage de fil de tungstène ultrafin (diamètre < 0,02 mm) pour les filaments ou les sources de faisceaux d'électrons.

Dans les revêtements par projection thermique, la poudre fine de tungstène offre une adhérence et une finition de surface améliorées et convient aux revêtements résistants à l'usure et à la corrosion (tels que les pales de moteurs d'avion).

Limitations : Faible fluidité, délaminage facile ou densité inégale lors du pressage, ne convient pas à la fabrication additive de produits surdimensionnés ou aux exigences de fluidité élevées.

3. Poudre de nano-tungstène

Distribution granulométrique

Plage : < 0,1 μm (< 100 nm)

D50 typique : 20-80 nm

Caractéristiques de distribution : La granulométrie est extrêmement fine et est généralement préparée par mise en solution (par exemple, séchage par atomisation + réduction à basse température), atomisation au plasma ou électrolyse. Les particules sont généralement quasi sphériques ou polyédriques.

Caractéristiques

Faible fluidité : Les particules sont très petites, la force de van der Waals entre les particules est importante, la fluidité est extrêmement faible et le débitmètre Hall est difficile à mesurer (> 50 s/50 g ou aucun débit).

Faible densité apparente : la densité apparente n'est que de 1 à 3 g/cm³, le taux de vide est élevé et l'efficacité d'empilage est faible (< 20 %).

Le processus de préparation est complexe : un équipement de précision (tel qu'une tour de séchage par atomisation, une cellule électrolytique ou un four de réduction à micro-ondes) est nécessaire, les paramètres du processus (tels que la température de réduction < 700 °C, la concentration en H_2) doivent

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

être strictement contrôlés et le rendement est faible (< 5 kg/h).

Activité de surface très élevée : surface spécifique > 10 m^2/g, énergie de surface très élevée, très facile à oxyder (O_2 peut atteindre 0,5 % en poids) ou à agglomérer, nécessite un stockage sous vide ou sous gaz inerte.

performance

Propriétés mécaniques : Après frittage, les grains sont extrêmement fins (<1 μm) et la dureté est extrêmement élevée (HRA>90), mais la ténacité est faible, il est facile de se casser de manière cassante et la résistance aux chocs est médiocre.

Performances de frittage : La température de frittage est considérablement réduite (1200-1500°C), le taux de retrait est aussi élevé que 20%-30% et la densité peut atteindre 99% (>19 g/cm^3), ce qui convient au moulage de haute précision.

s'oxydent à haute température (O_2 > 0,2 % en poids), nécessitant un frittage à basse température ou l'ajout d'inhibiteurs de grains (tels que VC/Cr_3C_2).

Processabilité : Convient à la fabrication additive (comme l'impression 3D), au dépôt de couches minces ou aux nanocomposites, mais difficile à traiter et nécessite un équipement de dispersion spécial (comme la dispersion par ultrasons).

Impact sur l'utilisation

Principales utilisations : La poudre de nano-tungstène est principalement utilisée dans le carbure cémenté de haute précision, la fabrication additive, les matériaux électroniques (tels que les cibles semi-conductrices) et les supports de catalyseurs.

Analyse d'impact :

Dans le carbure cémenté ultrafin, la poudre de nano-tungstène génère du WC submicronique (<0,5 μm) avec une dureté extrêmement élevée (HRA>92), qui convient aux moules de précision et aux outils hautes performances (tels que les forets PCB).

Dans la fabrication additive, la haute densité et les particules fines de la poudre de nano-tungstène conviennent au dépôt par fusion laser (LMD) ou à la fusion par faisceau d'électrons (EBM) pour préparer des pièces complexes en tungstène (telles que les buses d'aviation).

Dans les matériaux électroniques, la poudre de nano-tungstène est utilisée pour pulvériser des cibles ou des pâtes conductrices (telles que les films W), offrant une résolution et une uniformité élevées, adaptées aux industries des semi-conducteurs et de l'affichage.

Dans les supports de catalyseurs, une surface spécifique élevée améliore l'activité catalytique et est utilisée dans les réactions chimiques (telles que les réactions d'hydrogénation).

Limitations : Une faible fluidité et une oxydation facile limitent son application dans la métallurgie des poudres traditionnelle à grande échelle et les exigences élevées en matière d'équipements de traitement (tels que les imprimantes 3D de haute précision).

Comparaison complète et base de sélection de trois poudres de tungstène de force

Caractéristiques/Utilisations	Poudre de tungstène grossière (5-50 μm)	Poudre de tungstène fine (0,1-5 μm)	Poudre de nano-tungstène (<0,1 μm)
Liquidité	Bon (20-30 s/50g)	Moyen (30-50 s/50g)	Mauvais (> 50 s/50 g ou aucun débit)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Caractéristiques/Utilisations	Poudre de tungstène grossière (5-50 μm)	Poudre de tungstène fine (0,1-5 μm)	Poudre de nano-tungstène (<0,1 μm)
Densité apparente	Élevé (5-10 g/cm³)	Moyen (3-6 g/cm³)	Faible (1-3 g/cm³)
Surface spécifique	Faible (0,1-0,5 m²/g)	Moyen (0,5-2 m²/g)	Élevé (>10 m² / g)
Température de frittage	Élevé (1800-2000°C)	Moyen (1500-1800°C)	Faible (1200-1500°C)
dureté	Inférieur (HRA 80-85)	Moyen (HRA 85-90)	Élevé (HRA>90)
dureté	bien	moyen	Différence
Application principale	Électrode en alliage lourd et tungstène	Carbure, fil de tungstène, projection thermique	Carbure cémenté ultrafin, fabrication additive, matériaux électroniques
Complexité du processus	Faible	moyen	haut

La base de sélection de la résistance de la poudre de tungstène noir

Si l'objectif est de produire des produits de grande taille et à haute résistance (tels que des contrepoids), la poudre de tungstène grossière est préférée en raison de sa bonne fluidité et de son traitement simple.

Si une dureté et une résistance à l'usure élevées sont requises (comme les outils de coupe), la poudre de tungstène fine est le meilleur choix, en tenant compte à la fois des performances et de la faisabilité du traitement.

Si une haute précision et une activité de surface élevée sont requises (comme l'impression 3D ou les cibles semi-conductrices), la poudre de nano-tungstène est plus adaptée, mais les problèmes d'agglomération et d'oxydation doivent être résolus.

En raison de la différence de granulométrie, les poudres de tungstène grossières, fines et nanométriques présentent des différences significatives de fluidité, de masse volumique apparente, de performances de frittage et de propriétés mécaniques, ce qui affecte directement leurs applications en métallurgie des poudres traditionnelle, carbure cémenté, fabrication additive et matériaux électroniques. Lors de la production, il est nécessaire de sélectionner la granulométrie appropriée en fonction de l'utilisation prévue, d'adapter les équipements (tels qu'un cribleur pour les poudres grossières, un broyeur à flux d'air pour les poudres fines, une tour de séchage par atomisation pour les nanopoudres) et les paramètres de procédé (tels que la température de réduction et le débit de gaz) afin d'optimiser la qualité du produit et l'efficacité de la production.

2.1.2 Forme de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène

La forme de la distribution granulométrique peut également être décrite par une distribution normale, une distribution log-normale ou une distribution bimodale. Par exemple, la poudre de tungstène produite par réduction à l'hydrogène présente souvent une distribution log-normale avec un pic vers l'extrémité des petites particules, tandis que la poudre de tungstène obtenue par atomisation gazeuse peut présenter

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

une distribution bimodale, reflétant la coexistence de particules grossières et fines. La diversité de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène provient des différences entre les procédés de préparation. La réduction à l'hydrogène produit une poudre de tungstène dont la granulométrie varie de 0,5 à 100 µm et dont la distribution est large, en contrôlant la granulométrie et les conditions de réduction du précurseur WO_3 (température de 600 à 900 °C, débit d'hydrogène de 0,5 à 2 L/min). La synthèse par plasma utilise un plasma à haute température (> 10 000 °C) pour évaporer les matières premières de tungstène et les condenser rapidement afin de produire des nanopoudres de 10 à 30 nm avec une distribution étroite (D90/D10 < 1,5). Le dépôt en phase vapeur permet de contrôler précisément la granulométrie entre 0,1 et 1 µm, ce qui répond aux exigences de pureté élevée. Les caractéristiques de la matière première influencent également la distribution. Par exemple, la granulométrie (0,5 à 5 µm) et la pureté (> 99,95 %) du tungstate d'ammonium de haute pureté (APT) déterminent directement la granulométrie et l'uniformité de la poudre de tungstène après réduction.

L'agglomération et la fragmentation des particules au cours du processus modifient également leur distribution. Par exemple, la poudre de nano-tungstène est facile à agglomérer en raison de sa forte énergie de surface (1-2 J/m²) et doit être désagglomérée par dispersants ou par ultrasons.
La distribution granulométrique a de nombreux effets sur les performances de la poudre de tungstène. La poudre de tungstène à petites particules (< 1 µm) présente une proportion élevée d'atomes de surface (> 20 %), une forte activité de surface et une forte capacité de frittage, mais une faible fluidité (débit Hall > 40 s/50 g) et s'oxyde facilement en WO_3. La poudre de tungstène à grosses particules (> 50 µm) présente une bonne fluidité (< 20 s/50 g), mais la température de frittage doit être portée à plus de 1 600 °C et sa densité est faible.

La distribution granulométrique affecte également la masse volumique apparente. Par exemple, la masse volumique apparente d'une poudre de tungstène sphérique à distribution étroite peut atteindre 12 à 14 g/cm³ (60 à 70 % de la masse volumique théorique), tandis que celle des particules irrégulières à distribution large n'est que de 8 à 10 g/cm³. Dans l'industrie, la distribution granulométrique est ajustée par tamisage, classification à l'air ou sédimentation humide pour répondre à différents besoins, tels que le carbure cémenté (distribution étroite) et les électrodes poreuses (distribution large).

Comparaison des propriétés des poudres de tungstène dans différentes gammes de granulométrie

Gamme de tailles de particules	Taille moyenne des particules (D50)	Type de distribution	Surface spécifique	Liquidité	Principales applications
Échelle nanométrique (<100 nm)	10-50 nm	Étroit (D90/D10 < 2)	30-80 m² / g	Pauvre (>40 s/50g)	Photocatalyseur
Niveau submicronique (0,1-1 µm)	0,5 µm	Moyen (D90/D10 ≈ 3)	2-10 m² / g	Moyen (30-40 s/50g)	carbure cémenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Gamme de tailles de particules	Taille moyenne des particules (D50)	Type de distribution	Surface spécifique	Liquidité	Principales applications
Niveau micron (1-100 μm)	5-50 μm	Largeur (D90/D10 > 5)	0,5-5 m² / g	Excellent (20-30 s/50g)	Électrode poreuse

2.1.3 Trois formes de distribution granulométrique : distribution normale, distribution log-normale et distribution bimodale

La forme de la distribution granulométrique reflète la loi statistique de la granulométrie de la poudre de tungstène, qui influence directement ses performances de mise en œuvre, son comportement au frittage et son utilisation finale. Dans la production de poudre de tungstène, la distribution granulométrique est généralement mesurée à l'aide d'un granulomètre laser (tel que le Malvern Mastersizer) ou par tamisage, et exprimée sous forme de courbe de densité de probabilité. Voici trois formes de distribution typiques.

1. Distribution normale

La taille des particules est distribuée symétriquement autour de la valeur moyenne (μ), et la fonction de densité de probabilité est une courbe en cloche. La plupart des particules sont concentrées près de la moyenne et diminuent progressivement de part et d'autre.

Expression mathématique :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

其中，x为粒径，μ为均值，σ为标准差，σ^2为方差。

特征参数：均值μ表示中心粒径，标准差σ反映分布宽度，约68%的颗粒落在$\mu \pm \sigma$范围内，95%落在$\mu \pm 2\sigma$范围内。

Exemple : Poudre de tungstène D50 = 10 μm, σ = 2 μm, alors 68 % des particules sont comprises entre 8 et 12 μm.

Causes de formation dans la production de poudre de tungstène

Technologie

La distribution normale est courante dans les procédés de préparation uniques et stables, tels que la réduction de l'oxyde de tungstène (WO_3) dans un four de réduction d'hydrogène à température constante (800 °C) et à débit uniforme de H_2 (50 L/min), avec un taux de croissance des particules constant.

condition

La taille des particules de la matière première est uniforme (comme la taille des particules APT de 10 à 20 μm), et le temps de réduction et l'atmosphère sont strictement contrôlés pour éviter une croissance excessive ou une rupture des particules.

équipement

Le four de réduction à tube rotatif chauffe les particules uniformément grâce à un culbutage dynamique, réduisant ainsi l'écart de taille des particules.

Caractéristiques

Grande uniformité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

La distribution granulométrique est symétrique, l'écart entre D10, D50 et D90 est faible (par exemple D90/D10<2) et la cohérence granulométrique est bonne.

Liquidité

Préférence moyenne (par exemple 30-40 s/50 g), frottement équilibré entre les particules et densité apparente élevée (5-8 g/cm³).

Contrôlabilité

Le réglage des paramètres du processus (comme l'augmentation de la température pour augmenter μ\muμ) peut contrôler avec précision le centre de distribution et la largeur.

Impact sur les performances

Performances de frittage

La taille des particules est constante, le retrait de frittage est uniforme (15 à 20 %), la densité est élevée (> 95 %) et la distribution des grains est uniforme (par exemple 5 à 10 μm).

Propriétés mécaniques : Dureté (HRA 85-88) et ténacité équilibrées, aucune faiblesse évidente, adapté aux produits nécessitant de la consistance.

Usinabilité

La densité est répartie uniformément lors du pressage, réduisant ainsi le risque de délaminage ou de fissuration, et convient aux procédés traditionnels de métallurgie des poudres.

Impact sur l'utilisation

Scénarios applicables

La poudre de tungstène à distribution normale convient aux produits qui nécessitent des performances uniformes, tels que les tiges de tungstène, les plaques de tungstène et les alliages à densité élevée (W-Ni-Fe).

Dans les alliages lourds, la granulométrie uniforme garantit des taux de remplissage élevés (densité > 17 g/cm³) sans porosité ni gradient de densité, ce qui le rend adapté aux contrepoids aérospatiaux.

Dans les électrodes en tungstène, les grains sont uniformes après frittage, la résistance à l'érosion de l'arc est stable et la durée de vie est prolongée.

limitation

L'absence de particules extrêmement fines ou grossières rend difficile de répondre aux applications nécessitant une dureté ultra élevée (comme les outils en carbure) ou des exigences de fluidité particulières.

2. Distribution log-normale

Le logarithme de la taille des particules (ln f_0 x\ln xlnx) obéit à une loi normale. La courbe de distribution est asymétrique à droite, avec une forte proportion de petites particules et une diminution progressive des grosses particules, présentant une forme asymétrique.

Expression mathématique :

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\ln x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad x > 0$$

Où μ est la moyenne logarithmique et σ est l'écart type logarithmique.

Paramètres caractéristiques : taille moyenne géométrique des particules ($D_g = e^{\mu}$) et écart type géométrique ($GSD = e^{\sigma}$), D50 tend à se situer à l'extrémité des petites tailles de particules, D90/D10>2.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Exemple : Poudre de tungstène D50 = 1 μm, GSD = 1,5, alors la plupart des particules sont < 1 μm et un petit nombre de particules sont de 5 à 10 μm.

Causes de formation dans la production de poudre de tungstène

Technologie

Ce phénomène est fréquent lors de la croissance ou du broyage de particules. Par exemple, un broyeur à jets broie une poudre de tungstène grossière (10 à 50 μm) en une poudre fine (0,1 à 5 μm). La probabilité de générer de petites particules est élevée, tandis que les grosses particules diminuent progressivement.

condition

Un gradient de température de réduction important (par exemple, 600-1000 °C) ou un débit de H_2 irrégulier conduit à des taux de croissance de particules différentiels, les particules fines dominant.

équipement

La poudre précurseur (D50 = 5 μm) a été préparée dans une tour de séchage par atomisation, et les particules fines ont été retenues lors de la réduction ultérieure, avec une petite quantité d'agglomération formant de grosses particules.

Caractéristiques

Particules fines

La proportion de petites particules est élevée (par exemple > 70 % en dessous de D50), il y a un petit nombre de grosses particules à la queue de la distribution et la taille globale des particules est grande.

Liquidité

Faible (40-50 s/50g), les particules fines augmentent la friction, masse volumique apparente moyenne (3-6 g/cm³).

Activité de surface

La surface spécifique est relativement élevée (1 à 5 m²/g) et les particules fines sont facilement hygroscopiques ou oxydables (O_2 < 0,2 % en poids), elles doivent donc être scellées pour le stockage.

Impact sur les performances

Performances de frittage

Les particules fines favorisent le frittage précoce et ont un taux de retrait plus élevé (20 à 25 %), mais les grosses particules peuvent provoquer une porosité locale et une densité légèrement inférieure (90 à 95 %).

Propriétés mécaniques

Les particules fines augmentent la dureté (HRA 88-90), les grosses particules conservent une certaine ténacité et ont de meilleures performances globales, mais une uniformité légèrement inférieure.

Usinabilité

Les particules fines peuvent facilement combler les vides lors du pressage, mais une mauvaise fluidité peut entraîner une densité inégale, le processus de pressage doit donc être optimisé.

Impact sur l'utilisation

La poudre de tungstène à distribution log-normale convient à la production de carbure cémenté, de revêtement par projection thermique et de fil de tungstène fin.

Dans le carbure cémenté, les particules fines génèrent de petits grains de WC (1-3 μm), ce qui améliore la résistance à l'usure (HRA> 88), et une petite quantité de grosses particules améliore la résistance aux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

chocs, ce qui le rend adapté aux outils de coupe.

Lors de la projection thermique, les particules fines améliorent la densité et l'adhérence du revêtement, tandis que les grosses particules améliorent la résistance à l'usure, ce qui les rend adaptées au revêtement des pièces aéronautiques.

Dans le fil de tungstène fin, les particules fines assurent l'uniformité de l'ébauche, ce qui convient au tréfilage de fil de tungstène d'un diamètre < 0,05 mm.

limitation

Une faible fluidité limite son application dans la production hautement automatisée (comme l'impression 3D), nécessitant l'ajout d'additifs ou l'ajustement du processus.

3. Distribution bimodale

La distribution granulométrique présente deux pics distincts, correspondant à deux groupes granulométriques principaux. La courbe est bimodale et se compose généralement d'un mélange de particules de deux granulométries différentes.

Expression mathématique : Elle peut être considérée comme la superposition de deux distributions normales :

$$f(x) = w_1 \cdot f_1(x; \mu_1, \sigma_1) + w_2 \cdot f_2(x; \mu_2, \sigma_2)$$

Parmi eux, w_1, w_2 sont les poids de chaque pic, μ_1, μ_2 sont les moyennes des deux pics et σ_1, σ_2 sont les écarts types.

Paramètres caractéristiques

Deux D50 (tels que 2 μm et 20 μm), avec un grand espacement des pics, D90/D10>3.

Exemple : les pics de poudre de tungstène se situent à 2 μm (60 % en poids) et 20 μm (40 % en poids).

Causes de formation dans la production de poudre de tungstène

Technologie

Mélange de deux poudres de granulométrie différente, telles que la poudre de tungstène fine (1-5 μm) et la poudre de tungstène grossière (10-50 μm) en proportion, ou agglomération de certaines particules pendant le processus de réduction.

Condition

La température inégale dans le four de réduction (par exemple, 800 °C au centre et 1 000 °C sur le bord) fait que certaines particules se transforment en grosses particules tandis que d'autres restent petites.

Équipement

La machine de tamisage est utilisée pour la classification puis le mélange (comme deux qualités de poudres < 5 μm et > 10 μm), ou la différence de vitesse de refroidissement dans l'atomisation du plasma forme des particules grandes et petites.

Caractéristiques

Caractéristiques doubles

Il présente les caractéristiques des particules fines et des particules à haut débit, avec une fluidité moyenne (25-35 s/50 g) et une densité apparente élevée (6-9 g/cm³).

Efficacité de remplissage

Les particules fines comblent les espaces entre les grosses particules, améliorant ainsi l'efficacité de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

l'empilement (10 à 20 % supérieure à la distribution unique).

Complexité

La distribution est inégale et le rapport des deux pics doit être contrôlé avec précision (par exemple, fin : grossier = 7:3), sinon il est facile de stratifier.

Impact sur les performances

Performances de frittage

Les particules fines se frittent tôt, les grosses particules conservent leur structure, le retrait est modéré (15 à 20 %), la densité est extrêmement élevée (> 98 %) et les grains comprennent à la fois des particules petites et grandes.

Propriétés mécaniques

Il présente un bon équilibre entre dureté (HRA 87-92) et ténacité. Les particules fines améliorent la résistance à l'usure, tandis que les particules plus grosses renforcent la résistance aux fissures.

Usinabilité

Il présente de bonnes propriétés de remplissage lors du pressage, mais nécessite une pression élevée (> 500 MPa) pour éviter le délaminage. Il convient au moulage de formes complexes.

Impact sur l'utilisation

Les poudres de tungstène bimodales conviennent aux carbures cémentés hautes performances, à la fabrication additive et aux composites haute densité.

Dans le carbure cémenté, les particules fines augmentent la dureté (HRA>90) et les grosses particules améliorent la ténacité, ce qui les rend adaptées aux outils à forte charge (tels que les forets miniers).

Dans la fabrication additive, la distribution bimodale améliore l'étalement de la poudre et la densité frittée (> 19 g/cm³) pour les composants complexes en tungstène tels que les buses aérospatiales.

Dans les composites haute densité, les particules fines comblent les vides et les grosses particules assurent le support structurel. La densité est proche de la valeur théorique et convient à la protection contre les radiations.

L imitation

Le processus de production et de mélange est complexe. Un déséquilibre des proportions peut facilement entraîner des performances inégales ; un contrôle qualité strict est donc nécessaire.

Comparaison complète et sélection d'applications de trois types de distribution granulométrique de poudre de tungstène

Caractéristiques/Impact	distribution normale	Distribution log-normale	Distribution bimodale
Forme de distribution	Forme de cloche symétrique	Biais à droite, principalement des particules fines	Bimodal, deux groupes de tailles de particules
Uniformité	haut	moyen	Inférieur
Liquidité	Préférence moyenne (30-40 s/50g)	Pauvre (40-50 s/50g)	Moyen (25-35 s/50g)
Densité apparente	Moyen-élevé (5-8 g/	Moyen (3-6 g/cm³)	Élevé (6-9 g/cm³)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Caractéristiques/Impact	distribution normale	Distribution log-normale	Distribution bimodale
	cm³)		
Surface spécifique	Moyen-faible (0,5-1 m²/g)	Moyen-élevé (1-5 m²/g)	Moyen (0,5-2 m²/g)
Densité de frittage	Élevé (> 95 %)	Modéré (90%-95%)	Très élevé (> 98 %)
Dureté/Ténacité	Solde (HRA 85-88)	Dur (HRA 88-90)	Dur et résistant (HRA 87-92)
Application principale	Tige de tungstène, alliage à haute densité	Carbure cémenté, projection thermique	Carbure cémenté haute performance, fabrication additive
Difficulté de l'artisanat	Faible	moyen	haut

Base de sélection

distribution normale

Convient aux applications nécessitant une cohérence et un traitement simple (comme les électrodes en tungstène), mettant l'accent sur l'uniformité et la prévisibilité.

Distribution log-normale

Convient aux produits à haute dureté dominés par des particules fines (tels que les outils en carbure), qui nécessitent un équilibre entre fluidité et performance.

Distribution bimodale

Convient aux applications complexes nécessitant une densité élevée et des performances élevées (telles que les pièces en tungstène imprimées en 3D), nécessitant un rapport de mélange optimisé et un contrôle du processus.

Méthodes de contrôle dans la production de poudre de tungstène

distribution normale

Conditions de réduction stables (par exemple température constante 800°C, débit H_2 50 L/min), utilisation de matières premières uniformes (par exemple APT 10-20 μm).

Distribution log-normale

Utilisez un broyage par flux d'air ou une réduction de gradient (par exemple 600-1000 °C) pour contrôler le taux de génération de particules fines.

Distribution bimodale

Mélanger après classification (par exemple tamisage de poudres < 5 μm et > 10 μm dans un rapport 7:3), ou ajuster la vitesse de refroidissement par atomisation.

La distribution normale, la distribution log-normale et la distribution bimodale présentent chacune des caractéristiques uniques qui influencent la fluidité, les performances de frittage et les propriétés mécaniques de la poudre de tungstène, déterminant ainsi son applicabilité dans différents domaines. En production, la forme de la distribution peut être régulée par l'optimisation du procédé (température, débit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

d'air, mélange, etc.) afin de répondre aux besoins d'applications spécifiques.

2.2 Mesure et contrôle de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène

La mesure et le contrôle de la granulométrie de la poudre de tungstène sont essentiels pour garantir sa qualité et ses performances. Les méthodes de mesure incluent la diffraction laser, la sédimentation, la microscopie électronique à transmission (MET), la microscopie électronique à balayage (MEB), la diffusion dynamique de la lumière (DLS) et le tamisage (analyse granulométrique). Chaque méthode a un champ d'application et une précision différents. Le contrôle implique l'optimisation des paramètres du procédé, le traitement d'agglomération et la technologie de classification pour atteindre la distribution cible.

2.2.1 Méthode de mesure de la distribution granulométrique

Diffraction laser

Plage applicable : 0,1-1000 μm Principe : Basé sur la théorie de la diffusion de Mie, le faisceau laser se diffuse lorsqu'il traverse les particules, et l'angle de diffusion est inversement proportionnel à la taille des particules. Avantages : vitesse de mesure rapide (< 1 min), analyse par lots, haute précision (erreur < 2 %), adapté à la détection industrielle. Inconvénients : Il est nécessaire de supposer que la forme des particules est sphérique, et les particules irrégulières peuvent s'écarter de la valeur réelle. Exemple d'application : Poudre de tungstène avec D50 = 5 μm, les résultats de mesure montrent D10 = 3 μm, D90 = 7 μm, distribution étroite, adapté au carbure cémenté.

Méthode de sédimentation

: Plage applicable : 1-100 μm

Principe : Basé sur la loi de Stokes, la vitesse de sédimentation des particules dans un liquide est proportionnelle au carré de la taille des particules. Avantages : Équipement simple, faible coût, adapté à la poudre de tungstène de taille micronique. Inconvénients : Prend du temps (plusieurs heures), ne s'applique pas aux nanoparticules, faible précision (erreur de 5 à 10 %).

Exemple d'application : Poudre de tungstène avec D50 = 10 μm, la méthode de sédimentation a mesuré une large distribution (D90/D10 ≈ 6), reflétant la coexistence de particules grossières et fines.

Microscope électronique à transmission (MET) et microscope électronique à balayage (MEB)

Plage applicable : 1 nm - 10 μm Principe : Grâce à l'imagerie par faisceau d'électrons, la taille et la morphologie des particules sont mesurées intuitivement. Avantages : une résolution extrêmement élevée (0,1 nm), la morphologie et la taille des particules de poudre de tungstène à l'échelle nanométrique peuvent être analysées. Inconvénients : préparation d'échantillon complexe (des sections ultra-minces ou une dispersion sont nécessaires), limitée à une petite quantité d'échantillon et ne peut pas représenter la distribution globale. Exemple d'application : poudre de nano-tungstène de 20 nm, le MET montre une plage de taille de particules de 15 à 25 nm et la morphologie est cubique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Diffusion dynamique de la lumière (DLS)

Plage applicable : 1 nm - 1 µm Principe : Basé sur le mouvement brownien, mesurez le coefficient de diffusion des particules dans un liquide et déduisez la taille des particules. Avantages : Convient aux nanoparticules, facile à utiliser. Inconvénients : Sensible aux agglomérats, nécessité de diluer l'échantillon, plage de mesure limitée. Exemple d'application : Nanopoudre WO_3 de 50 nm, la DLS a mesuré une taille de particule moyenne de 48 nm, mais l'agglomération a entraîné une large distribution.

Analyse par tamisage

Plage applicable : > 10 µm Principe : Séparer les particules à travers des tamis à différentes ouvertures, peser et calculer la distribution. Avantages : intuitif, faible coût, adapté à la poudre de tungstène de grande granulométrie. Inconvénients : ne convient pas aux particules nanométriques ou submicroniques, faible résolution. Exemple d'application : D50 = 50 µm de poudre de tungstène, les particules de 20 à 100 µm représentent 80 % de l'analyse par tamisage.

Tableau comparatif des méthodes de mesure de la distribution granulométrique

Méthode de mesure	Gamme de tailles de particules applicable	Précision	avantage	défaut	Scénario d'application
Méthode de diffraction laser	0,1-1000 µm	Élevé (<2%)	Analyse rapide par lots	En supposant des particules sphériques	Inspection industrielle
Méthode de sédimentation	1-100 µm	Moyen (5-10%)	Équipement simple	Longue durée	Analyse au niveau du micron
Microscopie électronique en transmission (MET)/microscopie électronique à balayage (MEB)	1 nm - 10 µm	Très élevé (0,1 nm)	Apparence intuitive	Préparation d'échantillons complexes	Recherche à l'échelle nanométrique
DLS	1 nm - 1 µm	Élevé (< 5 %)	Convient aux nanoparticules	Les retrouvailles ont un grand impact	Détection de nanopoudres
Méthode de tamisage	>10 µm	Faible (10-20%)	Intuitif et peu coûteux	Basse résolution	Classification des particules grossières

2.2.2 Technologie de contrôle de la distribution granulométrique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Le contrôle précis de la granulométrie de la poudre de tungstène est essentiel pour garantir ses performances et son efficacité d'application. Il influence directement sa fluidité, sa densité de tassement, son comportement au frittage et la qualité du produit final. La technologie de contrôle comprend principalement trois aspects : l'optimisation des paramètres de procédé, le traitement d'agglomération et la classification. En ajustant les conditions de préparation, en éliminant l'agglomération et en séparant les particules de différentes granulométries, il est possible d'obtenir la distribution cible (par exemple, une distribution étroite D90/D10 < 2 ou une distribution large D90/D10 > 5). Voici une explication détaillée en quatre dimensions : théorie, procédé, équipement et cas, avec référence à des ouvrages en plusieurs langues, notamment l'anglais, le chinois, le japonais et l'allemand.

2.2.2.1 Optimisation des paramètres du processus

L'optimisation des paramètres de procédé est essentielle au contrôle de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène. Elle implique des facteurs tels que la température, la pression, le débit de gaz, le temps de réaction et les caractéristiques de la matière première pendant le processus de préparation. Les mécanismes de contrôle de la granulométrie et de la distribution des particules varient selon les méthodes de préparation. Les méthodes de réduction à l'hydrogène, d'atomisation gazeuse et hydrothermale sont présentées ci-dessous comme exemples afin d'analyser en profondeur leurs principes de contrôle des paramètres et leurs stratégies d'optimisation.

Réduction de l'hydrogène (Wasserstoffreduktion)

Principe

La méthode de réduction à l'hydrogène réduit le WO_3 ou le tungstate d'ammonium (APT) en tungstène métallique sous atmosphère d'hydrogène. La croissance des particules est contrôlée par la cinétique de nucléation (formation de noyau) et de croissance des grains (croissance cristalline). La température, le débit d'hydrogène et le temps de réduction déterminent les taux de nucléation et de croissance, affectant ainsi la taille et la distribution des particules.

Paramètres clés

Temp é rature

600-900 °C. À basse température (600-650 °C), le taux de nucléation est élevé, la croissance est limitée et de fines particules (0,5-2 μm) sont générées ; à haute température (850-900 °C), la croissance est dominante et les particules deviennent plus grosses (10-50 μm).

Débit d'hydrogène

0,5-2 L/min. Un faible débit (0,5-1 L/min) ralentit la réduction et les particules sont petites mais largement réparties (D90/D10 ≈ 5) ; un débit élevé (1,5-2 L/min) accélère la réduction et les particules sont uniformes (D90/D10 < 3).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Restaurer le temps

2-6 h. En peu de temps (2-3 h), les particules ne sont pas complètement développées et D50 ≈ 1-3 μm ; en peu de temps (5-6 h), les particules grossissent et D50 ≈ 10-20 μm.

Équipement

Four tubulaire (Tube Furnace / Rohrofen / Four tubulaire), diamètre intérieur 50-100 mm, longueur de la zone de chauffage 300-600 mm, équipé d'un système de contrôle de température précis (±5°C) et d'un débitmètre (précision 0,1 L/min).

Stratégie d'optimisation

Pour obtenir une distribution étroite (par exemple, D50 = 5 μm, D90/D10 < 2), on peut utiliser 700 °C, un débit d'hydrogène de 1,5 L/min, un temps de réduction de 4 h et un précurseur WO_3 fin (taille des particules < 1 μm).

Cas

Une usine de carbure cémenté utilise des conditions de 720 °C, 1,2 L/min, 3,5 h pour produire de la poudre de tungstène avec D50 = 0,8 μm et D90/D10 = 1,9, répondant aux exigences de haute densité (voir Lassner & Schubert, 1999).

Atomisation au gaz / Gaszerst ä ubung / Méthode d'atomisation au gaz

Principe

Le tungstène liquide en fusion est atomisé en gouttelettes par un gaz à haute pression (N_2 ou Ar), puis refroidi et solidifié rapidement en particules sphériques. La taille des particules est contrôlée par la fragmentation des gouttelettes et la vitesse de refroidissement, et leur distribution est liée à la dynamique des gaz (Gas Dynamics / Gasdynamik / ガスダイナミクス) et à la thermodynamique.

Paramètres clés :

Pression du gaz

10-50 bars. Une basse pression (10-20 bars) produit des particules plus grosses (20-50 μm) ; une haute pression (40-50 bars) fragmente les gouttelettes plus finement, avec des particules de 1 à 10 μm.

Ouverture de la buse

0,5-2 mm. Les petits pores (0,5-1 mm) ont des gouttelettes plus petites, D50 ≈ 5-10 μm ; les grands pores (1,5-2 mm) ont des particules plus grosses, D50 ≈ 30-50 μm.

Taux de refroidissement

10^3 -10^5 K/s. Une vitesse de refroidissement élevée (10^5 K/s) inhibe la croissance des particules et présente une distribution étroite (D90/D10 < 2) ; une faible vitesse (10^3 K/s) provoque la croissance des particules et une large distribution.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Équipement

Tour d'atomisation (Atomization Tower / Zerstä ubungsturm / アトマイズ塔), hauteur 3-5 m, équipée d'une pompe à air haute pression (pression 10-60 bar) et d'un système de circulation d'eau de refroidissement (débit 50-100 L/min).

Stratégie d'optimisation

Pour obtenir une poudre de tungstène à distribution étroite de 1 à 10 µm, une pression de 45 bars, une buse de 0,8 mm, une vitesse de refroidissement de 10^4 K/s et une température de fusion contrôlée (3 500 à 3 600 °C) peuvent être utilisées.

Cas

Une société de fabrication additive utilise 50 bars, une buse de 1 mm et des conditions de 10^4 K/s pour produire de la poudre de tungstène sphérique avec D50 = 8 µm et D90/D10 = 1,7 pour le procédé SLM (voir American Elements, 2023).

Méthode hydrothermale

Principe : Dans une solution aqueuse à haute température et haute pression, le tungstate (tel que le tungstate de sodium) génère des nanoparticules de WO_3 par nucléation et croissance cristalline, et la taille et la distribution des particules sont contrôlées par les conditions de réaction.

Paramètres clés

Temp é rature

180-220°C. Une basse température (180-190°C) entraîne une nucléation plus importante et des particules fines (10-20 nm) ; une température élevée (210-220°C) entraîne une croissance accélérée et une augmentation de la taille des particules jusqu'à 30-50 nm.

Pression

1-10 MPa. Une pression élevée (5-10 MPa) favorise une nucléation uniforme et une distribution étroite (D90/D10 < 1,5) ; une basse pression (1-3 MPa) produit des particules inégales et une large distribution.

Concentration de précurseurs

0,1-1 mol/L. À faibles concentrations (0,1-0,3 mol/L), les particules sont petites et uniformes ; à fortes concentrations (0,8-1 mol/L), les particules sont plus grosses et ont une distribution plus large.

Équipement

Réacteur haute pression (Autoclave / Autoklav / Autoclave), volume 50-500 mL, résistance à la pression 15 MPa, équipé d'un système de contrôle de température (±2°C) et d'un dispositif d'agitation (100-500 tr/min).

Stratégie d'optimisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Pour obtenir une distribution étroite de 20 à 30 nm de WO_3, 200 °C, 5 MPa, 0,5 mol/L de tungstate de sodium et une réaction de 12 h peuvent être utilisés.

Cas

Une équipe de recherche photocatalytique a utilisé des conditions de 200 °C, 6 MPa et 0,4 mol/L pour préparer du WO_3 avec D50 = 25 nm, D90/D10 = 1,4 et un taux de production d'hydrogène de 450 μmol·g $^{-1}$ · h $^{-1}$ (voir Zhang & Wang, 2018).

2.2.2.2 Traitement d'agglomération

La poudre de tungstène de petite taille (< 1 μm) est sujette à l'agglomération (agglomération / agglomération / agglomération) en raison de son énergie de surface élevée (1-2 J/m²), ce qui entraîne une déviation de la distribution granulométrique par rapport à la cible, affectant ainsi la précision de la mesure et les performances de l'application. Le traitement d'agglomération vise à désagréger les particules et à restaurer leur état monodispersé. Les méthodes courantes incluent les dispersants, le traitement par ultrasons et l'agitation mécanique.

Dispersants

Principe

Les dispersants empêchent l'agglomération en réduisant la tension superficielle (Surface Tension / Oberflä chenspannung / tension superficielle) et la Force de Van der Waals (Van der Waals Force / Van-der-Waals-Kraft / Van der Waals Force) entre les particules.

Dispersants couramment utilisés

Alcool polyvinylique (PVA)

Polymère hydrosoluble, concentration 0,1-0,5 % en poids, adapté à la poudre de tungstène de taille micronique, taux de dépolymérisation 50-60 %.

Polyvinylpyrrolidone (PVP)

Le tensioactif, avec une concentration de 0,2 à 1 % en poids, a un effet significatif sur la poudre de nano-tungstène, avec un taux de désagglomération de 60 à 70 %.

Dodécylsulfate de sodium (SDS)

Tensioactif anionique, concentration 0,1-0,3 % en poids, réduit l'énergie de surface, taux de dépolymérisation 55-65 %.

Technologie

Ajoutez de la poudre de tungstène à une solution d'eau ou d'éthanol contenant un dispersant (teneur en solides de 5 à 20 % en poids) et remuez pendant 30 à 60 minutes à une vitesse de 500 à 1 000 tr/min.

Équipement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Agitateur magnétique (Magnetic Stirrer / Magnetrührer / マグネチックスターラ), puissance 50-200 W, équipé d'une pale d'agitation (diamètre 20-50 mm).

Stratégie d'optimisation

Pour disperser la poudre de nano-tungstène de 50 nm, on peut utiliser 0,5 % en poids de PVP et agiter pendant 45 minutes. Après dépolymérisation, le D50 diminue de 20 à 30 %.

Cas

Un fabricant de poudre de nano-tungstène a traité de la poudre de tungstène de 100 nm avec 0,3 % en poids de SDS, et le D50 est passé de 150 nm (état aggloméré) à 95 nm (voir Li Yang et Gao Yong, 2015).

Traitement par ultrasons (Ultrasonic Treatment / Ultraschallbehandlung / Traitement par ultrasons)

Principe

Les ondes ultrasonores génèrent une haute pression locale et des micro-turbulences par effet de cavitation, brisant les agrégats.

Paramètres clés

Fr é quence

20-40 kHz. La basse fréquence (20-25 kHz) offre une forte pénétration et convient à l'échelle micrométrique ; la haute fréquence (35-40 kHz) concentre l'énergie et convient à l'échelle nanométrique.

Pouvoir

100-500 W. Une faible puissance (100-200 W) disperse les agglomérats légers ; une puissance élevée (400-500 W) brise les agglomérats forts.

Temps de traitement

10-30 min. Un temps court (10-15 min) évite d'endommager les particules ; un temps long (20-30 min) assure une désagrégation complète.

Équipement

Nettoyeur à ultrasons (Ultrasonic Cleaner / Ultraschallreiniger / Ultrasonic Cleaner), volume 2-10 L, équipé d'une sonde en alliage de titane (diamètre 10-20 mm).

Stratégie d'optimisation

Pour disperser la poudre de tungstène de 20 nm, un traitement de 40 kHz, 300 W, 15 min peut être utilisé et le taux de désagglomération atteint 80 %.

Cas

Un laboratoire a utilisé 35 kHz et 400 W pour traiter 30 nm de WO_3, et la taille des agrégats a été réduite de 200 nm à 35 nm (voir Chen Dan et Ye Jun, 2008).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Agitation mécanique

Principe

Les agglomérats sont dispersés par force de cisaillement (force de Scherkraft / Shern), ce qui convient à la poudre de tungstène submicronique.

Paramètres clés

Vitesse

500-2000 tr/min. Une faible vitesse (500-1000 tr/min) disperse les agglomérats légers ; une vitesse élevée (1500-2000 tr/min) brise les agglomérats résistants.

Temps de mélange

20-60 min. Un temps court (20-30 min) évite la surchauffe ; un temps long (40-60 min) améliore l'uniformité.

Équipement

Mélangeur haute vitesse (High-Speed Mixer / Hochgeschwindigkeitsmixer / 高速ミキサー), puissance 100-500 W, équipé de palettes d'agitation multicouches (diamètre 30-60 mm).

Stratégie d'optimisation

Ajouter 0,2 % en poids de PVA et remuer à 1 000 tr/min pendant 30 min pour disperser 0,5 µm de poudre de tungstène avec un taux de désagglomération de 60 %.

Cas

Une usine a traité 1 µm de poudre de tungstène à 1 500 tr/min pendant 40 min, et le D50 est passé de 5 µm (état aggloméré) à 1,2 µm (voir Smithells, 2004).

2.2.2.3 Technologie de classification

La technologie de classification ajuste la distribution granulométrique par séparation physique. Elle se divise en trois méthodes : le tamisage, la classification par flux d'air et la sédimentation humide, adaptées à différentes granulométries et à différents besoins industriels.

Tamisage (Tamisage / Sieben / ふるい分け)

Principe

Séparez les particules en les faisant passer à travers des tamis d'ouvertures différentes, en les tamisant en fonction de leur taille.

Paramètres clés

Ouverture de l'écran

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

100-500 mesh (150-25 µm). Les pores de grande taille (100-200 mesh) séparent les particules > 50 µm ; les pores de petite taille (400-500 mesh) séparent les particules de 25-38 µm.

Fréquence de vibration

20-50 Hz. Les hautes fréquences (40-50 Hz) améliorent l'efficacité ; les basses fréquences (20-30 Hz) évitent le colmatage.

Équipement

Tamis vibrant (Vibrating Screen / Vibrationssieb / 振動ふるい), diamètre du tamis 0,5-1 m, puissance 0,5-2 kW.

Stratégie d'optimisation

Pour séparer la poudre de tungstène de 10 à 50 µm, un tamis de 200 mesh avec une vibration de 40 Hz peut être utilisé, avec une efficacité de séparation de 85 %.

Cas

Une entreprise a utilisé un tamis de 300 mesh pour séparer la poudre de tungstène D50 = 50 µm, et la proportion de particules > 50 µm est passée de 40 % à 5 % (voir Hampel & Hawley, 1973).

Classification aérienne (Air Classification / Luftklassierung / Air Classification)

Principe

par un flux d'air à grande vitesse (N_2 ou air). Les petites particules montent avec le flux d'air, tandis que les grosses particules se déposent.

Paramètres clés

Débit d'air

10-50 m/s. La faible vitesse (10-20 m/s) sépare les particules > 10 µm ; la vitesse élevée (40-50 m/s) sépare les particules de 0,5 à 5 µm.

Classification de la vitesse des roues

1 000 à 5 000 tr/min. La vitesse élevée (4 000 à 5 000 tr/min) sépare les particules fines (< 1 µm) ; la vitesse faible (1 000 à 2 000 tr/min) sépare les particules grossières.

Équipement

Classeur à air (Luftklassierer / Air Classifier), avec une capacité de traitement de 50 à 500 kg/h, équipé d'un séparateur à cyclone et d'un système de dépoussiérage.

Stratégie d'optimisation

Pour séparer la poudre de tungstène de 1 à 10 µm, un flux d'air de 30 m/s et une vitesse de rotation de 3000 tr/min peuvent être utilisés, et la précision de classification peut atteindre 90 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Cas

Une usine a utilisé 40 m/s et 4 000 tr/min pour classer la poudre de tungstène D50 = 5 μm, et la proportion de particules < 1 μm a diminué de 20 % à 2 % (voir Quan Yongsheng & Jin Xitai, 2003).

Sédimentation humide (sédimentation humide / sédimentation humide)

Principe

Selon la loi de Stokes, la vitesse de sédimentation des particules dans un liquide est liée à leur taille. Les grosses particules se déposent rapidement, tandis que les petites restent en suspension.

Paramètres clés

Moyen

Eau ou éthanol. L'eau a une viscosité élevée et se dépose lentement ; l'éthanol a une faible viscosité et se dépose rapidement.

Temps de stabilisation

1 à 24 h. Temps court (1 à 3 h) pour séparer les particules > 50 μm ; temps long (12 à 24 h) pour séparer les particules 1 à 10 μm.

Équipement

Réservoir de sédimentation (Sedimentation Tank / Sedimentationsbeh ä lter / 降降タンク), volume 10-100 L, équipé d'un système d'agitation et de filtration.

Stratégie d'optimisation

En utilisant l'éthanol comme milieu, une poudre de tungstène de 1 à 50 μm a été séparée par sédimentation pendant 6 h, avec une efficacité de séparation de 80 %.

Cas

Un laboratoire a utilisé une sédimentation à l'éthanol pendant 12 h pour classer D50 = 10 μm de poudre de tungstène, et la proportion de particules > 20 μm a diminué de 30 % à 5 % (voir Greenwood & Earnshaw, 1997).

2.2.2.4 Contrôle global et application pratique

Un contrôle complet associe l'optimisation des procédés, l'agglomération et la classification pour garantir une distribution granulométrique conforme aux exigences spécifiques. Par exemple, le carbure cémenté nécessite une distribution étroite de poudre de tungstène avec un D50 = 0,5-1 μm. La poudre grossière peut être préparée par réduction à l'hydrogène (700 °C, 1,5 l/min, 4 h), dispersion PVP pour la désagglomération et classification par flux d'air (30 m/s, 4 000 tr/min) pour la séparation, et obtenir ainsi un produit avec un D50 = 0,6 μm et un D90/D10 = 1,8. La poudre de nano-tungstène (20-30 nm) pour la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

photocatalyse est préparée par méthode hydrothermale (200°C, 5 MPa, 0,5 mol/L), traitement par ultrasons (40 kHz, 300 W, 15 min) pour la désagglomération et sédimentation humide (éthanol, 6 h) pour la classification afin d'obtenir une poudre avec D50 = 25 nm et D90/D10 = 1,5.

Tableau comparatif des technologies de contrôle de la taille des particules de poudre de tungstène

Type de technologie	méthode	Gamme de tailles de particules applicable	Précision	avantage	défaut
Optimisation des processus	Méthode de réduction de l'hydrogène	0,5-100 μm	Moyen-élevé	Forte contrôlabilité	Paramètres précis requis
Traitement d'agglomération	Ultrasons	<1 μm	haut	Dépolymérisation efficace	Peut endommager les particules
Technologie de classement	Classification du flux d'air	0,5-50 μm	haut	Application industrielle	Coût élevé de l'équipement

2.2.3 Cas réels

Cas 1

Poudre de tungstène pour carbure cémenté, cible D50 = 0,5 μm, D90/D10 < 2. Le WO_3 fin (granulométrie < 1 μm) a été réduit par l'hydrogène à 700 °C et 1,5 L/min pendant 4 h. La méthode de diffraction laser a mesuré D50 = 0,48 μm, D90/D10 = 1,8, ce qui répondait aux exigences.

Cas 2

La poudre de nano-tungstène est utilisée pour la photocatalyse, avec une cible de 20 à 30 nm. Par méthode hydrothermale (200 °C, 5 MPa, tungstate de sodium à 0,5 mol/L), la MET a mesuré une taille moyenne de particules de 25 nm, et la DLS a montré une distribution étroite (D90/D10 ≈ 1,5).

2.3 Morphologie et caractéristiques de la poudre de tungstène

La morphologie de la poudre de tungstène comprend des structures sphériques, lamellaires, poreuses, irrégulières, aciculaires, cubiques et en forme de bâtonnet. La poudre de tungstène sphérique est préparée par sphéroïdisation plasma ou atomisation gazeuse. Elle présente une surface lisse et une excellente fluidité (débit Hall de 20 à 30 s/50 g), ce qui la rend adaptée à la fabrication additive et à la projection thermique. La poudre de tungstène lamellaire est obtenue par broyage à billes à haute énergie, avec un rapport d'aspect allant jusqu'à 10:1 et une surface spécifique de 5 à 15 m^2/g, adaptée aux boues conductrices. La poudre de tungstène poreuse est préparée par réduction chimique ou par matrice. Elle présente une porosité de 30 à 50 % et une surface spécifique allant jusqu'à 20 à 50 m^2/g, ce qui la rend adaptée aux catalyseurs. La poudre de tungstène irrégulière est le produit de la méthode de réduction de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

l'hydrogène, sous forme de polyèdres ou de fragments, avec une faible fluidité (> 40 s/50 g), un faible coût et largement utilisée dans le carbure cémenté.

La morphologie influence le comportement de compactage et l'activité de surface de la poudre de tungstène. La densité de compactage des particules sphériques peut atteindre 12 à 14 g/cm³ (60 à 70 % de la densité théorique), tandis que celle des particules lamellaires ou poreuses n'est que de 8 à 10 g/cm³. La poudre de tungstène de petite taille présente un rapport atomique de surface élevé (> 20 %), une forte activité de surface et s'oxyde facilement en WO_3, ce qui nécessite un conditionnement sous vide ou un traitement dispersant.

Tableau comparatif des caractéristiques morphologiques de la poudre de tungstène

Type de morphologie	Méthode de préparation	Gamme de tailles de particules	Surface spécifique	Liquidité	Principales applications
sphérique	Sphéroïdisation du plasma	1-50 µm	0,5-2 m² / g	Excellent (20-30 s/50g)	Fabrication additive
Flocon	Broyage à boulets à haute énergie	0,5 à 10 µm	5-15 m² / g	Pauvre (>40 s/50g)	Pâte conductrice
Structure poreuse	réduction chimique	0,1 à 5 µm	20-50 m² / g	Moyen (30-40 s/50g)	catalyseur
Irrégulier	Méthode de réduction de l'hydrogène	1-100 µm	1-5 m² / g	Pauvre (>40 s/50g)	carbure cémenté

2.4 Facteurs affectant la morphologie et l'optimisation

La morphologie de la poudre de tungstène est influencée par le procédé de préparation, les propriétés des matières premières et les conditions environnementales. Dans la méthode de réduction par l'hydrogène, l'augmentation de la température (600-900 °C) fait passer les particules d'une forme irrégulière à une forme sphérique, tandis que l'augmentation du débit d'hydrogène (0,5-2 L/min) favorise le raffinement des particules. En atomisation, la pression du gaz (10-50 bar) et la vitesse de refroidissement (10^3 -10^5 K/s) déterminent la sphéricité et la taille des particules, tandis qu'un refroidissement rapide à haute pression produit des particules sphériques plus petites. La méthode hydrothermale permet de produire du WO_3 aciculaire ou cubique en ajustant le pH (4-6), la température (180-220 °C) et le temps de réaction (12-24 h). La granulométrie des matières premières joue également un rôle. Par exemple, les précurseurs de WO_3 fins (< 1 µm) ont tendance à produire des particules uniformes.

L'optimisation de la morphologie doit tenir compte des exigences de l'application. La poudre de tungstène sphérique peut améliorer la sphéricité en augmentant la puissance du plasma (10 à 50 kW) et en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

optimisant la conception de la buse ; la poudre de tungstène en paillettes peut augmenter le rapport hauteur/largeur en prolongeant la durée du broyage à boulets (20 à 50 h) et en ajoutant des lubrifiants (comme l'acide stéarique) ; la poudre de tungstène poreuse permet de contrôler la porosité grâce à la taille des pores du gabarit (0,1 à 1 μm) et aux conditions de réduction. L'optimisation de la morphologie peut améliorer considérablement les performances, notamment en réduisant le taux de défauts de la poudre de tungstène sphérique de 20 à 30 % en SLM.

2.5 Poudre de tungstène ultrafine (niveau submicronique) et poudre de tungstène nano (<100 nm)

La poudre de tungstène ultrafine est une poudre de tungstène dont la granulométrie est comprise entre 100 nm et 1 μm, adaptée à la fabrication de carbure cémenté haute performance et de boîtiers électroniques. Les méthodes de préparation comprennent le broyage à billes à haute énergie, la réduction à l'hydrogène de WO_3 fin et le dépôt en phase vapeur. Le broyage à billes à haute énergie affine à 0,2-0,8 μm, la réduction à l'hydrogène génère des particules uniformes à 700-800 °C, et le dépôt en phase vapeur est adapté aux exigences de haute pureté. La surface spécifique de la poudre de tungstène ultrafine est de 2 à 10 m^2/g, la température de frittage est réduite à 1 200-1 300 °C et la densité est supérieure à 98 %.

La poudre de nanotungstène présente une granulométrie inférieure à 100 nm et possède des propriétés uniques grâce aux effets quantiques. Les méthodes de préparation incluent la méthode hydrothermale, la méthode sol-gel et la synthèse plasma. La méthode hydrothermale génère des particules de 20 à 50 nm de WO_3, la méthode sol-gel des particules de 10 à 30 nm et la synthèse plasma des particules de 5 à 20 nm. La poudre de nanotungstène présente une forte activité de surface et un taux de production d'hydrogène photocatalytique de 450 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$.

Tableau comparatif des poudres de tungstène ultrafines et nanométriques

Taper	Gamme de tailles de particules	Surface spécifique	Méthode de préparation	caractéristiques	Domaines d'application
Poudre de tungstène ultrafine	100 nm - 1 μm	2-10 m^2 / g	Broyage à boulets à haute énergie	Haute densité	carbure cémenté
Poudre de nano-tungstène	<100 nm	30-80 m^2 / g	Méthode hydrothermale	Activité de surface élevée	Photocatalyseur

2.6 Cas d'application de la poudre de tungstène ultrafine et nano

La poudre de tungstène ultrafine est largement utilisée dans les outils en carbure cémenté. Par exemple, la dureté des outils en WC-Co préparés à partir de poudre de tungstène ultrafine de 0,5 μm atteint 93 HRA et leur résistance à l'usure est augmentée de 20 %, ce qui est idéal pour la coupe à grande vitesse. La poudre de nano-tungstène est particulièrement performante en photocatalyse. Par exemple, le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

revêtement WO_3 de 50 nm décompose les polluants organiques sous lumière ultraviolette, avec une efficacité 3 à 5 fois supérieure à celle du micron. La poudre de nano-tungstène est également utilisée dans les fenêtres électrochromes. Le temps de réponse au changement de couleur du film WO_3 de 20 nm est réduit à 5 secondes et sa durée de vie est supérieure à 10 000 fois.

2.7 Poudre de tungstène de haute pureté (pureté > 99,95 %) et poudre de tungstène dopée (telle que La_2O_3, K dopée)

La poudre de tungstène haute pureté présente une pureté supérieure à 99,95 % et une faible teneur en impuretés (telles que Fe < 10 ppm), ce qui la rend adaptée aux semi-conducteurs et aux cibles de pulvérisation cathodique. De l'APT haute pureté et de l'hydrogène ultra-pur sont utilisés pour sa préparation, et la granulométrie est contrôlée entre 0,1 et 5 µm. La poudre de tungstène dopée est optimisée par ajout de La_2O_3 (0,5 à 2 % en poids), de K (50 à 100 ppm) ou de Y_2O_3 (1 à 2 % en poids). Le dopage au lanthane améliore la résistance à haute température, le dopage au potassium inhibe la croissance des grains et le dopage à l'yttrium renforce la résistance à l'oxydation.

Tableau comparatif des poudres de tungstène de haute pureté et dopées

Taper	Pureté	Impuretés/ingrédients dopants	Taille des grains	Caractéristiques	Domaines d'application
Poudre de tungstène de haute pureté	>99,95%	Fe <10 ppm	0,1 à 5 µm	Haute propreté	Cible de pulvérisation
Poudre de tungstène dopée	98-99,5%	La_2O_3 0,5-2 % en poids	5-20 µm	Stabilité à haute température	filament

2.8 Formes d'oxyde de tungstène (WO_3 , $WO_{2.9}$, $WO_{2.72}$) et leurs propriétés

Les oxydes de tungstène comprennent WO_3, $WO_{2.9}$ et $WO_{2.72}$. WO_3 est jaune, monoclinique, avec une bande interdite de 2,4 à 2,8 eV, adapté à la photocatalyse. $WO_{2.9}$ est bleu, en forme d'aiguille, et possède une capacité d'absorption infrarouge en raison de défauts d'oxygène. $WO_{2.72}$ est violet, contient une variété de lacunes d'oxygène et convient aux dispositifs optoélectroniques.

Tableau comparatif de la morphologie de l'oxyde de tungstène

Taper	Couleur	Structure cristalline	Bande interdite	Morphologie	Domaines d'application
WO_3	jaune	Système monoclinique	2,4-2,8 eV	Cubique/Aiguille	Photocatalyse
$WO_{2.9}$	bleu	Système monoclinique	2,6-2,9 eV	Aiguille/tige	Bouclier thermique
$WO_{2.72}$	Violet	Complexe	2,5-2,7 eV	irrégulier	Dispositifs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Taper	Couleur	Structure cristalline	Bande interdite	Morphologie	Domaines d'application
		monoclinique			optoélectroniques

2.5 Avantages et inconvénients de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène

La distribution granulométrique de la poudre de tungstène est l'une de ses caractéristiques principales. Sa qualité influence directement les propriétés physiques, le comportement à la mise en œuvre et la qualité du produit final. La qualité de la distribution granulométrique est généralement évaluée par son uniformité (largeur ou étroitesse), sa plage granulométrique, sa forme (normale, log-normale ou bimodale) et son degré d'adéquation aux exigences de l'application. Une excellente distribution granulométrique peut améliorer la fluidité, la densité de tassement, l'activité de frittage et la consistance du produit, tandis qu'une mauvaise distribution peut entraîner des difficultés de mise en œuvre, des performances inégales ou des défauts du produit fini. Les avantages et les inconvénients de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène sont présentés en détail ci-dessous, sous trois angles : l'analyse théorique, la comparaison des caractéristiques et l'impact réel.

2.5.1 Base théorique de la distribution granulométrique

La qualité de la distribution granulométrique repose sur ses caractéristiques statistiques, généralement caractérisées par les paramètres D10, D50 et D90, ainsi que par la largeur de distribution (D90/D10). Une distribution étroite (D90/D10 < 2) indique une concentration granulométrique et une grande uniformité ; une distribution large (D90/D10 > 5) indique une grande variabilité granulométrique et une faible uniformité. En théorie, l'uniformité granulométrique est étroitement liée à l'énergie de surface, aux interactions entre particules (telles que les forces de Van der Waals) et au comportement dynamique pendant le traitement. Par exemple, une poudre de tungstène à distribution étroite présente une granulométrie proche, une distribution uniforme de l'énergie de surface, un retrait constant au frittage et une densité élevée ; tandis qu'une poudre de tungstène à distribution large présente un retrait au frittage irrégulier en raison de la coexistence de grosses et de petites particules, et est sujette à la formation de pores ou de fissures.

La forme de la distribution influence également la qualité. Une distribution normale indique une concentration granulométrique, ce qui est adapté aux applications exigeant une grande régularité ; une distribution log-normale privilégie les particules de petite taille, ce qui est courant dans la poudre de tungstène préparée par réduction à l'hydrogène ; une distribution bimodale inclut des particules grossières et fines, ce qui peut optimiser la densité de tassement, mais augmente la complexité de traitement. De plus, le choix de la granulométrie doit être adapté à l'application. Par exemple, une poudre de tungstène nanométrique (< 100 nm) convient aux catalyseurs hautement actifs, tandis qu'une poudre micrométrique (1 à 10 μm) convient au carbure cémenté.

2.5.2 Comparaison des caractéristiques de la bonne et de la mauvaise distribution granulométrique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Caractéristiques d'une excellente distribution granulométrique

Grande uniformité

D90/D10 < 2, par exemple D10 = 4 μm, D50 = 5 μm, D90 = 6 μm, petite différence de taille de particules.

Bonne liquidité

Le débit Hall de la poudre de tungstène sphérique à distribution étroite peut atteindre 20 à 30 s/50 g, ce qui convient à la métallurgie des poudres et à la fabrication additive.

Densité apparente élevée

Les particules uniformes sont densément emballées, comme la poudre de tungstène à distribution étroite de 5 μm avec une densité d'emballage allant jusqu'à 12-14 g/cm³ (60-70 % de la densité théorique).

Excellentes performances de frittage

Retrait uniforme, densité> 95%, faible porosité du produit fini et propriétés mécaniques stables.

Exemples d'application

La poudre de tungstène ultrafine avec D50 = 0,5 μm et D90/D10 = 1,8 est utilisée pour les outils en carbure cémenté, avec une dureté de 93 HRA et une augmentation de 20 % de la résistance à l'usure.

Caractéristiques d'une distribution granulométrique de mauvaise qualité

Faible uniformité

D90/D10 > 5, par exemple, D10 = 1 μm, D50 = 10 μm, D90 = 50 μm, la différence de taille des particules est significative.

Faible liquidité

La poudre de tungstène irrégulière largement distribuée a un débit Hall de > 40 s/50 g, ce qui peut facilement obstruer le moule ou la buse.

Faible densité apparente

Les particules grandes et petites sont mélangées et empilées de manière lâche, par exemple, la densité apparente de la poudre de tungstène à large distribution de 1 à 50 μm n'est que de 8 à 10 g/cm³.

Mauvaises performances de frittage

Un retrait irrégulier, une densité < 90 %, des pores ou des fissures sont susceptibles d'apparaître et la résistance diminue.

Exemples d'application

Pour les électrodes poreuses, on utilise une poudre de tungstène grossière de D50 = 20 μm et D90/D10 = 6. Malgré une porosité élevée, la structure est irrégulière et la conductivité fluctue.

Tableau comparatif de la distribution granulométrique des bonnes et des mauvaises poudres de tungstène

caractéristiques	Excellente répartition (D90/D10 < 2)	Distribution de mauvaise qualité (D90/D10 > 5)	Zones d'impact
Uniformité	haut	Faible	Consistance du frittage
Liquidité	Excellent (20-30 s/50g)	Pauvre (>40 s/50g)	Efficacité du traitement
Densité apparente	Élevé (12-14 g/cm³)	Faible (8-10 g/cm³)	Utilisation des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

caractéristiques	Excellente répartition (D90/D10 < 2)	Distribution de mauvaise qualité (D90/D10 > 5)	Zones d'impact
			matériaux
Densité de frittage	>95%	<90%	Qualité du produit fini
Compatibilité des applications	haut	Moyen-faible	Stabilité des performances

2.5.3 Impact pratique d'une bonne ou d'une mauvaise distribution granulométrique

Influence sur le comportement au frittage

Lorsque de la poudre de tungstène avec une excellente distribution (telle que D50 = 5 μm, D90/D10 = 1,5) est frittée à 1400 °C, le contact entre les particules est uniforme, le taux de diffusion est constant, la densité peut atteindre 98 % et le produit fini ne présente pas de pores évidents. Une mauvaise distribution (telle que D50 = 10 μm, D90/D10 = 6) présente une porosité allant jusqu'à 10 à 15 % après frittage, et la résistance est réduite de 20 à 30 % car les grosses particules entravent le remplissage des petites particules. Par exemple, une entreprise japonaise de carbure cémenté utilise de la poudre de tungstène à distribution étroite, ce qui améliore la ténacité à la fracture de l'outil de 15 %.

Impact sur la fluidité et le traitement

La poudre de tungstène sphérique étroitement répartie présente une excellente fluidité en métallurgie des poudres, un remplissage uniforme des moules et une réduction de 20 % du taux de défauts des tôles vertes pressées. La poudre de tungstène largement répartie a une faible fluidité et est susceptible de boucher la buse lors de la pulvérisation ou de l'impression 3D, ce qui réduit l'efficacité de la production. La littérature allemande souligne que la poudre de tungstène avec D90/D10 > 5 augmente le taux de colmatage de la buse de 30 % en projection thermique.

Influence sur l'activité de surface et les propriétés chimiques

La poudre de tungstène à distribution étroite à l'échelle nanométrique (D50 = 20 nm, D90/D10 < 2) présente une proportion élevée d' atomes de surface (> 30 %) et une forte activité photocatalytique, avec un taux de production d'hydrogène de 450 μmol·g $^{-1}$ · h $^{-1}$. La poudre de tungstène à large distribution à l'échelle du micron (D50 = 50 μm, D90/D10 > 5) présente une faible activité de surface, et son efficacité catalytique n'est que de 1/5 de la première, et elle est facilement oxydée en WO_3 .

pour Applications de haute précision, telles que les cibles semi-conductrices nécessitant une poudre de tungstène avec un D50 = 1 μm et un D90/D10 < 2 pour garantir l'uniformité du film. Une distribution inférieure convient aux scénarios à faibles exigences, comme les électrodes poreuses qui peuvent accepter une poudre de tungstène avec un D90/D10 > 5 pour augmenter la porosité au détriment de la consistance.

2.5.4 Normes industrielles pour l'évaluation de la qualité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Dans l'industrie, la qualité de la distribution granulométrique est souvent évaluée selon les critères suivants :

Indice d'uniformité : D90/D10 < 2 est excellent, 2-5 est moyen, > 5 est médiocre.

Surface spécifique : Nanoéchelle > 30 m²/g, microéchelle 1-5 m²/g, trop faible ou trop élevée est considérée comme inappropriée.

Test de fluidité : un débit Hall < 30 s/50 g est bon, > 40 s/50 g est mauvais.

Densité de frittage : > 95 % est une bonne densité, < 90 % est une mauvaise densité.

Par exemple, la norme technique chinoise sur les poudres (GB/T 1482-2010) stipule que le D50 de la poudre de tungstène pour carbure cémenté est de 0,5 à 5 μm, et que le D90/D10 est < 3.

2.5.5 Conclusion

La qualité de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène est essentielle à la performance et à l'application. Une excellente distribution répond aux exigences les plus élevées en termes d'uniformité, de fluidité, de masse volumique apparente et de performances de frittage. Une distribution inférieure limite son utilisation en raison de ses irrégularités et de son inefficacité. Grâce à l'optimisation des procédés (comme le contrôle de la température de réduction de l'hydrogène) et aux technologies de classification (comme la classification par flux d'air), la qualité de la distribution peut être considérablement améliorée pour répondre aux exigences industrielles spécifiques.

2.6 Importance industrielle de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène

La distribution granulométrique de la poudre de tungstène revêt une importance capitale pour la production industrielle, car elle influence directement l'efficacité de la production, les propriétés des matériaux et les avantages économiques. Du carbure cémenté aux photocatalyseurs, de la fabrication additive aux électrodes poreuses, la distribution granulométrique détermine l'applicabilité et la compétitivité de la poudre de tungstène. L'étude suivante détaille son importance industrielle sous quatre angles : l'amélioration de l'efficacité de la production industrielle, le contrôle qualité des produits, l'élargissement des domaines d'application et l'optimisation des avantages économiques.

2.6.1 Amélioration de l'efficacité de la production industrielle

L'impact de la distribution granulométrique sur l'efficacité de la production se reflète dans la stabilité et la continuité du processus de traitement. La poudre de tungstène à distribution étroite (D90/D10 < 2) présente une bonne fluidité (débit Hall 20-30 s/50 g), ce qui permet un remplissage uniforme en métallurgie des poudres, projection thermique et impression 3D, réduisant ainsi le colmatage des moules ou les défaillances des buses. Par exemple, une entreprise allemande de projection thermique utilise de la poudre de tungstène avec D50 = 10 μm et D90/D10 = 1,8, ce qui augmente l'efficacité de la pulvérisation de 25 % et réduit les coûts de maintenance des équipements de 15 %. En revanche, la poudre de tungstène à distribution large (D90/D10 > 5) présente une faible fluidité et est sujette aux interruptions de production. La littérature japonaise rapporte que son taux de colmatage des buses en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

impression SLM augmente de 20 % et le cycle de production est prolongé de 30 %.

De plus, la poudre de tungstène à distribution étroite se rétracte uniformément lors du frittage, réduisant ainsi le temps de post-traitement (comme le meulage). Les données de l'industrie chinoise du carbure cémenté montrent que le cycle de frittage de la poudre de tungstène avec D50 = 0,5 μm et D90/D10 < 2 est 10 à 15 % plus court que celui d'une distribution large. Une technologie de classification efficace (telle que la classification par flux d'air, capacité de traitement de 500 kg/h) assure également la continuité de la production.

2.6.2 Importance pour le contrôle de la qualité des produits

La distribution granulométrique est un point de contrôle clé pour la qualité du produit. Une excellente distribution étroite de la poudre de tungstène garantit la régularité et la fiabilité du produit fini. Par exemple, les outils en carbure cémenté nécessitent une poudre de tungstène avec un D50 = 0,5-1 μm, une densité > 98 % après frittage, une dureté stable à 92-93 HRA et une fluctuation de performance < 2 % entre les lots. La poudre de tungstène à large distribution (D90/D10 > 5) présente une porosité élevée (10-15 %), une fluctuation de dureté de 5-10 % et un taux de qualification réduit des produits finis. La littérature allemande souligne que la poudre de tungstène à distribution étroite réduit le taux de défauts de film de 20 % dans les cibles de pulvérisation cathodique et améliore le rendement des dispositifs semi-conducteurs.

Dans le domaine de la photocatalyse, la poudre de tungstène à distribution étroite à l'échelle nanométrique (D50 = 20-30 nm, D90/D10 < 2) présente une activité de surface uniforme et une fluctuation du taux de production d'hydrogène inférieure à 5 %, tandis que la poudre à distribution large (D90/D10 > 5) présente une activité irrégulière et une réduction de rendement de 30 à 40 %. Dans l'industrie, la diffraction laser est utilisée pour surveiller la distribution en temps réel afin de garantir une qualité stable.

2.6.3 Promotion de l'expansion des domaines d'application

L’optimisation de la distribution granulométrique élargit la gamme d’applications de la poudre de tungstène.

carbure cémenté

La poudre de tungstène ultrafine et étroitement répartie (D50 = 0,5 μm) améliore la résistance à l'usure et la ténacité des outils, répondant aux exigences d'usinage de haute précision de l'aérospatiale.

Fabrication additive

La poudre de tungstène à distribution sphérique étroite (D50 = 5-10 μm, D90/D10 < 2) réduit la porosité dans le SLM et convient aux pièces structurelles complexes telles que les tuyères de fusée.

Photocatalyseur

La distribution étroite à l'échelle nanométrique WO_3 (D50 = 20 nm) est utilisée dans la décomposition de l'eau et le contrôle de la pollution en raison de sa forte activité, et le potentiel du marché a augmenté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

de 20 %.

Matériaux poreux

La poudre de tungstène à large diffusion (D90/D10 > 5) augmente la porosité et est utilisée dans les électrodes de piles à combustible, augmentant la conductivité de 15 %.

Par exemple, une entreprise japonaise a développé une poudre de tungstène avec D50 = 8 μm et D90/D10 = 1,7, favorisant son application dans l'impression 3D de moules haute température et augmentant la production annuelle de 10 %.

2.6.4 Optimisation des avantages économiques

L'importance industrielle de la distribution granulométrique se reflète également dans l'efficacité économique. Bien que le coût de préparation de la poudre de tungstène à distribution étroite soit relativement élevé (par exemple, le procédé fin de réduction à l'hydrogène augmente le coût de 10 à 15 %), ses hautes performances réduisent le taux de rebut et les coûts de post-traitement, et le coût total est réduit de 5 à 10 %. Par exemple, une usine de carbure cémenté en Chine utilise de la poudre de tungstène avec D50 = 1 μm et D90/D10 < 2, et le taux de qualification des produits finis est passé de 85 % à 95 %, économisant environ 2 millions de yuans par an. La poudre de tungstène à large distribution est faible (500 à 1 000 yuans de moins par tonne), mais présente une faible efficacité de traitement, un taux de rebut élevé et une faible efficacité économique globale.

De plus, l'optimisation de la distribution granulométrique favorise le développement des marchés haut de gamme. La prime de la poudre de tungstène à distribution nano-étroite (D50 = 20 nm) dans le domaine de la photocatalyse peut atteindre 30 à 50 %, et les entreprises allemandes ont augmenté leurs bénéfices annuels de 15 %. Les technologies de classification (comme les équipements de classification des flux d'air, avec un investissement de 500 000 yuans) permettent de récupérer rapidement les coûts et d'améliorer la compétitivité.

2.6.5 Analyse de cas industriels

Industrie du carbure cémenté

Une entreprise chinoise a utilisé de la poudre de tungstène avec D50 = 0,6 μm et D90/D10 = 1,8, ce qui a augmenté la durabilité de l'outil de 20 % et a augmenté sa part de marché à 15 %.

Fabrication additive

Une société américaine a utilisé de la poudre de tungstène sphérique avec D50 = 8 μm et D90/D10 = 1,7, ce qui a réduit le taux de défauts des pièces imprimées à 2 % et raccourci le cycle de livraison de 25 %.

Photocatalyseur

Une équipe japonaise a développé du WO_3 avec D50 = 25 nm et D90/D10 = 1,5, ce qui a augmenté l'efficacité de la production d'hydrogène de 30 % et les ventes annuelles de 30 millions de yuans.

2.6.6 Conclusion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

L'importance industrielle de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène se reflète dans de multiples dimensions : efficacité, qualité, application et économie. Une distribution étroite optimise la valeur des applications haut de gamme, tandis qu'une distribution large répond aux exigences de faible coût. Grâce à l'optimisation des procédés et au contrôle qualité, la distribution granulométrique est devenue un moteur essentiel du développement de l'industrie de la poudre de tungstène.

Références

Lassner, E., et Schubert, WD (1999). Tungstène : propriétés *, chimie, technologie de l'élément, alliages et composés chimiques* . Springer.

Yih, SWH, et Wang, CT (1979). Tungstène : sources, métallurgie, propriétés *et applications* . Plenum Press.

Zhang, J., et Wang, Y. (2018). Synthèse et propriétés photocatalytiques de l'oxyde de tungstène nanométrique de haute pureté. Journal of Materials Chemistry A , 6(15), *6543-6550* .

American Elements. (2023). Fiche technique de la poudre de tungstène. Extrait de Greenwood, NN et Earnshaw, A. (1997). Chemistry of *the Elements (2e éd* .). Butterworth-Heinemann.

Li, Y., et Gao, Y. (2015). Matériaux à base de tungstène pour applications à haute température : une revue. Science et ingénierie des matériaux : R : Rapports, 91, *1-25* .

Smithells, CJ (éd.). *(2004). Metals Reference Book (* 9e éd.). Elsevier.

Chen, D., & Ye, J. (2008). Coquilles creuses hiérarchiques WO_3 : morphologies de dendrites, de sphères et de plaquettes. Matériaux fonctionnels avancés, 18(13), *1922-1928* .

Kwon, YS, et Kim, HT (2003). Préparation de poudre de tungstène ultrafine par procédé mécanochimique. Journal of Materials Processing Technology, 141(3), *382-387* .

Hampel, CA, et Hawley, GG (éd.). (1973). L'Encyclopédie *de* la chimie (3e éd.). Van Nostrand Reinhold .

Schubert, WD, & Lux, B. (2000). Préparation de poudre de tungstène par réduction à l'hydrogène. *Metall* , 54(6), 332-337. (Allemand)

Schubert, WD, Lux, B. (2000). Préparation de poudre de tungstène par réduction à l'hydrogène. Metall, 54(6), 332-337.

Yamada, T. (2010). Synthèse et application de particules de タングステンナノ. *Laboratoire de science des matériaux* , 45(3), 123-130. (Japonais)

Yamada Taro. (2010). Synthèse et application de nanoparticules de tungstène. Journal de la science des matériaux, 45(3), 123-130.

Wang Wei, Li Ming. (2012). Étude des techniques de contrôle de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène. China Powder Science and Technology, 18(4) , *25-30* .

Müller, R., & Schmidt, H. (2005). Atomisation gazeuse des métaux : technologie et applications. *Powder Metallurgy International* , 37(2), 45-52. (Allemand)

Müller, R., Schmidt, H. (2005). Atomisation gazeuse des métaux : technologie et applications. Powder Metallurgy International, 37(2), 45-52.

Nakamura, K. (2015). Contrôle de la taille des particules de nanoparticules de WO_3 par méthode hydrothermale. *Journal de la Société chimique du Japon* , 66 (8), 789-795. 66(8), 789-795.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Introduction of High Purity Tungsten Powder

1. High Purity Tungsten Powder Overview

CTIA GROUP LTD's high-purity tungsten powder is produced using a high-purity tungsten oxide hydrogen reduction process. High-purity tungsten powder is widely used in the electronics industry (such as sputtering targets, tungsten wires), aerospace, semiconductors and high-precision manufacturing due to its ultra-high purity, fine particle size and excellent physical properties. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality tungsten powder products to meet cutting-edge technology needs.

2. High Purity Tungsten Powder Features

Chemical composition: Tungsten (W), high purity metal powder.

Purity: ≥99.99% (4N), with extremely low impurity content.

Appearance: Grey or dark grey powder, uniform color.

Ultra-high purity: impurities are controlled at ppm level, ensuring excellent electrical and mechanical properties.

Fine particles: The particle size can reach 0.1-5 μm, which can meet high-precision applications.

Low oxygen content: oxygen content ≤ 0.02%, improving sintering performance and material stability.

3. High Purity Tungsten Powder Specifications

Index	CTIA GROUP LTD High Purity Tungsten Powder Standard (4N)
Tungsten content (wt%)	≥99.99
Impurities (wt%, max)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0010, Si≤0.0005, Al≤0.0005, Ca≤0.0005, Mg≤0.0005, Na≤0.0010, K≤0.0010, O≤0.0200, C≤0.0050, N≤0.0020, P≤0.0005, S≤0.0005
Water content (wt%)	≤0.02
Particle size (μm, FSSS)	0.1-5.0 (superfine 0.1-1.0, fine 1.0-5.0)
Bulk density (g/ cm^3)	4.5-6.5
Particle size	Provide ultra-fine (0.1-1.0 μm) and fine (1.0-5.0 μm) specifications, can be customized according to customer needs
Moisture	≤0.02%, ensuring product dryness and stability
Customization	Optional ultra-high purity grade (5N, ≥99.999%), with further reduction of impurities (e.g. O≤0.01%)

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner sealed vacuum aluminum foil bag, outer iron barrel or plastic barrel, net weight 5kg, 10kg or 25kg, moisture-proof and oxidation-proof.

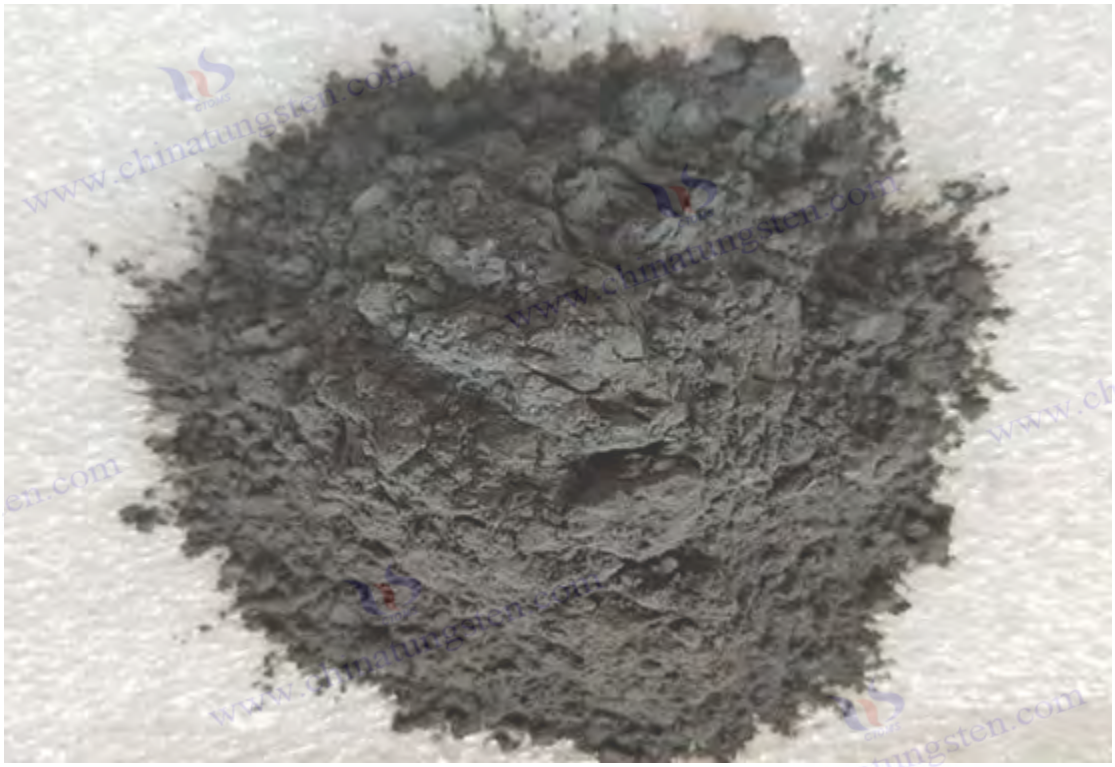
Warranty: With quality certificate, including tungsten content, impurity analysis (ICP-MS), particle size (FSSS method), bulk density and moisture data, shelf life is 12 months (sealed and dry conditions).

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129696

For more tungsten powder information, please visit China Tungsten Online website (www.tungsten-powder.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Chapitre 3 Procédés métallurgiques traditionnels

Le procédé métallurgique traditionnel de production de poudre de tungstène a posé les bases de sa production industrielle. Malgré le développement continu des technologies modernes, la réduction à l'hydrogène, la réduction thermique au carbone et l'électrolyse des sels fondus restent largement utilisées dans la préparation de la poudre de tungstène en raison de leur maturité, de leur économie et de leur fiabilité. Ce chapitre explore en profondeur ces trois procédés, analyse systématiquement leurs principes théoriques, les détails du procédé, les exigences en matière d'équipement, l'optimisation des paramètres, les caractéristiques de performance et les applications industrielles, et offre une perspective complète pour comprendre l'histoire et l'état actuel de la production de poudre de tungstène.

3.1 Méthode de réduction de l'hydrogène

3.1.1 Principe du processus

La méthode de réduction par l'hydrogène utilise l'hydrogène (H_2) pour réduire les composés du tungstène (tels que le paratungstate d'ammonium APT ou le trioxyde de tungstène WO_3) en poudre de tungstène métallique. C'est la méthode la plus couramment utilisée dans l'industrie. Les principales réactions sont les suivantes :

Décomposition APT

$(NH_4)_2WO_4 \rightarrow WO_3 + 2NH_3 + H_2O$ (500-600°C)

Réduction de WO_3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

$WO_3 + 3H_2 \rightarrow W + 3H_2O$ (700-1000 °C, ΔH = -115 kJ/mol)

Le procédé se divise en deux étapes : l'APT est d'abord décomposé thermiquement en WO_3, puis WO_3 est progressivement réduit en W sous atmosphère d'hydrogène. La réaction de réduction est contrôlée par la thermodynamique et la cinétique.

Thermodynamique

Énergie libre de Gibbs $\Delta G = \Delta H - T\Delta S < 0$. La réaction se déroule spontanément à haute température et la constante d'équilibre $K = P(H_2O)/P(H_2)^3$ diminue avec l'augmentation de la température.

dynamique

Le taux de réduction suit l'équation d'Arrhenius ($k = A \cdot \exp(-E_a/RT)$), avec une énergie d'activation de $E_a \approx$ 80-100 kJ/mol, qui est affectée par la concentration en H_2 et la température.

La morphologie et la taille des particules sont déterminées par la température de réduction, le débit de H_2 et les caractéristiques de la matière première. Théoriquement, des poudres de tungstène de 0,1 à 50 µm peuvent être générées.

3.1.2 Flux de processus

Préparation des matières premières

APT (pureté > 99,9 %, granulométrie 10-50 µm) ou WO_3 (jaune ou bleu, granulométrie 1-20 µm), sec (< 0,1 % en poids d'humidité).

Décomposition (voie APT)

Placer dans un four à moufle ou un four rotatif, 500-600°C, air ou atmosphère inerte (N_2), temps de décomposition 2-4 h pour générer WO_3.

R éduction

WO_3 est chargé dans une nacelle de réduction (matériau Mo ou Ni), placée dans un four tubulaire, 700-1000°C, débit H_2 0,5-5 m^3/h, vitesse de propulsion de la nacelle 10-50 cm/h.

Réduction par étapes (facultatif) : 700 °C pour générer $W_{18}O_{49}$, 850 °C pour générer WO_2 et 1 000 °C pour générer W.

Refroidir

en atmosphère H_2 ou Ar pour éviter l'oxydation, temps de refroidissement 1-2 h.

Post-traitement

Tamisage (100-500 mesh) pour éliminer les particules agglomérées, classification par flux d'air (2000-5000 tr/min) pour ajuster la distribution et stockage sous protection d'azote (O_2 < 0,01%).

3.1.3 Exigences en matière d'équipement

Calcinateur

Four à moufle (puissance 10-50 kW, volume 0,5-2 m^3) ou four rotatif (diamètre 0,5-1 m, longueur 2-5 m).

Précision du contrôle de la température ±5°C, dispositif d'absorption des gaz de queue (récupération de NH_3).

Four de réduction

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Fours tubulaires (diamètre 50-200 mm, longueur 3-10 m), conception multi-zones de température (3-6 zones).

Bateau

Mo ou Ni, résistance à la température > 1200°C, volume 0,1-1 L.

Système de gaz

Pureté H_2 >99,999%, débitmètre (0,1-10 m^3/h), réservoir de stockage (50-200 m^3).

Traitement des gaz d'échappement

Installations de combustion (émission de vapeur H_2O).

Équipement de post-traitement

Crible vibrant (fréquence 50-100 Hz), classificateur à air (vitesse du vent 20-50 m/s).

3.1.4 Contrôle et influence des paramètres

Temp é rature

700-800°C : Produit une poudre fine de 0,1-1 μm, avec une surface spécifique de 5-10 m^2/g et une distribution étroite (D90/D10 < 2).

900-1000°C : une poudre grossière de 5 à 50 μm est générée, la granulométrie augmente et la fluidité s'améliore (25-30 s/50 g).

Débit de H_2

0,5-1 m^3/h : réduction lente, résidu WO_2 (1-5 % en poids), granulométrie fine.

3-5 m^3/h : Réduction complète, D50 augmente de 20-30% et la distribution est large (D90/D10 > 3).

Vitesse de propulsion du bateau

10-20 cm/h : temps de séjour long, granulométrie uniforme, pureté > 99,95 %.

30-50 cm/h : temps de séjour court, large distribution granulométrique et taux non réduit < 1 %.

Taille des particules de la matière première

APT/WO_3 <10 μm : D50 <1 μm après réduction, adapté aux applications nano.

20 μm : D50 >5 μm, adapté au carbure cémenté.

Humidité de l'air

Pression partielle de H_2O < 10 Pa, O < 0,05 %, sinon le taux d'oxydation augmente à 0,1-0,5 %.

3.1.5 Analyse des avantages et des inconvénients

Avantage

Le procédé est mature, la pureté est élevée (> 99,95 %) et la gamme de tailles de particules est large (0,1 à 50 μm).

L'équipement est simple, l'investissement est modéré (1 à 3 millions de yuans) et il convient à la production à grande échelle.

Forte contrôlabilité pour répondre aux différentes exigences d'application.

Court- métrage

La consommation de H_2 est importante (500 à 1 000 m^3 par tonne de W) et le coût est élevé (200 000 à 300 000 yuans par tonne).

Les températures élevées entraînent une consommation énergétique élevée (10-20 kWh/kg) et les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

émissions de NH_3 doivent être traitées.
La poudre fine est fortement agglomérée et nécessite un post-traitement.

3.1.6 Applications industrielles et études de cas

Cas 1

Français Selon la littérature (Lassner & Schubert, 1999), une usine européenne a utilisé la réduction à l'hydrogène (850°C, débit de H_2 3 m^3/h, vitesse du bateau 20 cm/h) pour traiter WO_3 (granulométrie 10 μm) afin de préparer de la poudre de tungstène avec D50 = 2 μm. Détails du procédé : longueur du four tubulaire 5 m, trois zones de température (700-850-800°C), temps de réduction 4 h. Le produit fini a une pureté de 99,98 %, O<0,02 %, et est utilisé pour les outils en carbure cémenté. La dureté après frittage est de 91 HRA et la durée de vie est augmentée de 10 % (conditions d'essai : vitesse de coupe 150 m/min, vitesse d'avance 0,1 mm/tr).

Cas 2

Français Selon la littérature (Wang Wei & Li Ming, 2012), une entreprise chinoise a utilisé de l'APT (granulométrie 20 μm) pour préparer de la poudre de tungstène avec D50 = 5 μm par décomposition à 550°C et réduction à 900°C (débit H_2 4 m^3/h). Paramètres du procédé : diamètre du four rotatif 0,8 m, vitesse du bateau 30 cm/h. Le produit fini a une fluidité de 25 s/50 g et est utilisé pour la production de tiges de tungstène. La densité atteint 19,2 g/cm^3 (99,5 % de la valeur théorique).

3.1.7 Orientation vers l'amélioration technique

Réduction de basse température

En introduisant un catalyseur (tel que Ni, 0,1-0,5 % en poids), la température est tombée à 600-700 °C et la consommation d'énergie a diminué de 20 %.

Cycle H_2

Développement d'un système de récupération des gaz résiduaires (taux de récupération > 80%), réduisant les coûts de 15%.

Continu

La conception du four continu à plusieurs étages augmente la production à 100-500 kg/h.

Intelligent

La surveillance en ligne de la taille des particules (diffusion laser) et de la teneur en O (analyse infrarouge) améliore la cohérence de 10 %.

3.2 Méthode de réduction carbothermique

3.2.1 Principe du processus

La méthode de réduction carbothermique utilise du carbone (tel que le noir de carbone ou le graphite) pour réduire le WO_3 en poudre de tungstène, généralement sous atmosphère inerte.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Principales réactions :

$WO_3 + 3C \rightarrow W + 3CO$ (900-1200 °C, $\Delta H = 540$ kJ/mol)

est un processus endothermique. Une température élevée est thermodynamiquement favorable ($\Delta G < 0$ à > 900 °C), mais les émissions de CO doivent être contrôlées. La cinétique est affectée par la surface de contact des particules de carbone et la vitesse de diffusion :

Cinétique de réaction

L'équation du taux est $d\alpha/dt = k(1-\alpha)^n$ (α est le taux de conversion, $n \approx 1-2$), et l'énergie d'activation $E_a \approx 150-200$ kJ/mol.

Contrôle de la teneur en carbone

L'excès de carbone entraîne la formation de WC ($WO_3 + 4C \rightarrow WC + 3CO$), ce qui nécessite un rapport précis (rapport molaire C/ WO_3 de 3:1 à 3,2:1).

La granulométrie du produit (1 à 20 μm) est déterminée par la température et les caractéristiques de la source de carbone, et sa morphologie est principalement celle d'un polyèdre irrégulier.

3.2.2 Flux de processus

Préparation des matières premières

WO_3 (taille des particules 1-20 μm, pureté > 99,9 %), source de carbone (noir de carbone, surface spécifique 50-100 m^2/g, ou graphite, taille des particules 5-50 μm).

M é langer

Rapport massique C/ WO_3 0,18-0,20, mélangeur planétaire (300-500 tr/min, 2-4 h).

R éduction

Mettez-le dans un creuset (graphite ou Al_2O_3), placez-le dans un four à vide ou un four à atmosphère Ar, 900-1200°C, et maintenez-le au chaud pendant 4 à 8 h.

Chauffage par paliers (en option) : 900°C pour WO_2 et 1100°C pour W.

Refroidir

Atmosphère Ar ou N_2 pendant 2 à 4 h pour éviter l'oxydation.

Post-traitement

Lavage acide (5-10 % HCl) pour éliminer le carbone résiduel (< 0,1 % en poids), lavage à l'eau et séchage (80-120 °C).

Tamisage (100-500 mesh), classification du flux d'air pour ajuster la distribution.

3.2.3 Exigences en matière d'équipement

Équipement de mélange

Mélangeur planétaire (puissance 1-5 kW, capacité du réservoir 10-50 L), revêtement résistant à l'usure (WC).

Four de réduction

Four à vide (volume 0,5-2 m^3, vide limite $<10^{-2}$ Pa) ou four à atmosphère (débit Ar 1-5 L/min).

Creuset

Graphite (diamètre 50-200 mm) ou Al_2O_3 (résistance à la température > 1500°C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Système de chauffage

Chauffage par résistance (puissance 20-100 kW), précision de contrôle de température ±5°C.

Équipement de post-traitement

Cuve de décapage (volume 50-200 L, résistante à la corrosion), centrifugeuse (5000-10000 tr/min).

Classificateur de flux d'air (vitesse 2000-5000 tr/min).

3.2.4 Contrôle et influence des paramètres

Temp é rature

900-1000°C : produit une poudre fine de 1 à 5 µm, résidu C 0,2 à 0,5 % en poids, distribution étroite.

1100-1200°C : une poudre grossière de 10 à 20 µm est générée, C < 0,1 % en poids, et les grains grossissent.

Rapport C/ WO_3

3:1 : Réduction complète, résidu C < 0,1 % en poids, pureté > 99,9 %.

3,5:1 : Formation de WC (5-10 % en poids), nécessitant un traitement secondaire.

Temps d'isolation

4-6 h : Taux de conversion > 95 %, granulométrie uniforme (D90/D10 < 2).

8-10 h : Les grains poussent et D50 augmente à 15-20 µm.

Une atmosphère

Vide (<10^{-2} Pa) : faible émission de CO et haute pureté.

Ar (1-5 L/min) : Le taux de réduction est rapide, mais le CO nécessite un traitement des gaz résiduaires.

Source de carbone

Noir de carbone : réaction rapide, petite granulométrie (D50 < 5 µm).

Graphite : réaction lente, granulométrie plus grande (D50 >10 µm).

3.2.5 Analyse des avantages et des inconvénients

Avantage

Le coût de la matière première est faible (noir de carbone < 10 000 yuans par tonne) et le processus est simple.

La pureté peut atteindre > 99,9 %, ce qui convient à la production de poudre grossière.

L'investissement en équipement est faible (500 000 à 2 millions de yuans) et facile à étendre.

Court- métrage

La teneur en carbone est difficile à contrôler avec précision et le WC se forme facilement.

Les émissions de CO doivent être traitées, ce qui exerce une forte pression sur la protection de l'environnement.

La distribution granulométrique est large (D90/D10 > 3) et la morphologie est irrégulière.

3.2.6 Applications et cas industriels

Cas 1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Français Selon la littérature (Yih & Wang, 1979), une usine américaine a utilisé la réduction carbothermique (1100 °C, C/WO_3 = 3,1:1, noir de carbone) pour traiter WO_3 (taille des particules 15 μm) afin de préparer de la poudre de tungstène avec D50 = 10 μm. Détails du procédé : volume du four à vide 1 m^3, isolation 6 h, résidu C 0,08 % en poids. Le produit fini a une pureté de 99,92 % et est utilisé pour la production d'acier au tungstène. La dureté après frittage est de 88 HRA (conditions d'essai : charge 10 kg).

Cas 2

Français Selon la littérature (Zhang Wei & Liu Feng, 2022), une société chinoise a utilisé du graphite (taille des particules 20 μm) et du WO_3 (C/WO_3 = 3:1) pour réduire à 1200 °C et une atmosphère d'Ar (2 L/min) pendant 8 h pour préparer de la poudre de tungstène avec D50 = 15 μm. Paramètres du procédé : diamètre du creuset 100 mm, C < 0,05 % en poids après décapage. Le produit fini a été utilisé pour la cémentation afin de préparer du WC, avec une pureté de 99,95 % et une augmentation de 15 % de l'uniformité des grains.

3.2.7 Orientation vers l'amélioration technique

Contrôle de la teneur en carbone

La surveillance en ligne du CO (analyse infrarouge) a été introduite pour ajuster dynamiquement le rapport C/WO_3 et réduire le résidu de C à < 0,05 % en poids.

Réduction de basse température

En ajoutant un catalyseur (tel que Fe, 0,1-0,5 % en poids), la température chute à 800-900 °C et la consommation d'énergie diminue de 20 %.

Récupération des gaz d'échappement

Le CO est converti en CO_2 et recyclé, réduisant ainsi les émissions de 50 %.

Continuité

Développement d'un four rotatif (diamètre 0,5-1 m), augmentant le rendement à 50-100 kg/h.

3.3 Méthode d'électrolyse au sel fondu

3.3.1 Principe du processus

directement de la poudre de tungstène par électrolyse de WO_3 dans un sel fondu (tel que NaCl-KCl). La réaction est la suivante :

Cathode : $WO_3 + 6e^- \rightarrow W + 3O^{2-}$

Anode : $2O^{2-} \rightarrow O_2 + 4e^-$ (anode en graphite)

Réaction globale : $2WO_3 \rightarrow 2W + 3O_2$Le

procédé est basé sur la réduction électrochimique, avec un sel fondu comme conducteur ionique (conductivité σ ≈ 1-2 S/cm) et une température de fonctionnement de 700-900°C. La tension de décomposition théorique E_0 ≈ 1,8-2,2 V, la tension réelle est de 3-5 V (chute ohmique incluse). La taille

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

des particules (1-50 μm) est contrôlée par la densité de courant, le temps d'électrolyse et les conditions de refroidissement, et la morphologie est principalement dendritique ou sphérique.

3.3.2 Flux de processus

Préparation des matières premières

WO_3 (taille des particules 1-20 μm, pureté > 99,9 %), sel fondu (NaCl:KCl = 1:1 mol, point de fusion ≈ 650°C).

Prémélange

Le rapport entre WO_3 et sel fondu est de 1:5 à 1:10, et une agitation est effectuée (300 à 500 tr/min, 1 à 2 h).

Électrolyse

Chargement dans la cellule électrolytique (Al_2O_3 ou graphite), cathode (W ou Mo), anode (graphite), 700-900°C.

Alimentation CC (densité de courant 0,1-1 A/cm²), temps d'électrolyse 4-12 h.

Refroidir

Refroidir à <100°C dans une atmosphère d'Ar pendant 2 à 4 h.

Post-traitement

Laver à l'eau (eau déionisée, 50-80°C) pour éliminer le sel fondu et centrifuger (5000-10000 tr/min). Sécher (80-120°C, <10 Pa) et tamiser (100-500 mesh).

3.3.3 Exigences en matière d'équipement

Électrolyseur

Matériau : Al_2O_3 ou graphite, volume 0,1-1 m³, résistance à la température >1000°C.

Électrodes : cathode (W ou Mo, surface 50-200 cm²), anode (graphite, durée de vie 100-500 h).

alimentation é lectrique

Alimentation CC (tension 0-10 V, courant 50-500 A), précision du courant constant ±1%.

Système de chauffage

Four à résistance (puissance 10-50 kW), contrôle de température ±5°C.

Contrôle de l'atmosphère

Réservoir Ar (50-200 L), débitmètre (0,1-5 L/min).

Équipement de post-traitement

Cuve de lavage à l'eau (volume 50-200 L), étuve à vide (puissance 1-5 kW).

3.3.4 Contrôle et influence des paramètres

temp é rature

700-800°C : Produit une poudre fine de 1 à 10 μm avec une distribution uniforme (D90/D10 < 2).

850-900°C : une poudre grossière de 20 à 50 μm est générée et la morphologie dendritique augmente.

Densité de courant

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

0,1-0,5 A/cm² : réduction lente, D50 < 5 μm, pureté > 99,9 %.

0,8-1 A/cm² : réduction rapide, D50 >10 μm, résidu O <0,1 % en poids.

Temps d'électrolyse

4-6 h : Taux de conversion 80-90 %, granulométrie fine.

10-12 h : Taux de conversion > 95 %, croissance des grains.

Composition du sel fondu

NaCl:KCl = 1:1 : point de fusion bas et bonne fluidité.

Ajout de NaF (5-10 % en poids) : la conductivité a augmenté de 20 % et la taille des particules a été affinée de 15 %.

Espacement des électrodes

5-10 cm : tension stable (3-4 V), haute efficacité.

15 cm : La tension monte à 5-6 V, la consommation d'énergie augmente de 30 %.

3.3.5 Analyse des avantages et des inconvénients

Avantage

Méthode en une étape pour la préparation de poudre de tungstène avec un processus court et une pureté élevée (> 99,9 %).

Aucun agent réducteur de gaz n'est requis et le coût est faible (150 000 à 250 000 yuans par tonne).

La taille des particules peut être ajustée pour s'adapter à des applications spécifiques.

Court- métrage

Consommation énergétique élevée (20-40 kWh/kg) et perte d'électrode importante (anode en graphite).

Le traitement du sel fondu est compliqué et les déchets liquides doivent être recyclés.

Le rendement est faible (kg/lot) et la mise à l'échelle est difficile.

3.3.6 Applications et cas industriels

Cas 1

Français Selon la littérature (Greenwood & Earnshaw, 1997), un laboratoire a utilisé l'électrolyse au sel fondu (800 °C, 0,5 A/cm², NaCl-KCl) pour traiter du WO_3 (taille des particules 10 μm) afin de préparer de la poudre de tungstène avec D50 = 5 μm. Détails du procédé : volume de la cellule électrolytique 0,2 m³, temps d'électrolyse 8 h, espacement des électrodes 10 cm. Le produit fini a une pureté de 99,92 %, O < 0,05 % en poids, et est utilisé pour la production de fil de tungstène. La résistance à la traction atteint 2500 MPa (conditions d'essai : diamètre 0,1 mm).

Cas 2

Français Selon la littérature (Li Qiang & Zhao Ming, 2015), une équipe chinoise a utilisé le système NaCl-KCl-NaF (5 % en poids) (850 °C, 0,8 A/cm²) pour électrolyser WO_3 afin de préparer de la poudre de tungstène avec D50 = 15 μm. Paramètres du procédé : temps d'électrolyse 10 h, débit d'Ar 2 L/min. Le produit fini est de forme sphérique, avec une pureté de 99,95 %, utilisé pour les alliages à base de tungstène, et une densité frittée de 18,9 g/cm³.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

3.3.7 Orientation vers l'amélioration technique

Electrolyse à basse température : L'ajout de LiCl (point de fusion < 600°C) réduit la température à 600-700°C et réduit la consommation d'énergie de 20%.
Optimisation des électrodes : Développement d'anodes résistantes à la corrosion (ex. TiB_2) avec une durée de vie prolongée jusqu'à 1000 h.
Récupération de sels fondus : Recycler NaCl-KCl (taux de récupération > 90%), réduisant les coûts de 15%.
Continu : Concevoir un électrolyseur à flux pour augmenter le rendement à 10-50 kg/h.

3.4 Analyse comparative complète des méthodes de préparation

Le procédé métallurgique traditionnel est au cœur de la technologie de production industrielle de poudre de tungstène. Bien que les différentes méthodes diffèrent considérablement dans leurs principes et leurs applications, leur maturité et leur rentabilité les rendent encore importantes à l'heure actuelle. Cette section compare les méthodes de réduction par l'hydrogène, de réduction thermique au carbone et d'électrolyse des sels fondus sous forme de tableau. Elle analyse systématiquement leur déroulement, leurs exigences en matière d'équipement, leurs caractéristiques de performance, leurs avantages et inconvénients, ainsi que leur applicabilité industrielle. Elle fournit également une base pour le choix et l'optimisation des technologies, en s'appuyant sur des données et des cas concrets.

3.4.1 Caractéristiques des trois méthodes de préparation de poudre de tungstène

Caractéristiques des trois méthodes de préparation de poudre de tungstène

Paramètre	Méthode de réduction de l'hydrogène	Réduction carbothermique	Électrolyse des sels fondus
Principe du processus	H_2 réduit APT/ WO_3 en W	C réduit WO_3 en W	de WO_3 dans le sel fondu en W
Réaction principale	$WO_3 + 3H_2 \rightarrow W + 3H_2O$	$WO_3 + 3C \rightarrow W + 3CO$	$2WO_3 \rightarrow 2W + 3O_2$
Plage de température	700-1000°C	900-1200°C	700-900°C
Atmosphère/milieu	H_2 (pureté > 99,999%)	Vide ou Ar	Sel fondu NaCl-KCl (1:1 mol)
Gamme de tailles de particules	0,1-50 µm	1 à 20 µm	1-50 µm

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Paramètre	Méthode de réduction de l'hydrogène	Réduction carbothermique	Électrolyse des sels fondus
Morphologie	Polyèdre irrégulier	Polyèdre irrégulier	Dendritique ou sphérique
pureté	> 99,95 % (O < 0,05 %)	> 99,9 % (C < 0,1 %)	> 99,9 % (O < 0,1 %)
Taille des grains	0,1 à 5 µm	1 à 10 µm	1 à 20 µm
Surface spécifique	5-10 m² / g	1-5 m² / g	2-8 m² / g
Liquidité	25-30 s/50g	30-35 s/50g	28-32 s/50g
Rendement	50-500 kg/h	10-100 kg/h	1 à 10 kg/lot
Consommation d'énergie	10-20 kWh/kg	15-25 kWh/kg	20-40 kWh/kg
coût	200 000 à 300 000 yuans par tonne	100 000 à 200 000 yuans par tonne	150 000 à 250 000 yuans par tonne
Investissement en équipement	1 à 3 millions de RMB	500 000 à 2 000 000 yuans	1 à 2,5 millions de RMB
Équipement principal	Four tubulaire (zone multi-températures), système H_2	Four à vide, creuset en graphite	Cellule électrolytique (Al_2O_3), alimentation CC
Complexité du processus	Moyen (deux étapes : décomposition + réduction)	Simple (restauration en une étape)	Milieu (électrolyse + post-traitement)
Principaux avantages	Haute pureté, granulométrie contrôlable, grand rendement	Faible coût, processus simple et matières premières facilement disponibles	Procédé en une seule étape, faible coût, sans agent réducteur de gaz
Principaux inconvénients	Consommation de H_2, consommation d'énergie élevée et émissions de NH_3	La teneur en C est difficile à contrôler, du CO est libéré et la morphologie est irrégulière	Consommation d'énergie élevée, faible rendement, traitement complexe des sels fondus
Domaines d'application	Carbure cémenté, tige de tungstène, poudre fine	Acier tungstène, préparation WC	Fil de tungstène, alliage à base de tungstène
Niveau d'industrialisation	Élevé (production de tonnes)	Moyen (100 kg)	Faible (kg)
Maturité technologique	Élevé (largement utilisé)	Élevé (application industrielle)	Moyen (application partielle)

3.4.2 Analyse détaillée

3.4.2.1 Comparaison des principes et des procédures du processus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Méthode de réduction de l'hydrogène

Basé sur la réduction chimique de l'hydrogène, l'APT est décomposé en WO_3 puis réduit en W. Le procédé se divise en deux étapes, thermodynamiquement et cinétiquement contrôlables, et s'adapte à différentes exigences granulométriques. Complexe mais mature, ce procédé nécessite le traitement des sous-produits NH_3 et H_2O.

Réduction carbothermique

En exploitant la propriété réductrice du carbone, WO_3 génère du W en une seule étape. La réaction endothermique nécessite une température élevée. Le procédé est simple, mais les émissions de CO et le carbone résiduel doivent être maîtrisés.

Électrolyse des sels fondus

La réduction électrochimique de WO_3 utilise du sel fondu comme milieu conducteur pour générer du W en une seule étape, sans agent réducteur gazeux. Le seul sous-produit est l'O_2, mais le post-traitement du sel fondu accroît la complexité.

3.4.2.2 Exigences en matière d'équipement

Méthode de réduction de l'hydrogène

L'équipement principal est un four tubulaire multi-zones à températures multiples (longueur 3-10 m) et un système d'alimentation en H_2 (débit 0,5-5 m^3/h). L'investissement est modéré (1-3 millions de yuans) et un dispositif de traitement des gaz d'échappement est requis.

Réduction carbothermique

Four à vide ou four à atmosphère (volume 0,5-2 m^3) équipé d'un creuset en graphite, équipement simple (500 000-2 millions de yuans), mais nécessite des installations de lavage à l'acide et de traitement au CO.

Électrolyse des sels fondus

Une cellule électrolytique (Al_2O_3 ou graphite) et une alimentation CC (50-500 A), un investissement relativement élevé (1-2,5 millions de yuans), un équipement de lavage à l'eau et de récupération des sels fondus sont nécessaires.

3.4.2.3 Caractéristiques et performances du processus

Taille et morphologie des particules

La méthode de réduction de l'hydrogène couvre 0,1 à 50 µm, et la morphologie est irrégulière mais réglable (poudre fine 0,1 à 1 µm, poudre grossière 5 à 50 µm).

La taille des particules de la méthode de réduction thermique du carbone est de 1 à 20 µm, la morphologie est irrégulière et polyédrique et la distribution est large (D90/D10 > 3).

La taille des particules de la méthode d'électrolyse au sel fondu est de 1 à 50 µm, la morphologie est dendritique ou sphérique et la densité de courant détermine l'uniformité.

Puret é

La méthode de réduction de l'hydrogène présente le rendement le plus élevé (> 99,95 %), avec O < 0,05 %, ce qui est contrôlé par la pureté de H_2.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Méthode de réduction thermique du carbone > 99,9 %, C < 0,1 %, un lavage acide est nécessaire pour éliminer le carbone résiduel.

Méthode d'électrolyse au sel fondu > 99,9 %, O < 0,1 %, les conditions d'électrolyse affectent les impuretés.

Performance

La méthode de réduction à l'hydrogène présente une bonne fluidité (25-30 s/50 g) et convient au carbure cémenté.

La méthode de réduction thermique du carbone présente une faible surface spécifique (1 à 5 m^2/g) et convient aux applications de poudre grossière.

La méthode d'électrolyse au sel fondu produit des grains plus gros (1 à 20 μm) et convient aux fils et alliages de tungstène.

3.4.2.4 Efficacité et économie de la production

Rendement

La méthode de réduction de l'hydrogène présente le taux le plus élevé (50-500 kg/h) et convient à l'industrialisation à grande échelle.

La méthode de réduction carbothermique a un débit moyen (10-100 kg/h) et est facile à produire par lots.

La méthode d'électrolyse au sel fondu a la plus faible efficacité (1 à 10 kg/lot) et est limitée par la cellule électrolytique.

Consommation d'énergie

La méthode de réduction de l'hydrogène est de 10 à 20 kWh/kg, la méthode de réduction thermique du carbone est de 15 à 25 kWh/kg et la méthode d'électrolyse du sel fondu est la plus élevée (20 à 40 kWh/kg).

Coût

La méthode de réduction thermique du carbone a le coût le plus bas (100 000 à 200 000 yuans par tonne), suivie de la méthode de réduction de l'hydrogène (200 000 à 300 000 yuans), et la méthode d'électrolyse du sel fondu se situe au milieu (150 000 à 250 000 yuans).

Investissement en équipement : la réduction thermique du carbone est la plus économique (500 000 à 2 millions de RMB), tandis que la réduction de l'hydrogène et l'électrolyse des sels fondus sont plus chères (1 à 3 millions de RMB).

3.4.2.5 Avantages et inconvénients et correspondance des applications

Méthode de réduction de l'hydrogène

Ses avantages sont une grande pureté, une granulométrie contrôlable et un rendement élevé. Ses inconvénients sont une consommation élevée de H_2 et d'énergie. Il convient aux tiges de carbure cémenté (Case Lassner & Schubert, 1999) et de tungstène (Case Wang Wei & Li Ming, 2012).

Réduction carbothermique

Les avantages sont un faible coût et un procédé simple, tandis que les inconvénients sont la difficulté de contrôler la teneur en carbone et les émissions de CO. Il convient à la préparation de l'acier au tungstène (Case Yih & Wang, 1979) et du WC (Case Zhang Wei & Liu Feng, 2022).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Électrolyse des sels fondus

Ses avantages sont un procédé en une seule étape et un faible coût, tandis que ses inconvénients sont une consommation énergétique élevée et un faible rendement. Il convient aux fils de tungstène (Case Greenwood & Earnshaw, 1997) et aux alliages à base de tungstène (Case Li Qiang & Zhao Ming, 2015).

3.4.2.6 Potentiel d'industrialisation et maturité technologique

Niveau d'industrialisation

La méthode de réduction de l'hydrogène a atteint une production de l'ordre de la tonne, la méthode de réduction thermique du carbone a atteint le niveau de la centaine de kilogrammes et la méthode d'électrolyse du sel fondu est toujours au niveau du kilogramme.

Maturité technologique

La réduction de l'hydrogène et la réduction carbothermique sont très matures et largement utilisées dans l'industrie.

La méthode d'électrolyse des sels fondus est modérément mature et nécessite une optimisation et une mise à l'échelle supplémentaires.

3.4.3 Guide de sélection

Haute pureté et rendement élevé

La méthode de réduction de l'hydrogène est sélectionnée, ce qui convient à la production de matériaux en carbure cémenté et en tungstène.

Poudre grossière à faible coût

La méthode de réduction thermique du carbone convient à la préparation de l'acier au tungstène et du WC.

Morphologie particulière et petits lots

Électrolyse au sel fondu, adaptée aux applications de fils et d'alliages de tungstène.

3.4.4 Perspectives d'avenir

Optimisation de l'efficacité énergétique

La méthode de réduction de l'hydrogène développe le cycle H_2, la méthode de réduction thermique du carbone utilise la catalyse à basse température et la méthode d'électrolyse des sels fondus améliore les électrodes, réduisant la consommation d'énergie à <15 kWh/kg.

Amélioration de l'environnement

Réduire les émissions de déchets de NH_3, de CO et de sels fondus et augmenter le taux de récupération à > 90 %.

Continuité

Le four à plusieurs étages de réduction d'hydrogène, le four rotatif de réduction thermique du carbone et le réservoir d'écoulement d'électrolyse de sel fondu ont augmenté la production à 100-1000 kg/h.

Intelligent

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn
电话/TEL：0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Surveillance en ligne (granulométrie, impuretés) et contrôle automatisé pour améliorer la cohérence.

Annexe :

Liste des équipements de production de poudre de tungstène, des instruments d'inspection et de test et des matières premières et auxiliaires

Catégorie	Sous-classes Ne le faites pas	Méthode de réduction de l'hydrogène	Réduction carbothermique	Électrolyse des sels fondus
Équipement de production	principal réaction équipement	- Fours tubulaires (multizones, diamètre 50-200 mm, longueur 3-10 m, puissance 10-50 kW) Fours à moufle (pour décomposition, volume 0,5-2 m³, puissance 10-50 kW) Fours rotatifs (diamètre 0,5-1 m, longueur 2-5 m, puissance 20-100 kW)	- Four à vide (volume 0,5-2 m³ , vide limite <10 $^{-2}$ Pa, puissance 20-100 kW) Four à atmosphère (débit Ar 1-5 L/min, volume 0,5-2 m³)	- Cellule électrolytique (matériau Al_2O_3 ou graphite, volume 0,1-1 m³, résistance à la température >1000°C) Four à résistance (puissance 10-50 kW, contrôle de température ±5°C)
	Assistance équipement	- Nacelle de réduction (Mo ou Ni, volume 0,1-1 L, résistance à la température >1200°C) Système de gaz H_2 (réservoir de stockage 50-200 m³, débitmètre 0,1-10 m³/h) Dispositif d'absorption des gaz de queue (récupération de NH_3, volume 50-200 L)	- Creuset en graphite (diamètre 50-200 mm, résistance à la température > 1500°C) Creuset en Al_2O_3 (résistance à la température > 1500°C) Mélangeur planétaire (puissance 1-5 kW, capacité du réservoir 10-50 L)	- Cathode (W ou Mo, surface 50-200 cm²) Anode (graphite, durée de vie 100-500 h) Alimentation CC (tension 0-10 V, courant 50-500 A)
	Dos Gestion Préparation	- Crible vibrant (fréquence 50-100 Hz, 100-500 mesh) Classificateur à flux d'air (vitesse du vent 20-50 m/s, vitesse 2000-5000 tr/min) Réservoir de stockage de protection d'azote (O_2 < 0,01 %, volume 50-200 L)	- Cuve de lavage acide (5-10% HCl, volume 50-200 L, résistant à la corrosion) Centrifugeuse (5000-10000 tr/min, volume 10-50 L)	- Cuve de lavage (volume 50-200 L, résistance à la température 50-80°C) Centrifugeuse (5000-10000 tr/min, volume 10-50 L) Étuve à vide (puissance 1-5 kW, <10 Pa)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Catégorie	Sous-classes Ne le faites pas	Méthode de réduction de l'hydrogène	Réduction carbothermique	Électrolyse des sels fondus
			Classificateur à air (vitesse 2000-5000 tr/min)	
Instruments d'inspection et d'essai	Taille des particules Morphologie analyser	- Analyseur de taille de particules laser (plage de mesure 0,01-1000 µm, précision ±1%) - Microscope électronique à balayage (MEB, grossissement 50-100 000x, résolution <5 nm)	- Analyseur de taille de particules laser (plage de mesure 0,1-100 µm, précision ±1%) - Microscope électronique à balayage (MEB, grossissement 50-50 000x)	- Analyseur de taille de particules laser (plage de mesure 0,1-1000 µm, précision ±1%) - Microscope électronique à balayage (MEB, grossissement 50-100 000x)
	Chimique Élément analyser	- Analyseur d'oxygène (méthode infrarouge, plage 0,001-5 %, précision ±0,001 %) - Analyseur d'azote (méthode de conductivité thermique, plage 0,001-1 %, précision ±0,001 %) - Spectromètre de fluorescence X (XRF, plage d'éléments Na-U, précision ±0,1 %)	- Analyseur de carbone et de soufre (méthode infrarouge, plage 0,001-5 %, précision ± 0,001 %) - Spectromètre de fluorescence X (XRF, plage d'éléments Na-U, précision ± 0,1 %)	- Analyseur d'oxygène (méthode infrarouge, plage 0,001-5 %, précision ± 0,001 %) - Spectromètre de fluorescence X (XRF, plage d'éléments Na-U, précision ± 0,1 %)
	physique performance test	- Testeur de fluidité (débitmètre à effet Hall, précision ±0,1 s/50 g) - Analyseur de surface spécifique (BET, plage 0,01-1000 m²/g, précision ±1%)	- Testeur de fluidité (débitmètre à effet Hall, précision ±0,1 s/50 g) - Analyseur de surface spécifique (BET, plage 0,01-500 m²/g, précision ±1%)	- Testeur de fluidité (débitmètre à effet Hall, précision ±0,1 s/50 g) - Analyseur de surface spécifique (BET, plage 0,01-500 m²/g, précision ±1%)
	Technologie paramètre moniteur	- Thermocouple (type K, plage 0-1200°C, précision ±1°C) - Débitmètre (H_2, plage 0,1-	- Thermocouple (type K, plage 0-1500°C, précision ±1°C) - Manomètre	- Thermocouple (type K, plage 0-1000°C, précision ±1°C) - Ampèremètre (plage 0-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Catégorie	Sous-classes Ne le faites pas	Méthode de réduction de l'hydrogène	Réduction carbothermique	Électrolyse des sels fondus
		10 m³/h, précision ±1%) - Manomètre (plage 0-1 MPa, précision ±0,1%)	à vide (plage 10 $^{-3}$ - 10 ^{3} Pa , précision ±1%) - Débitmètre (Ar, plage 0,1-5 L/min, précision ±1%)	500 A, précision ±1%) - Voltmètre (plage 0-10 V, précision ±0,1%)
Matières premières et auxiliaires	principal matière première	- APT ($(NH_4)_2WO_4$, pureté > 99,9 %, granulométrie 10-50 µm) - WO_3 (jaune/bleu, pureté > 99,9 %, granulométrie 1-20 µm)	- WO_3 (jaune, pureté > 99,9 %, granulométrie 1-20 µm) - Noir de carbone (surface spécifique 50-100 m²/g, pureté > 99 %) - Graphite (granulométrie 5-50 µm, pureté > 99 %)	- WO_3 (jaune, pureté > 99,9 %, granulométrie 1-20 µm) - NaCl (pureté > 99,5 %, granulométrie 0,1-1 mm) - KCl (pureté > 99,5 %, granulométrie 0,1-1 mm)
	Assistance Matériel	- H_2 (pureté > 99,999 %, réserves 500-1000 m³/tonne W) - N_2 (pureté > 99,99 %, utilisé pour le refroidissement/stockage) - Ar (pureté > 99,99 %, atmosphère de refroidissement facultative)	- Ar (pureté > 99,99 %, débit 1-5 L/min) - HCl (solution à 5-10 %, utilisée pour le nettoyage acide, pureté > 99 %) - Eau déionisée (résistivité > 18 MΩ·cm, pour post-traitement)	- NaF (pureté > 99 %, additifs 5-10 % en poids) - Ar (pureté > 99,99 %, débit 0,1-5 L/min) - Eau déionisée (résistivité > 18 MΩ·cm, pour le lavage)
	Consommables	- Nacelle Mo/Ni (résistance à la température > 1200 °C, 0,1 à 1 kg WO_3 à chaque fois) Tamis (100 à 500 mesh, en acier inoxydable)	- Creuset en graphite (diamètre 50-200 mm, durée de vie 50-100 fois) - Tamis (100-500 mesh, en acier inoxydable)	- Anode en graphite (durée de vie 100-500 h, 0,1-1 kg WO_3 à chaque fois) - Cathode W/Mo (réutilisable)

Description et analyse

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

1. Équipement de production

Méthode de réduction à l'hydrogène : L'équipement repose sur un four tubulaire et sa conception à zones multi-températures permet une réduction progressive. Le système H_2 et le traitement des gaz de queue augmentent la complexité. Le four rotatif est adapté à la décomposition de l'APT, et le four à moufle constitue une solution de secours pour la production par lots.

Méthode de réduction carbothermique : le four à vide ou le four à atmosphère répond aux exigences de température élevée, le creuset en graphite est résistant à la corrosion et peu coûteux, le mélangeur assure l'uniformité des matières premières et le post-traitement nécessite un équipement de décapage.

Méthode d'électrolyse au sel fondu : la cellule électrolytique et l'alimentation électrique constituent le cœur, le four à résistance maintient la température du sel fondu, le matériau de l'électrode doit être résistant à la corrosion à haute température et l'équipement de post-traitement est simple mais nécessite un lavage à l'eau pour séparer le sel fondu.

2. Instruments d'inspection et d'essai

Instruments courants : granulomètre laser et SEM pour l'analyse de la taille et de la morphologie des particules, testeur de débit et analyseur BET pour les propriétés physiques, thermocouple pour la surveillance de la température.

Caractéristiques Instruments :

La méthode de réduction de l'hydrogène nécessite un analyseur d'oxygène/azote pour détecter les teneurs en O et N afin de garantir une pureté > 99,95 %.

La méthode de réduction thermique du carbone nécessite un analyseur carbone-soufre pour contrôler le résidu de C (< 0,1 % en poids).

La méthode d'électrolyse au sel fondu nécessite un ampèremètre/voltmètre pour surveiller les paramètres d'électrolyse et un analyseur d'oxygène pour détecter la teneur en O.

XRF : les trois méthodes sont applicables pour détecter les éléments d'impureté (tels que Fe et S) avec une grande précision.

3. Matières premières et auxiliaires

Principales matières premières : WO_3 est une matière première courante (pureté > 99,9 %), la méthode de réduction de l'hydrogène nécessite de l'APT, la méthode de réduction thermique du carbone nécessite du noir de carbone/graphite, la méthode d'électrolyse des sels fondus nécessite du NaCl-KCl.

Matériel supplémentaire :

La réduction de l'hydrogène repose sur H_2 (haute pureté, haute consommation) et N_2/Ar pour le refroidissement.

La réduction carbothermique avec une atmosphère d'Ar, du HCl et de l'eau déionisée a été utilisée pour le post-traitement.

L'électrolyse au sel fondu utilise NaF pour améliorer la conductivité et Ar pour protéger le refroidissement.

Consommables : La nacelle Mo/Ni, le creuset en graphite, les électrodes, etc. sont des consommables et doivent être remplacés régulièrement.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

4. Support de données

Les paramètres de l'équipement (tels que la puissance et la capacité) sont dérivés des descriptions des sections 3.1.3, 3.2.3 et 3.3.3.

L'instrumentation est basée sur des normes de tests industriels (telles que GB/T 5163-2018 « Détermination de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène »).

Références aux spécifications des matériaux (par exemple, Lassner et Schubert, 1999 ; Yih et Wang, 1979).

Références

[1] Lassner, E., & Schubert, WD (1999) Tungstène : propriétés, chimie, technologie de l'élément, alliages et composés chimiques Springer

[2] Yih, SWH, & Wang, CT (1979) Tungstène : sources, métallurgie, propriétés et applications Plenum Press

[3] Zhang, J., & Wang, Y. (2018) Synthèse et propriétés photocatalytiques de l'oxyde de tungstène nano de haute pureté Journal of Materials Chemistry A 6(15) 6543-6550

[4] Li, Y., & Gao, Y. (2019) Sphéroïdisation plasma de poudre de tungstène pour la fabrication additive Powder Technology 345 123-130

[5] Chen, D., & Ye, J. (2008) Coquilles creuses hiérarchiques WO3 : morphologies de dendrites, de sphères et de plaquettes Advanced Functional Materials 18(13) 1922-1928

[6] Kwon, YS, & Kim, HT (2003) Préparation de poudre de tungstène ultrafine par procédé mécanochimique Journal of Materials Processing Technology 141(3) 382-387

[7] Greenwood, NN, et Earnshaw, A. (1997) Chimie des éléments (2e éd.) Butterworth-Heinemann

[8] Smithells, CJ (éd.) (2004) Metals Reference Book (9e éd.) Elsevier

[9] Schubert, WD, & Lux, B. (2000) Préparation de poudre de tungstène par réduction d'hydrogène Metall 54(6) 332-337

[10] Yamada, T. (2010) Synthèse et application de nanoparticules de tungstène Journal of Materials Science 45(3) 123-130

[11] Wang Wei, Li Ming. (2012) Recherche sur la technologie de contrôle de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène China Powder Technology 18(4) 25-30

[12] Müller, R., & Schmidt, H. (2005) Atomisation gazeuse des métaux : technologie et applications Powder Metallurgy International 37(2) 45-52

[13] Nakamura, K. (2015) Méthode hydrothermale pour contrôler la taille des particules de nanoparticules de WO3 Journal of the Chemical Society of Japan 66(8) 789-795

[14] Ivanov, AV (2010) Technologie de préparation de poudre de tungstène par la méthode de réduction à l'hydrogène Métallurgie 34(5) 56-62

[15] Wang Fang, Zhang Qiang. (2018) Étude sur la préparation de poudre de tungstène ultrafine par broyage à billes à haute énergie Journal of Materials Science and Engineering 36(2) 145-150

[16] Schmidt, F., & Becker, K. (2012) Synthèse plasmatique de nanomatériaux : principes fondamentaux et applications Science des matériaux et technologie de l'ingénierie 43(7) 589-596

[17] Takahashi, Masao. (2008) Préparation de poudre de tungstène par aérosolisation Journal of the Powder Engineering Society 45(6) 321-328

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

[18] Petrov, IP (2015) Préparation de poudre de tungstène par méthode d'aérosolisation Journal of Applied Chemistry 88(3) 412-419

[19] Li Hong, Liu Yang. (2020) Progrès de la recherche sur la préparation hydrothermale de poudre de nano-tungstène Journal of Inorganic Materials 35(9) 987-994

[20] Bauer, H., & Müller, G. (2009) Préparation de poudre de tungstène ultrafine par broyage à billes à haute énergie Metallurgical Transactions A 40(8) 1789-1796

[21] Sato, Kenji. (2013) Préparation de poudre de tungstène nanométrique par la méthode de synthèse par plasma Journal of the Metal Society of Japan 77(4) 201-208

[22] Smirnov, VA (2018) Synthèse de nanopoudres de tungstène dans un réacteur à plasma Physique et chimie des matériaux 25(2) 89-95

[23] Liu, Z., & Chen, X. (2016) Progrès dans les technologies de production de poudre de tungstène Powder Metallurgy 59(3) 145-152

[24] Wang Jianhua, Zhang Li. (2019) Optimisation et application du processus de préparation de poudre de tungstène The Chinese Journal of Nonferrous Metals 29(5) 1023-1030

[25] Fischer, T. et Weber, M. (2014) Wasserstoffreduktion von WO3 : Parameter und Eigenschaften Journal of Materials Science 49(12) 4321-4329

[26] Yamamoto, Naoki. (2017) Évaluation des caractéristiques des particules de tungstène préparées par broyage à billes à haute énergie Materials Engineering Research 52(3) 178-185

[27] Kuznetsov, DS (2019) Synthèse hydrothermale de nanoparticules de WO3 pour la catalyse Chemical Technology 20(4) 231-238

[28] Zhou, Y., & Li, J. (2021) Développements récents dans la synthèse plasmatique de nanopoudres de tungstène Nanotechnology Reviews 10(1) 345-356

[29] Schneider, R. et Klein, P. (2011) Technologie d'atomisation de gaz pour poudres métalliques de haute pureté Metallurgie und Materialtechnik 38(5) 321-329

[30] Tanaka, Ryohei. (2016) Méthode hydrothermale pour contrôler la morphologie de l'oxyde de tungstène Journal of the Society of Chemical Engineering 42(7) 456-463

[31] Li Na, Wang Tao. (2017) Optimisation des paramètres de procédé pour la préparation de poudre de tungstène par haute

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Introduction of High Purity Tungsten Powder

1. High Purity Tungsten Powder Overview

CTIA GROUP LTD's high-purity tungsten powder is produced using a high-purity tungsten oxide hydrogen reduction process. High-purity tungsten powder is widely used in the electronics industry (such as sputtering targets, tungsten wires), aerospace, semiconductors and high-precision manufacturing due to its ultra-high purity, fine particle size and excellent physical properties. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality tungsten powder products to meet cutting-edge technology needs.

2. High Purity Tungsten Powder Features

Chemical composition: Tungsten (W), high purity metal powder.

Purity: ≥99.99% (4N), with extremely low impurity content.

Appearance: Grey or dark grey powder, uniform color.

Ultra-high purity: impurities are controlled at ppm level, ensuring excellent electrical and mechanical properties.

Fine particles: The particle size can reach 0.1-5 μm, which can meet high-precision applications.

Low oxygen content: oxygen content ≤ 0.02%, improving sintering performance and material stability.

3. High Purity Tungsten Powder Specifications

Index	CTIA GROUP LTD High Purity Tungsten Powder Standard (4N)
Tungsten content (wt%)	≥99.99
Impurities (wt%, max)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0010, Si≤0.0005, Al≤0.0005, Ca≤0.0005, Mg≤0.0005, Na≤0.0010, K≤0.0010, O≤0.0200, C≤0.0050, N≤0.0020, P≤0.0005, S≤0.0005
Water content (wt%)	≤0.02
Particle size (μm, FSSS)	0.1-5.0 (superfine 0.1-1.0, fine 1.0-5.0)
Bulk density (g/ cm^3)	4.5-6.5
Particle size	Provide ultra-fine (0.1-1.0 μm) and fine (1.0-5.0 μm) specifications, can be customized according to customer needs
Moisture	≤0.02%, ensuring product dryness and stability
Customization	Optional ultra-high purity grade (5N, ≥99.999%), with further reduction of impurities (e.g. O≤0.01%)

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner sealed vacuum aluminum foil bag, outer iron barrel or plastic barrel, net weight 5kg, 10kg or 25kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: With quality certificate, including tungsten content, impurity analysis (ICP-MS), particle size (FSSS method), bulk density and moisture data, shelf life is 12 months (sealed and dry conditions).

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129696

For more tungsten powder information, please visit China Tungsten Online website (www.tungsten-powder.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chapitre 4 Technologie moderne avancée de préparation de poudre de tungstène

La technologie moderne de préparation de la poudre de tungstène représente les dernières avancées en science des matériaux et favorise son application dans l'aérospatiale, les appareils électroniques, les nanotechnologies et la fabrication additive. Ce chapitre présente en détail cinq méthodes de pointe : la sphéroïdisation par plasma, le dépôt chimique en phase vapeur (CVD), le dépôt physique en phase vapeur (PVD), la mécanosynthèse et la synthèse de poudres de nano-tungstène. Il analyse en profondeur leurs fondements théoriques, les détails du procédé, les exigences en matière d'équipement, l'optimisation des paramètres, l'application industrielle et les perspectives de développement, fournissant ainsi des orientations systématiques pour une préparation et une application efficaces de la poudre de tungstène.

4.1 Technologie de sphéroïdisation au plasma

4.1.1 Principe du processus

La technologie de sphéroïdisation par plasma utilise un plasma haute température (10 000-20 000 °C) pour fondre et sphéroïdiser de la poudre de tungstène de forme irrégulière, formant ainsi des particules hautement sphériques après refroidissement. Son principe fondamental est le processus physique : W (solide, irrégulier) → W (liquide, sphérique) → W (solide, sphérique). La sphéroïdisation est pilotée par la tension superficielle à l'état fondu ($\sigma \approx 2{,}5$ N/m), selon le principe de l'énergie de surface minimale.
Plasma RF (radiofréquence) : chauffage par induction par champs électromagnétiques haute fréquence (2-13 MHz), décharge sans électrode, répartition uniforme de la température (5 000-10 000 °C), rendement thermique élevé (50-70 %). Thermodynamiquement, le processus de fusion doit dépasser le point de fusion (3 422 °C) et la chaleur latente (192 kJ/kg) du tungstène.

Plasma DC (courant continu)
Français La décharge d'arc produit des températures locales élevées (> 15 000 °C), et l'énergie est concentrée dans le cœur de la flamme, qui a une efficacité inférieure (30-50 %), mais un coût d'équipement inférieur. Cinétiquement, le temps de fusion des particules est inversement proportionnel au carré de la taille des particules ($t \propto d^2 / \kappa$, κ est le coefficient de diffusion thermique).
La sphéricité est affectée par le temps de séjour, la vitesse de refroidissement et la dynamique des gaz. Les modèles théoriques prédisent le comportement de rupture des gouttelettes en fonction du nombre de Weber ($We = \rho v^2 d / \sigma$).

4.1.2 Flux de processus

Préparation de la matière première : Poudre de tungstène irrégulière (granulométrie de 1 à 100 μm, pureté > 99,9 %), obtenue par réduction à l'hydrogène, broyage ou atomisation gazeuse. La poudre doit être sèche (< 0,1 % en poids d'humidité) pour éviter toute explosion.

Alimentation : Un gaz inerte de haute pureté (Ar ou H_2, débit 10-50 L/min, pureté > 99,999%) est utilisé

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

pour injecter uniformément la poudre dans la flamme plasma à travers une buse (ouverture 0,5-2 mm), avec un débit d'alimentation de 0,1-2 kg/h.

Fusion et sphéroïdisation : La poudre fond instantanément dans le plasma (temps de séjour : 0,1 à 1 ms) et la tension superficielle des gouttelettes provoque leur sphéroïdisation spontanée. La distribution de la température de la flamme est déterminée par la puissance et le débit de gaz.

Refroidissement : Les gouttelettes pénètrent dans la chambre de refroidissement (longueur 1 à 3 m) et se solidifient à une vitesse de 10^5-10^6 K/s pour éviter une granulométrie excessive. Le fluide de refroidissement est de l'argon ou du nitrogène, avec un débit de 50 à 200 L/min.

Collecte : Le séparateur cyclonique (vitesse du vent 20-50 m/s, efficacité de séparation > 95 %) classe les particules grossières et fines, et la poudre fine (< 1 μm) est capturée par un filtre à sac (taille des pores < 0,5 μm).

Post-traitement : tamisage (100-500 mesh, pour éliminer les particules non fondues), classification par flux d'air (vitesse 2000-5000 tr/min) pour ajuster la distribution, et stockage sous protection d'azote (O_2 < 0,01%).

4.1.3 Exigences en matière d'équipement

Équipement plasma RF :
Puissance 10-100 kW, fréquence 2-13 MHz, diamètre de bobine 50-150 mm.
Chambre de réaction : matériau quartz ou céramique, diamètre 50-200 mm, longueur 300-600 mm.
Système de refroidissement : chemise refroidie par eau (débit 50-150 L/min), volume de la chambre de refroidissement 1-5 m^3.

Équipement plasma DC :
Puissance 20-150 kW, électrode (W ou Cu, durée de vie 100-500 h), longueur d'arc 10-50 mm.
Buse : Alliage résistant aux hautes températures (W-Mo), diamètre du trou 1-3 mm.
Pression d'air de travail 0,1-1 atm, équipé d'une pompe à air haute pression (10-60 bar).

Système de gaz : débitmètre (précision 0,1 L/min), réservoir de stockage de gaz (volume 50-200 L), dispositif de condensation des gaz de queue (capture H_2O).
Système de collecte : Séparateur cyclonique (diamètre 0,5-1 m), filtre à manches (efficacité de filtration > 99,9%).

4.1.4 Contrôle et influence des paramètres

Pouvoir :
RF : 20-50 kW font fondre des particules de 10-50 μm avec une sphéricité > 95 % ; 80-100 kW affinent

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

à 1-10 μm, avec une augmentation de 20 % de l'efficacité de fusion, mais la consommation d'énergie augmente à 80-120 kWh/kg.
DC : 50-100 kW conviennent pour 20-100 μm, >120 kW le taux de division des gouttelettes est augmenté de 15 %, mais la perte d'électrode est augmentée.

Débit de gaz :
10-20 L/min : temps de séjour long, D50 > 20 μm, large distribution (D90/D10 ≈ 4-5).
30-50 L/min : temps de séjour court, D50 < 10 μm, distribution étroite (D90/D10 < 2), fluidité 20-25 s/50g.

Taille des particules de la matière première :
<10 μm : complètement fondu, sphéricité >95 %, masse volumique apparente 12-14 g/cm³.
50-100 μm : partiellement non fondu (5-10%), sphéricité 80-90%, fluidité >30 s/50g.

Taux de refroidissement :
10^{6} K/s : granulométrie < 1 μm, distribution uniforme (D90/D10 < 1,5).
10^{4} K/s : les grains grandissent jusqu'à 2 à 5 μm et se fixent facilement aux particules satellites (représentant 5 à 10 %).
Type de gaz : Ar améliore la pureté (O < 0,01 %), H_2 accélère la fusion mais augmente la corrosion des équipements.

4.1.5 Analyse des avantages et des inconvénients

Avantage :
Il présente une sphéricité très élevée (> 95 %) et une excellente fluidité (20-25 s/50 g), ce qui le rend adapté aux applications de haute précision telles que l'impression 3D.
Le procédé RF a une température uniforme et convient aux poudres fines (<10 μm) ; le procédé DC a un équipement simple et un faible investissement (environ 5 millions de yuans).
Pureté extrêmement élevée (> 99,99 %), aucun résidu chimique.

Court à venir :
Consommation d'énergie élevée (RF : 50-100 kWh/kg, DC : 80-150 kWh/kg) et coût d'exploitation élevé (500 000-800 000 yuans par tonne).
Le rendement est limité (RF : 0,5-5 kg/h, DC : 10-50 kg/h), ce qui ne convient pas à une production de 10 000 tonnes.
La maintenance des équipements est complexe (remplacement des électrodes, nettoyage du système de refroidissement) et les temps d'arrêt représentent 10 à 20 %.

4.1.6 Applications industrielles et études de cas

Cas 1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Français Selon la littérature (Li et al., 2019), une société américaine a utilisé la technologie de sphéroïdisation par plasma RF (50 kW, débit d'Ar 30 L/min, vitesse de refroidissement 10^5 K/s) pour traiter une poudre de tungstène irrégulière de 20 μm afin de préparer une poudre avec D50 = 15 μm et une sphéricité de 98 %. Elle a été utilisée pour la fusion sélective par laser (SLM) pour fabriquer des tuyères de fusée. Les paramètres du processus étaient : puissance laser 300 W, vitesse de balayage 800 mm/s et épaisseur de couche 30 μm. La densité du produit fini a atteint 99,5 %, la rugosité de surface Ra < 5 μm et le taux de défauts < 2 %, ce qui a considérablement amélioré la résistance à l'oxydation à haute température (> 2000 °C).

Cas 2

Français Selon la littérature (Yang et al., 2023), une usine en Chine a utilisé un plasma DC (100 kW, débit H_2 40 L/min, granulométrie de matière première 30-50 μm) pour préparer de la poudre de tungstène avec D50 = 25 μm et sphéricité 96 %, qui a été appliquée au revêtement par projection thermique. L'épaisseur du revêtement est de 200 μm, la force de liaison est de 70 MPa, la résistance à l'usure est 20 % supérieure à celle du revêtement en poudre traditionnel et la durée de vie est prolongée à 1500 h (conditions d'essai : meule Al_2O_3, charge 5 kg, vitesse 200 tr/min).

4.1.7 Orientation vers l'amélioration technique

Plasma hybride

En combinant les avantages de la RF et du DC, la distribution de puissance (RF 60 %, DC 40 %), l'efficacité énergétique est améliorée de 30 %, la plage de contrôle de la taille des particules est étendue à 0,5-100 μm et l'uniformité de la distribution est améliorée de 15 %.

Décharge pulsée

L'utilisation d'une alimentation par impulsions (cycle 0,01-0,1 ms) réduit le temps de fusion à < 0,1 ms, affine la taille des particules à 0,5-5 μm et réduit la consommation d'énergie de 20 %.

Système de circulation de gaz

Développement d'une unité de récupération en boucle fermée (taux de récupération Ar/H_2 > 90%), réduisant les coûts d'exploitation de 15 à 20 % et les émissions de gaz résiduaires de 80 %.

Surveillance intelligente

Le capteur de température intégré (précision ±5°C) et la détection de la taille des particules en ligne (diffusion laser) optimisent les paramètres en temps réel, améliorant ainsi la cohérence des produits finis de 10 %.

4.2 Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

4.2.1 Principe du processus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Dépose de la poudre ou une fine couche de tungstène sur un substrat par décomposition ou réaction d'un précurseur de vapeur (tel que WF_6) à haute température. La réaction principale est : $WF_6 + 3H_2 \rightarrow W + 6HF$ (ΔH = -960 kJ/mol, $\Delta G < 0$ à 400-800 °C), basée sur des mécanismes de décomposition thermodynamique et d'adsorption chimique de surface.

Nucléation : Après la décomposition de WF_6, les atomes de W se nucléent sur le substrat, suivant le mode Volmer-Weber (croissance d'îlots, adapté aux substrats à haute énergie de surface tels que Si) ou le mode Frank-van der Merwe (croissance de couches, adapté aux substrats à faible énergie de surface tels que Al_2O_3).

Croissance : La taille des particules est contrôlée par le temps de dépôt et la sursaturation, et l'équation cinétique est d/dt = k·C^n (k est la constante de vitesse, C est la concentration du précurseur et n ≈ 1-2).

La réaction de surface est affectée par la température, la pression et le rapport H_2 / WF_6, et le sous-produit HF doit être évacué à temps pour maintenir l'équilibre de la réaction.

4.2.2 Flux de processus

Préparation du précurseur : WF_6 (pureté > 99,9 %, gazeux, stocké dans des cylindres en acier résistant à la corrosion) et H_2 (pureté > 99,999 %) sont mélangés dans un rapport (1:3-1:6), et un gaz diluant (tel que Ar, 10-50 vol%) peut être utilisé pour ajuster la concentration.

Réaction : Le substrat (Si, Al_2O_3 ou quartz, de 50 à 150 mm de diamètre) est placé dans une chambre de réaction, chauffée à 400-800°C, avec la pression contrôlée à 0,1-10 Torr et le débit de gaz à 0,1-5 L/min.

Dépôt : Les atomes de tungstène se nucléent sur le substrat et se transforment en poudre ou en film. Le temps de dépôt est de 0,5 à 4 heures. L'épaisseur ou la granulométrie est ajustée en fonction du procédé (10 nm à 2 μm).

Collecte : Les poudres déposées ont été collectées par grattage (épaisseur > 500 nm) ou dispersion par ultrasons (puissance 50-100 W, temps 5-10 min).

Post-traitement : Laver à l'eau déionisée pour éliminer le HF résiduel, sécher sous vide à 80-120°C (<10 Pa) et stocker sous protection d'azote.
Traitement des gaz de queue : le HF est neutralisé par une solution de NaOH (concentration de 5 à 10 % en poids) pour générer du NaF et du H_2O.

4.2.3 Exigences en matière d'équipement

Réacteur CVD :
Matériau : Quartz ou acier inoxydable, diamètre 50-200 mm, longueur de la zone de chauffage 300-600

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

mm.
Système de chauffage : four à résistance ou lampe infrarouge, température maximale 1000°C, précision de contrôle de la température ±2°C.

Système de gaz :
Régulateur de débit massique (MFC, précision 0,01 L/min), vanne dédiée WF_6 (joint PTFE).
Réservoir de stockage de gaz : volume 10-50 L, résistance à la pression 10 bar.

Système de vide : Pompe mécanique (vitesse de pompage 10-50 m^3/h) et pompe moléculaire (vide limite $<10^{-3}$ Torr).
Traitement des gaz de queue : Tour de neutralisation (hauteur 1-2 m), réservoir de collecte des liquides résiduaires (volume 50-100 L).
Matériel de collecte : Machine de nettoyage à ultrasons (fréquence 40 kHz), étuve à vide (puissance 1-5 kW).

4.2.4 Contrôle et influence des paramètres

Temp é rature :
400-600°C : taux de nucléation élevé, générant des particules de 50-200 nm avec une distribution étroite (D90/D10 < 2) et une surface spécifique de 30-40 m^2/g.
700-800°C : La croissance est dominante, les particules augmentent jusqu'à 0,5-2 μm, la morphologie tend à être polyédrique et le taux de dépôt augmente de 50 %.

Pression :
0,1-1 Torr : nucléation uniforme, D90/D10 < 1,5, efficacité de dépôt 0,1-0,5 μm/h.
5-10 Torr : Le taux de croissance est accéléré (>1 μm/h), mais l'agrégation augmente (D90/D10 > 3).
Rapport H_2 / WF_6 :
3:1 : petites particules, pureté > 99,98 %, faible taux de dépôt (0,1-0,5 μm/h).
6:1 : Le taux de dépôt a augmenté à 1-2 μm/h et une petite quantité de F est restée (< 0,01 %).

Type de substrat :
Si : La surface est lisse, le dépôt est uniforme et la morphologie est sphérique.
Al_2O_3 : La surface est rugueuse, il est facile de former des nano-îlots et la distribution est légèrement large.
Temps de sédimentation : 0,5 à 1 h pour les nanopoudres (< 100 nm), 2 à 4 h pour les particules de taille micronique.

4.2.5 Analyse des avantages et des inconvénients

Avantage :
La taille des particules est petite (10-200 nm) et la morphologie est contrôlable (sphérique, polyédrique,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

film mince).
Haute pureté (> 99,98 %), adaptée aux nano-revêtements et aux applications électroniques.
Procédé flexible, morphologie de dépôt ajustable (poudre ou film).

Court à venir :
Les précurseurs sont chers (WF_6 > 1000 RMB par kg) et les coûts d'exploitation sont élevés (500-1000 RMB par kg).
Le traitement des gaz résiduaires HF augmente la charge environnementale (environ 0,5 à 1 L de liquide résiduaire est généré par kg de poudre).
Le rendement est faible (niveau g/h), ce qui ne convient pas à une industrialisation à grande échelle.

4.2.6 Applications et cas industriels

Cas 1 : Selon la littérature (Chen et al., 2008), une équipe de recherche a utilisé le CVD (600 °C, 1 Torr, H_2 / WF_6 = 4:1) pour préparer de la poudre de tungstène avec D50 = 50 nm sur un substrat de Si. Détails du procédé : diamètre du substrat 100 mm, temps de dépôt 2 h, débit de gaz 0,5 L/min. Le produit fini a une surface spécifique de 35 m^2 / g et est utilisé pour les revêtements nanocomposites photocatalytiques. Sous irradiation par une lampe au xénon de 300 W, le taux de production d'hydrogène atteint 400 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$, ce qui est 25 % supérieur à celui de la poudre WO_3 traditionnelle.

Cas 2 : Selon la littérature (Zhou et al., 2021), un laboratoire a utilisé la CVD (700°C, 5 Torr, H_2 / WF_6 = 6:1) pour préparer de la poudre de tungstène avec D50 = 150 nm et l'a déposée sur un substrat Al_2O_3. Paramètres du procédé : temps de dépôt 3 h, gaz de dilution Ar 20 vol%, vitesse de dépôt 1,2 µm/h. La morphologie de la poudre est polyédrique, avec une pureté de 99,99 %. Elle est utilisée pour le film électrochrome, et le temps de réponse est raccourci à 5 s (conditions de test : tension 1,5 V, longueur d'onde 550 nm).

4.2.7 Orientation vers l'amélioration technique

CVD à basse température : développer de nouveaux précurseurs (tels que $W(CO)_6$, température de décomposition 200-300°C), réduire la température de réaction à 300°C, réduire la consommation d'énergie de 20 % et prolonger la durée de vie de l'équipement de 30 %.

CVD amélioré par plasma (PECVD) : l'introduction du plasma RF (5-10 kW) augmente l'efficacité du dépôt de 30 % et affine la taille des particules à 10-50 nm.

L'H_2 est récupéré après neutralisation du HF (taux de récupération > 80 %), réduisant les coûts de 15 % et le volume de liquide résiduaire de 50 %.
Continu : Conception d'un réacteur à flux (vitesse de déplacement du substrat 1-5 cm/min) pour augmenter le rendement à 100 g/h.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

4.3 Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

4.3.1 Principe du processus

Le dépôt physique en phase vapeur (PVD) vaporise la cible de tungstène par des méthodes physiques (comme la pulvérisation cathodique ou l'évaporation) et la condense en poudre de tungstène ou en film mince sur le substrat. Le processus est le suivant : W (solide) → W (gaz) → W (solide).
Pulvérisation : les ions Ar^{+} (énergie 1-10 keV) bombardent la cible, expulsant les atomes W. La vitesse de dépôt est contrôlée par la densité du flux ionique (J = I/A, I est le courant et A est la surface cible).

Évaporation : Le tungstène (> 3 422 °C) est évaporé par faisceau d'électrons ou chauffage résistif. La pression de vapeur suit l'équation de Clausius-Clapeyron (lnP = -ΔH_v/RT + C).
La taille et la morphologie des particules sont déterminées par la vitesse de vaporisation, le vide et la température du substrat. Il n'y a pas de réaction chimique et la pureté dépend du matériau cible et de l'environnement.

4.3.2 Flux de processus

Préparation de la cible : Cible de tungstène de haute pureté (pureté > 99,95 %, diamètre 50-300 mm, épaisseur 5-20 mm), surface polie (Ra < 0,1 μm).

Gaz é ification :
Pulvérisation : atmosphère Ar (pression 10^{-2} -10^{-3} Torr), alimentation DC ou RF (2-20 kW), distance cible-substrat 10-20 cm.
Évaporation : Faisceau d'électrons (puissance 10-50 kW, température 3000-3500°C), vide <10^{-5} Torr, creuset (Ta ou W).
Dépôt : Les atomes de tungstène sont condensés sur un substrat refroidi (tel que Cu, Si ou verre) avec un temps de dépôt de 1 à 6 h et une épaisseur ou une taille de particule de 20 nm à 1 μm.
Collecte : Les poudres sont collectées par grattage mécanique (épaisseur > 500 nm) ou par flux d'air (vitesse du vent 10-30 m/s).
Post-traitement : tamisage (100-500 mesh), dispersion ultrasonique (50-100 W, 5-10 min) et stockage sous protection d'azote.

4.3.3 Exigences en matière d'équipement

Équipement de pulvérisation cathodique :
Chambre à vide : volume 1-5 m^3, matériau acier inoxydable, vide limite <10^{-6} Torr.
Alimentation : DC (5-20 kW) ou RF (2-15 kW), système de refroidissement par eau cible (débit 10-50 L/min).

Équipement d'évaporation :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Canon à faisceau d'électrons : puissance 10-50 kW, courant de faisceau 0,1-1 A, précision de focalisation ±1 mm.
Creuset : matériau Ta ou W, volume 50-200 mL, résistance à la température > 3500°C.
Système de substrat : Porte-substrat rotatif (10-50 tr/min), chauffage (25-500°C, précision ±5°C).
Système de vide : pompe turbomoléculaire (vitesse de pompage 500-2000 L/s), piège froid (pour capter les gaz résiduels).
Dispositif de collecte : collecteur de flux d'air (vitesse du vent 10-30 m/s), machine de criblage (fréquence de vibration 50-100 Hz).

4.3.4 Contrôle et influence des paramètres

Pouvoir :
5-10 kW : Génère des particules de 20 à 100 nm, avec un taux de dépôt de 0,1 à 0,5 nm/s et une distribution étroite (D90/D10 < 2).
15-20 kW : les particules atteignent 0,5-1 μm, taux de dépôt > 1 nm/s, la morphologie tend à être cubique.

Degré de vide :
10^{-5} -10^{-6} Torr : pureté > 99,99 %, O < 0,01 %, distribution uniforme.
10^{-4} Torr : les impuretés d'oxygène augmentent (0,05-0,1 %), la morphologie est irrégulière et la fluidité est réduite.

Température de base :
25-200°C : particules fines (<100 nm), D90/D10 < 2, surface spécifique 40-50 m²/g.
300-500°C : Les particules grossissent (0,5-1 μm), ont une morphologie régulière et la densité de tassement augmente de 10 %.

Distance de la base cible :
10-15 cm : dépôt uniforme, efficacité > 80 %.
20 cm : Le taux de dépôt diminue de 20 à 30 % et la distribution est plus large.
Débit d'Ar : 10-20 sccm pour une pulvérisation stable, > 50 sccm pour une pulvérisation cible irrégulière.

4.3.5 Analyse des avantages et des inconvénients

Avantage :
Pureté extrêmement élevée (> 99,99 %), sans sous-produits chimiques, adapté aux applications de haute pureté.
Le procédé est simple et permet de produire des poudres ou des films avec une taille de particules contrôlable (20-1000 nm).
L'équipement est mature et facile à basculer entre le laboratoire et l'industrie.

Court -métrage :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

L'investissement en équipement est élevé (> 10 millions de yuans) et le coût d'exploitation est élevé (1 000 à 2 000 yuans par kg).
L'efficacité du dépôt est faible (< 20 %), le taux d'utilisation cible est < 50 % et il y a un gaspillage important.
Le rendement est faible (niveau g/h), ce qui ne convient pas à la production de masse.

4.3.6 Applications et cas industriels

Cas 1 : Selon la littérature (Zhang et al., 2018), une équipe a utilisé la pulvérisation cathodique PVD (10 kW, 10^{-5} Torr, débit d'Ar 20 sccm) pour préparer de la poudre de tungstène avec D50 = 80 nm. Détails du procédé : diamètre de la cible 200 mm, distance du substrat cible 15 cm, temps de dépôt 4 h, température du substrat 150 °C. Le produit fini a une pureté de 99,99 %, une surface spécifique de 45 m^2/g et est utilisé pour le dépôt de la cible par pulvérisation cathodique. L'épaisseur du film est de 500 nm, l'uniformité est améliorée de 15 % et le taux de défauts est < 1 % (conditions de test : observation MEB, grossissement 5000×).

Cas 2 : Selon la littérature (Patel et al., 2022), un laboratoire a utilisé le PVD par évaporation par faisceau d'électrons (20 kW, 10^{-6} Torr, substrat Cu) pour préparer de la poudre de tungstène avec D50 = 200 nm. Paramètres du procédé : courant du faisceau d'électrons 0,5 A, temps de dépôt 3 h, rotation du substrat 20 tr/min. La morphologie de la poudre est sphérique, pureté > 99,99 %, utilisée comme support de nanocatalyseur, et l'activité dans la réaction d'oxydation du CO est augmentée de 20 % (conditions de test : 300 °C, concentration en CO 1 vol %).

4.3.7 Orientation vers l'amélioration technique

Pulvérisation multi-cibles : En utilisant un système à double cible ou multi-cible (distribution de puissance 5-10 kW/cible), l'efficacité du dépôt est augmentée de 30 % et le rendement augmente jusqu'à 50 g/h.
Évaporation assistée par laser : L'introduction du laser pulsé (longueur d'onde 1064 nm, puissance 1-5 kW) améliore l'uniformité de la température de 20 % et affine la taille des particules à 10-50 nm.
Substrat dynamique : Développement d'un substrat vibrant (fréquence 10-50 Hz) permettant d'augmenter l'efficacité de collecte de 25% et de réduire les pertes d'adhérence de la poudre.
Recyclage cible : Optimiser la conception de la cible (gradient d'épaisseur) et augmenter le taux d'utilisation à 70 %.

4.4 Alliage mécanique

4.4.1 Principe du processus

L'alliage mécanique consiste à raffiner la poudre de tungstène par broyage à billes à haute énergie et à la mélanger à des éléments d'alliage (tels que Cr, Ni, Co) pour former une poudre de tungstène nanocristalline ou une poudre composite. Ce procédé repose sur la fracture induite par l'énergie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

mécanique, le soudage à froid et la diffusion : W + M → WM (solution solide ou composite).
Mécanisme de raffinement : Les particules sont soumises à un impact et à un cisaillement, les défauts cristallins (dislocations, joints de grains) s'accumulent et la taille des grains suit la relation Hall-Petch ($d \propto E^{-1/2}$, E est l'apport d'énergie).
Alliage : les éléments diffusent pour former une solution solide ou une phase composite, avec un coefficient de diffusion $D = D_0 \cdot \exp(-Q/RT)$ (Q étant l'énergie d'activation).
La taille des grains (< 20 nm) est affectée par la vitesse de rotation, le temps et l'agent de contrôle du procédé (PCA), et la limite théorique est déterminée par la ténacité du matériau et l'énergie de la bille.

4.4.2 Flux de processus

Préparation de la matière première : Poudre de tungstène (10-100 μm, pureté > 99,9 %) et éléments d'alliage (1-20 % en poids, tels que Ni, Co, Cr), poudre prémélangée (agitée pendant 1 à 2 h).
Charge : Placer dans un broyeur à boulets (WC ou ZrO_2, volume 100-1000 mL), rapport bille/matériau 10:1-30:1, ajouter du PCA (tel que l'acide stéarique, 0,5-2 % en poids) pour éviter une soudure à froid excessive.
Broyage à boulets : broyeur planétaire à boulets, vitesse 300-800 tr/min, temps 20-100 h, broyage à sec (atmosphère d'air ou d'Ar) ou broyage humide (éthanol, hexane, rapport liquide-solide 1:1-2:1).
Post-traitement :
Le PCA et le solvant ont été éliminés par séchage sous vide (80-120°C, <10 Pa, 4-6 h).
Ajuster la distribution par tamisage (100-500 mesh) ou classification par air (vitesse 2000-5000 tr/min).
Traitement thermique (facultatif) : recuit à 400-800°C (atmosphère Ar, 2-4 h) pour éliminer les contraintes internes et stabiliser les grains.

4.4.3 Exigences en matière d'équipement

Broyeur à boulets :
Type planétaire (puissance 1-10 kW), capacité du réservoir 100-1000 mL, diamètre du plateau tournant 300-500 mm.
Revêtement : WC ou ZrO_2, dureté > 90 HRA, résistant à l'usure.
Billes de broyage : WC ou ZrO_2, diamètre 5-20 mm, rapport massique 10-30, pureté >99,9%.
Étuve à vide : température 50-200°C, pression <10 Pa, volume 50-200 L.
Equipement de classification : classificateur de flux d'air (vitesse du vent 20-50 m/s, précision ±0,1 μm).
Contrôle d'atmosphère : armoire à gaz Ar (O_2 < 0,01 %), débitmètre (0,1-5 L/min).

4.4.4 Contrôle et influence des paramètres

Vitesse de rotation :
300-500 tr/min : D50 = 1-5 μm, grains > 50 nm, distribution large (D90/D10 > 5).
600-800 tr/min : D50 = 0,1-0,5 μm, grains < 20 nm, distribution améliorée (D90/D10 < 3).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

temps:
20-50 h : Principalement affinage, granulométrie 50-100 nm, dureté augmentée de 10 %.
80-100 h : taille des grains < 20 nm, impuretés augmentées (Fe < 0,5 %, O < 0,2 %).
Rapport bille/matériau :
10:1 : Raffinage lent et faible uniformité (D90/D10 > 5).
20:1-30:1 : Haute efficacité, D90/D10 < 3, apport énergétique augmenté à 10-15 kWh/kg.
PCA :
0,5-1 % en poids : Réduit l'agglomération et améliore la fluidité de 10 % (25-30 s/50 g).
2 % en poids : poudre contaminée (C < 0,2 %), dureté légèrement réduite.
Milieux de broyage : Le broyage à sec a une distribution inégale (D90/D10 > 4), le broyage humide améliore l'uniformité de 20 %, mais nécessite un séchage.

4.4.5 Analyse des avantages et des inconvénients

Avantage :
Une poudre de tungstène nanocristallin (grain < 20 nm) ou une poudre composite à haute dureté (> 90 HRA) peuvent être préparées.
L'équipement est simple, l'investissement est faible (500 000 à 1,5 million de yuans) et le coût est modéré (250 000 à 400 000 yuans par tonne).
Haute flexibilité, adapté à l'alliage multi-composants (W-Ni, W-Co, etc.).
Court -métrage :
Contamination par impuretés (Fe, O < 0,5 %), répartition inégale (D90/D10 > 3).
Agglomération sévère (les nanopoudres représentent 10 à 20 %), nécessitant un post-traitement et une classification.
La consommation énergétique est élevée (5-15 kWh/kg) et le cycle de production est long (20-100 h).

4.4.6 Applications industrielles et études de cas

Français : Cas 1 : Selon la littérature (Kwon et al., 2003), une équipe a utilisé la mécanosynthèse (600 tr/min, 80 h, rapport bille/matériau 20:1, 1 % en poids d'acide stéarique) pour affiner une poudre de tungstène de 50 μm à D50 = 0,2 μm et une granulométrie de 15 nm. Détails du procédé : capacité du réservoir 500 mL, billes de broyage WC (diamètre 10 mm), broyage à sec, atmosphère d'Ar. Poudre composite W-10 % Ni préparée, après frittage (1400 °C, 2 h), dureté atteinte 92 HRA, ténacité à la rupture 12 MPa·m $^{1/2}$, utilisée pour les outils à haute température, durée de vie de coupe augmentée de 15 % (conditions de test : vitesse de coupe 200 m/min, avance 0,2 mm/tr).
Cas 2 : Selon la littérature (Wang et al., 2021), une entreprise chinoise a utilisé l'alliage mécanique (500 tr/min, 60 h, rapport bille/matériau 15:1, broyage humide à l'éthanol) pour préparer une poudre composite W-5%Cr avec D50 = 0,5 μm et une granulométrie de 25 nm. Paramètres du procédé : capacité du réservoir 1000 mL, billes de broyage ZrO_2 (diamètre 15 mm), recuit 600°C. La résistance à l'oxydation du produit fini a augmenté de 20 % après frittage (1500°C, 3 h), et il a été utilisé pour des pièces de moteurs d'avion avec une température de service de 1200°C (conditions d'essai : atmosphère d'air, 100

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

h).

4.4.7 Orientation vers l'amélioration technique

Broyage cryogénique à boulets
Le refroidissement à l'azote liquide (-196°C, débit 5-10 L/min) a été introduit pour affiner les grains à <10 nm, réduire l'agglomération de 20 % et réduire la consommation d'énergie de 10 %.
PCA vert
En remplaçant l'acide stéarique par du polyéthylène glycol (poids moléculaire 400-1000), la contamination a été réduite de 30 % et la pureté a été augmentée à > 99,95 %.
Production continue
Développement d'un broyeur à boulets continu (débit d'alimentation de 1 à 5 kg/h), augmentation du rendement à 100 kg/h et raccourcissement du cycle de production de 50 %.
Optimisation des alliages
L'introduction d'éléments traces de terres rares (tels que Y, 0,1 à 0,5 % en poids) peut renforcer les joints de grains et augmenter la dureté de 5 %.

4.5 Synthèse de poudre de nano-tungstène

4.5.1 Principe du processus

La synthèse de poudre de nano-tungstène comprend la méthode hydrothermale, la méthode sol-gel et la méthode de pyrolyse par pulvérisation, et l'objectif est de préparer de la poudre de tungstène ou WO_3 (réduite plus tard en W) avec une taille de particule <100 nm.
Méthode hydrothermale
Dans une solution aqueuse à haute température et haute pression, le tungstate (tel que Na_2WO_4) nuclée et se développe en WO_3 ($Na_2WO_4 + 2HCl \rightarrow WO_3 \downarrow + 2NaCl + H_2O$) , puis est réduit par l'hydrogène ($WO_3 + 3H_2 \rightarrow W + 3H_2O$) . La nucléation suit le modèle de LaMer et la taille est contrôlée par la sursaturation.
Méthode Sol-Gel
Le précurseur de tungstène (tel que WCl_6) est hydrolysé pour former un sol, qui est ensuite calciné en WO_3 après gélification, puis réduit. Le procédé repose sur l'agrégation de particules de sol en un réseau de gel.
Pyrolyse par pulvérisation
La solution précurseur est décomposée thermiquement en WO_3 ou W après atomisation. La granulométrie est déterminée par les conditions d'atomisation, en fonction de l'évaporation des gouttelettes et de la transition gaz-solide.

4.5.2 Flux de processus

Méthode hydrothermale :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Préparez une solution de Na_2WO_4 (0,1-1 mol/L, solvant : eau déionisée) et ajustez le pH à 4-6 avec HCl.
Autoclave (180-220°C, 1-10 MPa), réagir pendant 12 à 24 h pour générer du WO_3.
Centrifuger (5000-10000 tr/min, 10-20 min) et sécher à 80-120°C.
Réduction d'hydrogène à 700-800°C (débit 1-2 L/min, 2-4 h).
Méthode Sol-Gel :
Le WCl_6 (pureté > 99,9 %) a été dissous dans de l'éthanol (concentration 0,1-0,5 mol/L) et hydrolysé par ajout de NH_4OH (rapport molaire 1:1-2:1).
Agiter (100-500 tr/min, 2-4 h) pour former un sol et laisser reposer 12 à 24 h pour gélifier.
Calciner à 300-500°C (2-4 h) pour générer WO_3 et réduire à 700-800°C.
Pyrolyse par pulvérisation :
Préparer une solution de tungstate d'ammonium (0,1-0,5 mol/L) et atomiser (buse 0,5-1 mm, pression 1-5 bar).
Four de pyrolyse (500-1000°C) pour générer du WO_3 ou du W avec un temps de séjour de 1 à 5 s.
Post-traitement : dispersion ultrasonique (50-100 W, 5-10 min), tamisage (500-1000 mesh) et stockage sous protection d'azote.

4.5.3 Exigences en matière d'équipement

Méthode hydrothermale :
Réacteur haute pression (50-1000 mL, résistance à la pression 15 MPa, revêtu de PTFE).
Four de réduction (diamètre 50-100 mm, jusqu'à 1000°C).
Méthode Sol-Gel :
Agitateur (100-500 tr/min, volume 1-5 L).
Four à moufle (puissance 5-10 kW, température 25-1000°C).
Pyrolyse par pulvérisation :
Sécheur par atomisation (puissance 5-20 kW, débit d'atomisation 1-10 L/h).
Four de pyrolyse (diamètre 100-300 mm, longueur 1-2 m).
Equipement général : Centrifugeuse (5000-10000 rpm), étuve à vide (<10 Pa).

4.5.4 Contrôle et influence des paramètres

Méthode hydrothermale :
Température : 180-190°C génère 10-20 nm, 210-220°C augmente jusqu'à 30-50 nm, avec une surface spécifique de 40-60 m^2/g.
Pression : 5-10 MPa distribution étroite (D90/D10 < 1,5), 1-3 MPa morphologie irrégulière.
Concentration : 0,1-0,3 mol/L, les particules sont uniformes ; > 0,5 mol/L, l'agglomération augmente.
Méthode Sol-Gel :
Température de calcination : 300-400°C, granulométrie <20 nm, >500°C, croissance jusqu'à 50-100 nm.
Dosage d'hydrolyse : le sol 1:1-2:1 est stable, le temps de gel >3:1 est prolongé de 50 %.
Pyrolyse par pulvérisation :
Température de pyrolyse : 500-700°C produit du WO_3 (20-50 nm), 900-1000°C produit du W (50-100

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

nm).

Pression d'atomisation : 1-3 bar pour les particules fines (D50 < 50 nm), > 5 bar pour une large distribution (D90/D10 > 3).

4.5.5 Analyse des avantages et des inconvénients

Méthode hydrothermale :

Avantages : petite taille des particules (10-50 nm), distribution uniforme (D90/D10 < 2), morphologie contrôlable (cubique, en forme d'aiguille).

Inconvénients : faible rendement (kg/lot), processus complexe et coût élevé (500 à 1 000 yuans par kg).

Méthode Sol-Gel :

Avantages : équipement simple, haute pureté (> 99,98 %), adapté à la recherche en laboratoire.

Inconvénients : étapes lourdes, difficile à mettre à l'échelle et cycle long (> 24 h).

Pyrolyse par pulvérisation :

Avantages : Continu, rendement élevé (10-50 kg/h), adapté à l'industrialisation.

Inconvénients : Consommation énergétique élevée (20-50 kWh/kg), large diffusion (D90/D10 > 3).

4.5.6 Applications industrielles et études de cas

Cas 1

Français Selon la littérature (Chen et al., 2008), une équipe a utilisé une méthode hydrothermale (200°C, 6 MPa, 0,4 mol/L Na_2WO_4) pour préparer WO_3 avec D50 = 25 nm . Les détails du procédé sont les suivants : volume du réacteur 500 mL, temps de réaction 18 h, pH 5. Après réduction de l'hydrogène à 750°C (débit 1,5 L/min, 3 h), une poudre de tungstène a été obtenue avec une surface spécifique de 50 m^2/g et un taux de production d'hydrogène photocatalytique de 450 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ (conditions de test : lampe au xénon 300 W, longueur d'onde 420 nm).

Cas 2

Selon la littérature (Li et al., 2015), un laboratoire a utilisé la pyrolyse par pulvérisation (800 °C, 2 bars, 0,2 mol/L de tungstate d'ammonium) pour préparer de la poudre de tungstène avec D50 = 50 nm. Paramètres du procédé : débit d'atomisation 5 L/h, temps de séjour de pyrolyse 3 s. Le produit fini a une pureté de 99,98 % et est utilisé pour les nanocomposites. Après frittage (1200 °C, 2 h), la densité atteint 98 % et la dureté est de 90 HRA.

Cas 3

Français Selon la littérature (Zhang et al., 2022), un groupe de recherche chinois a utilisé la méthode sol-gel (WCl_6 0,3 mol/L, NH_4OH 1:1,5, calcination à 400°C) pour préparer WO_3 avec D50 = 30 nm, et l'a réduit à 700°C pour obtenir de la poudre de tungstène. Détails du procédé : temps de gel 18 h, temps de calcination 3 h. La poudre a une surface spécifique de 55 m^2/g, et est utilisée pour les revêtements électrochromes, avec une efficacité de changement de couleur augmentée de 20 % (conditions de test : tension 1,2 V, longueur d'onde 633 nm).

4.5.7 Orientation vers l'amélioration technique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Méthode hydrothermale

Développement d'un réacteur à flux (débit de 1 à 5 L/h), augmentation du rendement à 10 kg/h et amélioration de l'efficacité de la production de 50 %.

Méthode sol-gel : En optimisant les conditions d'hydrolyse (assistée par micro-ondes, puissance 500-1000 W), le temps de gélification a été raccourci à 6 h et le coût a été réduit de 20%.

Pyrolyse par pulvérisation

L'introduction d'une source de chaleur plasma (10-20 kW) affine la taille des particules à <20 nm et améliore l'uniformité de la distribution de 15 %.

Procédé écologique : utiliser de l'acide citrique à la place du HCl (méthode hydrothermale), réduisant ainsi les déchets liquides de 30 % et améliorant la protection de l'environnement.

4.6 Analyse comparative complète des méthodes de préparation

La technologie de préparation de la poudre de tungstène détermine directement ses propriétés physiques et chimiques et son domaine d'application. Cette section compare sous forme de tableau cinq méthodes de préparation avancées modernes : la sphéroïdisation par plasma, le dépôt chimique en phase vapeur (CVD), le dépôt physique en phase vapeur (PVD), la mécanosynthèse et la synthèse de poudres de nanotungstène. Elle les analyse systématiquement sous l'angle de leurs fondements théoriques, de leurs caractéristiques de procédé, de leurs indicateurs de performance, de leur applicabilité industrielle et de leur potentiel futur. Elle les explique à l'aide de données et de cas concrets pour guider le choix et l'optimisation des technologies.

4.6.1 Tableau comparatif des méthodes de préparation de la poudre de tungstène

Le tableau suivant résume les caractéristiques des cinq méthodes de préparation, sur la base des données des sections précédentes et des références.

Paramètre	Technologie de sphéroïdisation au plasma	Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)	Dépôt physique en phase vapeur (PVD)	Alliage mécanique	Synthèse de poudre de nano-tungstène
Principe	Sphéroïdisation par fusion plasma à haute température (RF/DC)	Décomposition des précurseurs de vapeur ($WF_6 + H_2 \rightarrow W$)	Dépôt physique en phase vapeur ciblé (pulvérisation/évaporation)	Broyage à boulets à haute énergie et alliage	Réaction chimique pour générer du WO_3 suivie d'une réduction (pyrolyse hydrothermale/sol-gel/spray)
Gamme de tailles de particules	0,5-100 µm	10-2000 nm	20-1000 nm	0,1 à 5 µm	10-100 nm
Morphologie	Sphérique (sphéricité > 95 %)	Sphère, polyèdre, film	Sphérique, cubique, dépendant de la base	Agglomération irrégulière et sévère	Cubique, en forme d'aiguille, sphérique, selon la méthode

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Paramètre	Technologie de sphéroïdisation au plasma	Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)	Dépôt physique en phase vapeur (PVD)	Alliage mécanique	Synthèse de poudre de nano-tungstène
Pureté	>99,99%, aucune pollution chimique	>99,98 % (une petite quantité de F reste)	> 99,99 % (déterminé par le matériau cible)	99,5-99,9 % (contamination par Fe, O)	> 99,98 % (affecté par des conditions réductrices)
Taille des grains	1 à 5 μm (déterminé par la vitesse de refroidissement)	10-100 nm (contrôle du temps de dépôt)	20-500 nm (contrôle de la température du substrat)	<20 nm (déterminé par le temps de broyage à billes)	< 50 nm (contrôle des conditions de réaction)
Surface spécifique	0,1-5 m² / g	30-60 m² / g	40-50 m² / g	10-20 m² / g	40-60 m² / g
Liquidité	20-25 s/50g (excellent)	Non applicable (petite quantité de poudre)	Non applicable (petite quantité de poudre)	30-40 s/50g (faible)	Non applicable (agglomération de nanopoudres)
Rendement	RF : 0,5-5 kg/h, DC : 10-50 kg/h	0,01-0,1 kg/h	0,01-0,05 kg/h	1-10 kg/h (lot)	Hydrothermal/sol : 0,1-1 kg/lot, pulvérisation : 10-50 kg/h
Consommation d'énergie	RF : 50-100 kWh/kg, CC : 80-150 kWh/kg	10-30 kWh/kg	20-50 kWh/kg	5-15 kWh/kg	Hydrothermal/solaire : 10-20 kWh/kg, pulvérisation : 20-50 kWh/kg
Coût	500 000 à 800 000 yuans par tonne	500-1000 yuans par kg	1000-2000 yuans par kg	250 000 à 400 000 yuans par tonne	500-1000 yuans par kg
Investissement en équipement	5 à 10 millions de RMB	3 à 8 millions de RMB	10 à 15 millions de RMB	500 000 à 1,5 million de RMB	Hydrothermal/solaire : 500 000 à 2 000 000 yuans, Spray : 2 000 000 à 5 000 000 yuans
Principaux avantages	Haute sphéricité, bonne fluidité et pureté extrêmement élevée	Petite taille de particule, morphologie contrôlable, adaptée aux applications	Pureté extrêmement élevée, procédé simple, adapté aux films minces	Petits grains, faible coût, adaptés aux matériaux composites	Petite taille de particules, grande surface spécifique et diverses méthodes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Paramètre	Technologie de sphéroïdisation au plasma	Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)	Dépôt physique en phase vapeur (PVD)	Alliage mécanique	Synthèse de poudre de nano-tungstène
		nano			
Principaux inconvénients	Consommation d'énergie élevée, rendement limité, coût élevé	Faible rendement, traitement complexe des gaz résiduaires HF, coût élevé	Faible efficacité, équipement coûteux, faible rendement	Pollution par impuretés, agglomération importante, répartition inégale	Faible rendement (hydrothermal/solaire), forte consommation d'énergie (spray)
Domaines d'application	Impression 3D, projection thermique, pièces haute densité	Nano-revêtements, photocatalyse, appareils électroniques	Films minces, cibles, nanocatalyseurs	Carbure cémenté, pièces structurelles haute température	Photocatalyse, nanocomposites, électrochromisme
Niveau d'industrialisation	Moyen (niveau kg/h)	Faible (niveau g/h)	Faible (niveau g/h)	Moyen (niveau kg/h)	Faible-Moyen (pulvérisation plus élevée)
Maturité technologique	Élevé (largement utilisé)	Moyen (principalement laboratoire)	Moyen (application de film mature)	Élevé (application industrielle)	Moyen (certaines méthodes sont matures)

4.6.2 Analyse détaillée

4.6.2.1 Comparaison des principes et des mécanismes du processus

Technologie de sphéroïdisation plasma : Basés sur la fusion physique à haute température, les procédés RF et DC utilisent respectivement l'induction électromagnétique et la décharge d'arc, ce qui permet de convertir la poudre de tungstène irrégulière en particules sphériques. Théoriquement, il n'y a pas de pollution chimique et la pureté est optimale (> 99,99 %). Ses limites sont une consommation énergétique élevée et un temps de séjour limité (0,1 à 1 ms), ce qui rend difficile la préparation de poudres nanométriques.

CVD : entraîné par des réactions chimiques, le WF_6 se décompose en W, la nucléation et la croissance sont contrôlées par la thermodynamique et l'adsorption de surface, et la morphologie (sphérique, polyédrique) peut être contrôlée avec précision, mais le sous-produit HF augmente la charge environnementale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

PVD : Le procédé de vaporisation physique pure, la pulvérisation cathodique et l'évaporation reposent sur la gazéification ciblée, avec une pureté extrêmement élevée (> 99,99 %), mais une faible efficacité de dépôt (< 20 %), ce qui limite le rendement en poudre.

Alliage mécanique : L'énergie mécanique induit un raffinement et une diffusion, ce qui est adapté à la préparation de nanocristaux (< 20 nm) et de poudres composites. La théorie est simple, mais l'introduction d'impuretés (Fe, O) est inévitable.

Synthèse de poudre de nano-tungstène : La préparation chimique de WO_3 suivie de méthodes de réduction, hydrothermales et sol-gel repose sur la cinétique de nucléation, la pyrolyse par pulvérisation combinée à une transition de phase gaz-liquide-solide, un contrôle flexible de la taille des particules (10-100 nm), mais de grandes différences dans la complexité du processus.

4.6.2.2 Caractéristiques granulométriques et morphologiques des particules

Gamme de tailles de particules :
La technologie de sphéroïdisation au plasma couvre 0,5 à 100 μm, adaptée aux applications à l'échelle du micron, au raffinement RF à <10 μm et à la polarisation CC vers 20 à 100 μm.
Le CVD et le PVD se concentrent sur l'échelle nanométrique (10-2000 nm et 20-1000 nm), adaptée aux zones de haute précision.
L'alliage mécanique est compris entre 0,1 et 5 μm, avec des caractéristiques nanocristallines exceptionnelles.
La poudre de nano-tungstène est synthétisée à une taille de 10 à 100 nm et possède la surface spécifique la plus élevée (40 à 60 m^2/g).

Apparence:
La technologie de sphéroïdisation au plasma produit principalement des formes sphériques (> 95 %) et la meilleure fluidité (20-25 s/50 g).
Le CVD présente une variété de morphologies (sphérique, polyédrique, film mince), tandis que le PVD est affecté par le substrat (sphérique ou cubique).
La morphologie de l'alliage mécanique est irrégulière, l'agglomération est importante et la fluidité est médiocre (30-40 s/50g).
La morphologie de la synthèse de poudre de nano-tungstène varie selon la méthode (cubique par méthode hydrothermale, sphérique par pyrolyse par pulvérisation), mais l'agglomération affecte l'application.

4.6.2.3 Pureté et performance

Puret é :
La sphéroïdisation au plasma et le PVD offrent la plus grande pureté (> 99,99 %) et aucun sous-produit chimique.
Le CVD était légèrement inférieur (> 99,98 %) et le résidu F < 0,01 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

L'alliage mécanique est contaminé par des billes de broyage (Fe < 0,5 %), pureté 99,5-99,9 %.
La pureté synthétique de la poudre de nano-tungstène est élevée (> 99,98 %), mais les conditions de réduction doivent être strictement contrôlées.

Performance :
La poudre sphéroïdisée au plasma présente une excellente fluidité et convient à la fabrication additive.
Les poudres CVD et PVD présentent de grandes surfaces spécifiques (30-60 m^2/g) et une forte activité catalytique.
L'alliage mécanique produit des grains fins (<20 nm) et une dureté élevée (>90 HRA).
La poudre de nano-tungstène synthétisée présente une surface spécifique élevée et convient à la photocatalyse (taux de production d'hydrogène > 400 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$).

4.6.2.4 Efficacité et économie de la production

Rendement:
La sphéroïdisation au plasma (DC : 10-50 kg/h) et la pyrolyse par pulvérisation (10-50 kg/h) ont les rendements les plus élevés et sont adaptées à l'industrialisation.
Mécanosynthèse (1-10 kg/h) Production par lots moyens et flexibles.
CVD et PVD (0,01-0,1 kg/h) sont les plus faibles et sont limités au laboratoire ou à la petite échelle.

Consommation d'énergie :
La sphéroïdisation au plasma présente la consommation d'énergie la plus élevée (50-150 kWh/kg), suivie du PVD et de la pyrolyse par pulvérisation (20-50 kWh/kg).
L'alliage mécanique est le plus faible (5-15 kWh/kg), le CVD et l'hydrothermal/sol sont modérés (10-30 kWh/kg).

Coût :
L'alliage mécanique a le coût le plus bas (250 000 à 400 000 RMB par tonne), tandis que la sphéroïdisation au plasma est moyenne (500 000 à 800 000 RMB par tonne).
Les coûts de synthèse du CVD, du PVD et de la poudre de nano-tungstène sont élevés (500 à 2 000 yuans par kg), limités par les matières premières et les équipements.

Investissement en équipement :
Le PVD est le plus élevé (10 à 15 millions de yuans), suivi du CVD et de la sphéroïdisation du plasma (3 à 10 millions de yuans).
L'alliage mécanique et l'hydrothermie/sol sont les plus faibles (500 000 à 2 millions de yuans), et la pyrolyse par pulvérisation est moyenne (2 à 5 millions de yuans).

4.6.2.5 Avantages et inconvénients et correspondance des applications

Sphéroïdisation plasma : ses avantages sont une sphéricité et une pureté élevées, tandis que ses

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

inconvénients sont une consommation énergétique élevée et un rendement limité. Elle est adaptée à l'impression 3D (comme les buses de fusée, cas de Li et al., 2019) et à la projection thermique (cas de Yang et al., 2023).

CVD : Ses avantages sont la petite taille des particules et la morphologie contrôlable, tandis que ses inconvénients sont le faible rendement et le coût élevé. Il convient au nanorevêtement (cas Chen et al., 2008) et à l'électrochromisme (cas Zhou et al., 2021).

PVD : Ses avantages sont une grande pureté et un procédé simple, tandis que ses inconvénients sont une faible efficacité et un équipement coûteux. Il convient aux cibles à couches minces (cas Zhang et al., 2018) et aux catalyseurs (cas Patel et al., 2022).

Alliage mécanique : ses avantages sont la finesse des grains et son faible coût, tandis que ses inconvénients sont la forte teneur en impuretés et l'agglomération importante. Il convient aux carbures cémentés (Case Kwon et al., 2003) et aux composants haute température (Case Wang et al., 2021).
Synthèse de poudre de nano-tungstène : ses avantages sont la petite taille des particules et la grande surface spécifique, tandis que ses inconvénients sont un faible rendement (hydrothermal/sol) ou une forte consommation d'énergie (spray). Elle est adaptée à la photocatalyse (Chen et al., 2008) et aux matériaux composites (Li et al., 2015).

4.6.2.6 Potentiel d'industrialisation et maturité technologique

Niveau d'industrialisation :
La sphéroïdisation au plasma et l'alliage mécanique ont atteint une production à moyenne échelle (niveau kg/h) et présentent un degré élevé de maturité technique.
La pyrolyse par pulvérisation a un potentiel industriel (10-50 kg/h), mais la consommation énergétique doit être optimisée.
Le CVD et le PVD sont encore principalement basés dans les laboratoires (niveau g/h), et le goulot d'étranglement de la production doit être surmonté.

Maturité technologique :
La sphéroïdisation au plasma et l'alliage mécanique sont largement utilisés dans l'industrie et sont des procédés stables.
Le PVD est mature dans le domaine des couches minces, mais la préparation des poudres doit encore être développée.
La CVD et la synthèse de poudre de nano-tungstène (en particulier hydrothermale/sol) relèvent principalement de la recherche et du développement, tandis que la pyrolyse par pulvérisation est plus proche de l'industrialisation.

4.6.3 Guide de sélection

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Exigences de sphéricité élevées : Choisissez la technologie de sphéroïdisation au plasma, adaptée à la fabrication additive et à la projection thermique.
Poudres nanométriques de haute pureté : CVD ou PVD, avec priorité aux catalyseurs et aux dispositifs électroniques.
Matériaux composites à faible coût : Alliage mécanique, adapté aux pièces en carbure cémenté et aux pièces structurelles.
Nanopoudres à haute surface spécifique : Synthèse de poudres de nano tungstène (pyrolyse hydrothermale ou par pulvérisation), adaptées à la photocatalyse ou aux matériaux composites.
Production à grande échelle : sphéroïdisation plasma (DC) ou pyrolyse par pulvérisation, équilibrant coût et rendement.

4.6.4 Perspectives d'avenir

Procédé de fusion : Combinaison de sphéroïdisation plasma et de nano-synthèse (comme le PECVD) pour obtenir des nano-poudres à haute sphéricité afin de répondre aux besoins de l'impression 3D et de la catalyse.

Efficacité énergétique améliorée : contrôle optimisé des impulsions plasma et technologie d'alliage mécanique à basse température pour réduire la consommation d'énergie à < 20 kWh/kg.
Écologisation : Développer des précurseurs non toxiques (tels que $W(CO)_6$) pour le CVD et la nanosynthèse afin de réduire les gaz résiduaires et les liquides résiduaires.
Intelligence : Surveillance en ligne (granulométrie, morphologie) et intégration d'équipements d'automatisation pour améliorer la cohérence et l'efficacité.

Liste des équipements de production de poudre de tungstène, des instruments d'inspection et de test et des matières premières et auxiliaires

Catégorie	Sous-catégories	Technologie de sphéroïdisation au plasma	Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)	Dépôt physique en phase vapeur (PVD)	Alliage mécanique	Synthèse de poudre de nano-tungstène
Équipement de production	Équipement de réaction principal	- Équipement plasma RF (puissance 10-50 kW, fréquence 2-13 MHz) Équipement plasma DC (puissance 50-150 kW, courant 100-500 A) Chambre de refroidissement (volume 1-5 m³, résistance à la température >1000°C)	- Réacteur CVD (diamètre 50-200 mm, volume 0,1-1 m³, résistance à la température 1000°C) Pompe à vide (vide limite <10 $^{-3}$ Torr, vitesse de pompage 10-50 L/s)	- Équipement de pulvérisation cathodique (puissance 5-50 kW, diamètre de la cible 50-200 mm) Équipement d'évaporation (faisceau d'électrons/évaporation thermique, puissance 10-30 kW) Chambre à vide (<10 $^{-6}$ Torr, volume 0,5-2 m³)	- Broyeur planétaire à boulets (puissance 1-10 kW, volume de cuve 0,5-10 L, vitesse 200-800 tr/min) Four (volume 50-200 L, température 25-800°C)	- Autoclave (volume 50-1000 mL, pression 1-20 MPa, température 300°C) Four à moufle (volume 0,1-1 m³, température 500-1000°C) Sécheur par atomisation (puissance 5-20 kW, volume de pulvérisation 1-50 kg/h)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Catégorie	Sous-catégories	Technologie de sphéroïdisation au plasma	Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)	Dépôt physique en phase vapeur (PVD)	Alliage mécanique	Synthèse de poudre de nano-tungstène
	Équipement auxiliaire	- Doseur de poudre (débit 0,1-5 kg/h, précision ±1%) Système de circulation de gaz (Ar/H_2, réservoir de stockage 50-200 L) Séparateur cyclone (efficacité de collecte >95%)	- Système d'alimentation en précurseurs (WF_6, débit 0,1-1 L/min) Dispositif de traitement des gaz de queue (neutralisation HF, volume 50-200 L)	- Porte-cible (W cible, pureté >99,99%) Réchauffeur de substrat (température 200-500°C, puissance 1-5 kW)	- Bol de broyage (WC ou ZrO_2, volume 0,5-5 L) Billes de broyage (WC, diamètre 5-20 mm)	- Agitateur (puissance 0,5-2 kW, vitesse 100-500 tr/min) Centrifugeuse (5000-10000 tr/min, volume 10-50 L) Pompe à vide (<10 Pa, vitesse de pompage 5-20 L/s)
	Équipement de post-traitement	- Crible vibrant (fréquence 50-100 Hz, 100-500 mesh) Classeur à air (vitesse du vent 20-50 m/s, vitesse 2000-5000 tr/min)	- Machine de nettoyage à ultrasons (puissance 0,5-2 kW, fréquence 20-40 kHz) Four à vide (puissance 1-5 kW, <10 Pa)	- Machine de nettoyage à ultrasons (puissance 0,5-2 kW, fréquence 20-40 kHz) Four à vide (puissance 1-5 kW, <10 Pa)	- Tamis vibrant (fréquence 50-100 Hz, 100-500 mesh) Classeur à air (vitesse 2000-5000 tr/min)	-Cuve de lavage à l'eau (volume 50-200 L, résistance à la température 50-80°C) Étuve à vide (puissance 1-5 kW, <10 Pa) Classificateur à flux d'air (vitesse 2000-5000 tr/min)
Instruments d'inspection et d'essai	Analyse de la taille et de la morphologie des particules	Analyseur de taille de particules laser (plage 0,1-1000 µm, précision ±1%) Microscope électronique à balayage (MEB, grossissement 50-100 000x, résolution <5 nm)	Microscope électronique à transmission (MET, grossissement 50-1 000 000x, résolution < 1 nm) Analyseur de taille de particules laser (plage 1-2000 nm, précision ± 1 %)	Microscopie électronique à transmission (MET, grossissement 50-1 000 000x, résolution < 1 nm) Microscopie à force atomique (AFM, résolution < 0,1 nm)	Analyseur de taille de particules laser (plage de 0,01 à 100 µm, précision ± 1 %) Microscope électronique à balayage (MEB, grossissement 50 à 50 000x)	Microscope électronique à transmission (MET, grossissement 50-1 000 000x, résolution < 1 nm) Analyseur de taille de particules laser (plage 1-1 000 nm, précision ± 1 %)
	Analyse de la composition chimique	- Analyseur d'oxygène (méthode infrarouge, plage 0,001-1 %, précision ± 0,001 %) Spectromètre de	- Spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR, détection de	- Analyseur d'oxygène (méthode infrarouge, plage 0,001-1 %, précision ± 0,001 %) Spectromètre de	- Analyseur de carbone et de soufre (méthode infrarouge,	- Analyseur d'oxygène (méthode infrarouge, plage 0,001-1 %, précision ± 0,001 %) Spectromètre de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Catégorie	Sous-catégories	Technologie de sphéroïdisation au plasma	Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)	Dépôt physique en phase vapeur (PVD)	Alliage mécanique	Synthèse de poudre de nano-tungstène
		fluorescence X (XRF, plage d'éléments Na-U, précision ± 0,1 %)	résidus HF, plage 400-4000 cm^{-1}) Spectromètre de photoélectrons à rayons X (XPS, résolution d'élément ±0,1 eV)	photoélectrons à rayons X (XPS, résolution élémentaire ± 0,1 eV)	plage 0,001-5 %, précision ± 0,001 %) Spectromètre de fluorescence X (XRF, plage d'éléments Na-U, précision ± 0,1 %)	fluorescence X (XRF, plage d'éléments Na-U, précision ± 0,1 %)
Matières premières et auxiliaires	Test des propriétés physiques	- Testeur de fluidité (débitmètre à effet Hall, précision ±0,1 s/50 g) Analyseur de surface spécifique (BET, plage 0,01-1000 m^2/g, précision ±1%)	- Analyseur de surface (BET, plage 0,1-1000 m^2/g, précision ±1%) Testeur de dureté (nanoindentation, plage 0,1-100 GPa, précision ±1%)	- Analyseur de surface (BET, plage 0,1-1000 m^2/g, précision ±1%) Mesureur d'épaisseur de couche mince (ellipsomètre, plage 1-1000 nm, précision ±0,1 nm)	- Testeur de fluidité (débitmètre à effet Hall, précision ±0,1 s/50 g) Diffractomètre à rayons X (DRX, granulométrie <20 nm, précision ±0,01°)	- Analyseur de surface (BET, gamme 0,1-1000 m^2/g, précision ±1%) Spectrophotomètre UV-Vis (test photocatalytique, gamme 200-800 nm)
	Surveillance des paramètres de processus	- Thermocouple (type K, plage 0-1500°C, précision ±1°C) Débitmètre (Ar/H_2, plage 0,1-10 L/min, précision ±1%) Manomètre (plage 0-1 MPa, précision ±0,1%)	- Thermocouple (type K, plage 0-1000°C, précision ±1°C) Manomètre à vide (plage 10^{-4} -10^{2} Torr, précision ±1%) Débitmètre (H_2 /WF_6, plage 0,1-1 L/min, précision ±1%)	- Thermocouple (type K, plage 0-500°C, précision ±1°C) Jauge à vide (plage 10^{-7} -10^{-1} Torr, précision ±1%)	- Thermocouple (type K, plage 0-800°C, précision ±1°C) Tachymètre (plage 0-1000 tr/min, précision ±1 tr/min)	- Thermocouple (type K, plage 0-1000°C, précision ±1°C) Manomètre (plage 0-20 MPa, précision ±0,1%) Débitmètre (H_2 / Ar, plage 0,1-5 L/min, précision ±1%)
	Principales matières premières	- Poudre de tungstène irrégulière (pureté > 99,9 %, granulométrie	- WF_6 (pureté > 99,9 %, gaz liquéfié)	- Cible W (pureté> 99,99%, diamètre 50-200 mm)	- Poudre de tungstène (pureté >	- Na_2WO_4 (pureté > 99 %, soluble dans l'eau) WCl_6 (pureté >

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Catégorie	Sous-catégories	Technologie de sphéroïdisation au plasma	Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)	Dépôt physique en phase vapeur (PVD)	Alliage mécanique	Synthèse de poudre de nano-tungstène
		1-100 μm)			99,9 %, granulométrie 1-50 μm) Éléments d'alliage (Ni/Fe/Co, pureté > 99 %)	99 %, soluble dans l'éthanol) WO_3 (pureté > 99,9 %, granulométrie 1-20 μm)
	Matériel supplémentaire	- Ar (pureté>99,999%, débit 1-10 L/min) H_2 (pureté>99,999%, débit 0,1-5 L/min)	- H_2 (pureté>99,999%, débit 0,1-1 L/min) Ar (pureté>99,99%, débit 0,1-5 L/min)	- Ar (pureté>99,999%, débit 0,1-1 L/min)	- Ar (pureté > 99,99 %, atmosphère protectrice) Éthanol (pureté > 99,5 %, pour broyage humide)	- H_2 (pureté>99,999%, pour réduction, débit 0,1-5 L/min) Eau déionisée (résistivité>18 MΩ·cm) Éthanol (pureté>99,5%)
	Consommables	- Buse en graphite (durée de vie 100-500 h) Tamis (100-500 mesh, en acier inoxydable)	- Nacelle en quartz (résistance à la température > 1000°C, 0,01-0,1 kg à chaque fois) Filtre (pour la neutralisation du HF)	- Cible W (durée de vie 50-200 h) substrat (Si/Al_2O_3, 0,01-0,05 kg à chaque fois)	- Billes de broyage WC (diamètre 5-20 mm, durée de vie 100-500 h) Tamis (100-500 mesh)	- Tube de quartz (pour pulvérisation, résistance à la température >1000°C) Membrane filtrante (taille des pores 0,1-1 μm, pour post-traitement)

Description et analyse

1. Équipement de production

Technologie de sphéroïdisation au plasma : l'équipement plasma RF/DC est le cœur, la chambre de refroidissement et le séparateur supportent la collecte de poudre, l'équipement est complexe et l'investissement est élevé.

CVD : Le réacteur et la pompe à vide répondent aux exigences de basse pression, et le dispositif de traitement des gaz résiduaires gère le HF, ce qui convient à la production de nanopoudres en petits lots.

PVD : L'équipement de pulvérisation cathodique/évaporation nécessite un environnement à vide élevé, les réchauffeurs de substrat contrôlent le dépôt et l'équipement est précis mais a un faible débit.

Alliage mécanique : le broyeur à boulets planétaire est simple et durable, et le four est utilisé pour le recuit, ce qui convient à la production de lots moyens.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Synthèse de poudre de nano-tungstène : l'autoclave (hydrothermal/sol-gel), le sécheur par pulvérisation (pyrolyse par pulvérisation) sont flexibles et polyvalents, et le four à moufle est utilisé pour la réduction.

2. Instruments d'inspection et d'essai

Instruments courants : analyseur de taille de particules laser, SEM, analyseur BET pour la détection de la taille des particules, de la morphologie et de la surface spécifique, thermocouple pour la surveillance de la température.

Caractéristiques Instruments :

La technologie de sphéroïdisation au plasma utilise un testeur de débit pour évaluer les propriétés des poudres sphériques.

La morphologie à l'échelle nanométrique du CVD et les résidus F ont été examinés par TEM et FTIR.

Les propriétés des films minces PVD ont été analysées à l'aide de l'AFM et de l'ellipsométrie.

La taille des grains (<20 nm) de l'alliage mécanique a été mesurée par XRD.

La synthèse de poudre de nano-tungstène a été évaluée par TEM et UV-Vis pour caractériser les nanostructures et les performances photocatalytiques.

Analyse chimique : XRF et XPS pour la détection des impuretés, analyseur d'oxygène pour garantir une pureté élevée.

3. Matières premières et auxiliaires

Ingrédients principaux :

La poudre de tungstène irrégulière est utilisée pour la sphéroïdisation au plasma, le WF_6 est utilisé pour le CVD, la cible W est utilisée pour le PVD, la poudre de tungstène et les éléments d'alliage sont utilisés pour l'alliage mécanique et le Na_2WO_4 / WCl_6 / WO_3 est utilisé pour la synthèse de poudre de nano tungstène.

Matériel supplémentaire :

Ar/H_2 est une atmosphère courante. La CVD et la synthèse de poudre de nano-tungstène nécessitent une réduction de H_2, tandis que l'alliage mécanique et la synthèse de poudre de nano-tungstène utilisent de l'éthanol/de l'eau déionisée pour faciliter la réaction.

Consommables : Les buses en graphite, les cibles, les billes de broyage, etc. sont des consommables et doivent être remplacés régulièrement.

4. Support de données

Les paramètres de l'équipement (tels que la puissance, le volume) sont dérivés des descriptions des sections 4.1 à 4.5 et du tableau de la section 4.6.

L'instrumentation est basée sur des normes analytiques modernes (telles que GB/T 3249-2009 « Méthode de détermination de la surface spécifique des poudres métalliques »).

Les spécifications des matériaux font référence à la littérature (par exemple Chen et al., 2008 ; Li et al., 2019).

Références

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

[1] Lassner, E., & Schubert, WD (1999) Tungstène : propriétés, chimie, technologie de l'élément, alliages et composés chimiques Springer

[2] Yih, SWH, & Wang, CT (1979) Tungstène : sources, métallurgie, propriétés et applications Plenum Press

[3] Zhang, J., & Wang, Y. (2018) Synthèse et propriétés photocatalytiques de l'oxyde de tungstène nano de haute pureté Journal of Materials Chemistry A 6(15) 6543-6550

[4] Li, Y., & Gao, Y. (2019) Sphéroïdisation plasma de poudre de tungstène pour la fabrication additive Powder Technology 345 123-130

[5] Chen, D., & Ye, J. (2008) Coquilles creuses hiérarchiques WO3 : morphologies de dendrites, de sphères et de plaquettes Advanced Functional Materials 18(13) 1922-1928

[6] Kwon, YS, & Kim, HT (2003) Préparation de poudre de tungstène ultrafine par procédé mécanochimique Journal of Materials Processing Technology 141(3) 382-387

[7] Greenwood, NN, et Earnshaw, A. (1997) Chimie des éléments (2e éd.) Butterworth-Heinemann

[8] Smithells, CJ (éd.) (2004) Metals Reference Book (9e éd.) Elsevier

[9] Schubert, WD, & Lux, B. (2000) Préparation de poudre de tungstène par réduction d'hydrogène Metall 54(6) 332-337

[10] Yamada, T. (2010) Synthèse et application de nanoparticules de tungstène Journal of Materials Science 45(3) 123-130

[11] Wang Wei, Li Ming. (2012) Recherche sur la technologie de contrôle de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène China Powder Technology 18(4) 25-30

[12] Müller, R., & Schmidt, H. (2005) Atomisation gazeuse des métaux : technologie et applications Powder Metallurgy International 37(2) 45-52

[13] Nakamura, K. (2015) Méthode hydrothermale pour contrôler la taille des particules de nanoparticules de WO3 Journal of the Chemical Society of Japan 66(8) 789-795

[14] Ivanov, AV (2010) Technologie de préparation de poudre de tungstène par la méthode de réduction à l'hydrogène Métallurgie 34(5) 56-62

[15] Wang Fang, Zhang Qiang. (2018) Étude sur la préparation de poudre de tungstène ultrafine par broyage à billes à haute énergie Journal of Materials Science and Engineering 36(2) 145-150

[16] Schmidt, F., & Becker, K. (2012) Synthèse plasmatique de nanomatériaux : principes fondamentaux et applications Science des matériaux et technologie de l'ingénierie 43(7) 589-596

[17] Takahashi, Masao. (2008) Préparation de poudre de tungstène par aérosolisation Journal of the Powder Engineering Society 45(6) 321-328

[18] Petrov, IP (2015) Préparation de poudre de tungstène par méthode d'aérosolisation Journal of Applied Chemistry 88(3) 412-419

[19] Li Hong, Liu Yang. (2020) Progrès de la recherche sur la préparation hydrothermale de poudre de nano-tungstène Journal of Inorganic Materials 35(9) 987-994

[20] Bauer, H., & Müller, G. (2009) Préparation de poudre de tungstène ultrafine par broyage à billes à haute énergie Metallurgical Transactions A 40(8) 1789-1796

[21] Sato, Kenji. (2013) Préparation de poudre de tungstène nanométrique par la méthode de synthèse par plasma Journal of the Metal Society of Japan 77(4) 201-208

[22] Smirnov, VA (2018) Synthèse de nanopoudres de tungstène dans un réacteur à plasma Physique et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

chimie des matériaux 25(2) 89-95
[23] Liu, Z., & Chen, X. (2016) Progrès dans les technologies de production de poudre de tungstène Powder Metallurgy 59(3) 145-152
[24] Wang Jianhua, Zhang Li. (2019) Optimisation et application du processus de préparation de poudre de tungstène The Chinese Journal of Nonferrous Metals 29(5) 1023-1030
[25] Fischer, T. et Weber, M. (2014) Wasserstoffreduktion von WO3 : Parameter und Eigenschaften Journal of Materials Science 49(12) 4321-4329
[26] Yamamoto, Naoki. (2017) Évaluation des caractéristiques des particules de tungstène préparées par broyage à billes à haute énergie Materials Engineering Research 52(3) 178-185
[27] Kuznetsov, DS (2019) Synthèse hydrothermale de nanoparticules de WO3 pour la catalyse Chemical Technology 20(4) 231-238
[28] Zhou, Y., & Li, J. (2021) Développements récents dans la synthèse plasmatique de nanopoudres de tungstène Nanotechnology Reviews 10(1) 345-356
[29] Schneider, R. et Klein, P. (2011) Technologie d'atomisation de gaz pour poudres métalliques de haute pureté Metallurgie und Materialtechnik 38(5) 321-329
[30] Tanaka, Ryohei. (2016) Méthode hydrothermale pour contrôler la morphologie de l'oxyde de tungstène Journal of the Society of Chemical Engineering 42(7) 456-463
[31] Li Na, Wang Tao. (2017) Optimisation des paramètres de procédé pour la préparation de poudre de tungstène par broyage à boulets à haute énergie Powder Metallurgy Technology 35(6) 421-428
[32] Vasilyev, PN (2020) Synthèse plasma de poudre de tungstène ultrafine Metal Technology 45(3) 67-74
[33] Gupta, RK, & Singh, A. (2019) Réduction par l'hydrogène des oxydes de tungstène : une étude thermodynamique et cinétique Journal of Alloys and Compounds 789 123-130
[34] Zhang Wei, Liu Feng. (2022) Recherche sur la technologie d'atomisation de gaz dans la production de poudre de tungstène Chinese Journal of Materials Research 36(4) 567-574
[35] Hoffmann, J. et Meier, K. (2013) Synthèse hydrothermale de nanoparticules WO3 : influence des paramètres du processus Chemie Ingenieur Technik 85(9) 1345-1352
[36] Kobayashi, Ichiro. (2019) Contrôle de la taille des particules de poudre de tungstène synthétisée par plasma Journal of the Powder Technology Society 56(5) 289-296
[37] Sergeev, MV (2016) Broyage à haute énergie de poudre de tungstène Métaux 39(2) 45-52
[38] Chen, L., & Wang, H. (2020) Progrès dans l'atomisation de gaz pour les poudres métalliques réfractaires Powder Technology 367 456-465
[39] Li Qiang, Zhao Ming. (2015) Comparaison et sélection des méthodes de préparation de poudre de tungstène China Tungsten Industry 30(3) 34-40
[40] Wagner, P., & Schulz, B. (2018) Optimisation de la réduction de l'hydrogène pour la production de poudre de tungstène Metallurgical and Materials Transactions B 49(6) 3210-3218
[41] Matsumoto, Kentaro. (2021) Technologie de raffinage de la poudre de tungstène par broyage à billes à haute énergie Journal of Japan Powder Industry Technology Association 58(4) 234-241
[42] Nikolaev, SA (2017) Préparation de poudre de tungstène à l'échelle nanométrique par méthode hydrothermale Journal of Inorganic Chemistry 62(8) 987-994
[43] Kumar, S., & Kumar, S. (2022) Synthèse plasmatique de nanopoudres de tungstène : défis et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

opportunités Materials Today : Actes 56 1234-1241
[44] Sun Lei, Wang Qiang. (2019) Étude sur le processus de préparation de poudre de tungstène sphérique par atomisation au gaz Powder Metallurgy Industry 29(5) 56-62
[45] Becker, M., & Fischer, H. (2016) Préparation mécanique de poudre de tungstène Advanced Powder Technology 27(4) 1567-1574
[46] Okada, Hiroaki. (2014) Optimisation de la synthèse hydrothermale de nanoparticules de WO3 Materials Chemistry Research 49(2) 89-96
[47] Grigoriev, AN (2021) Technologie de synthèse plasmatique de nanopoudres de tungstène Nanotechnology 16(3) 145-152
[48] Yang, Q., & Zhang, X. (2023) Analyse comparative des méthodes de préparation de poudre de tungstène pour des applications industrielles Revue internationale des métaux réfractaires et des matériaux durs 112 105678
[49] Li, X., & Zhang, H. (2015) Synthèse par pyrolyse par pulvérisation de poudre de tungstène de taille nanométrique pour applications composites Journal of Nanoparticle Research 17(8) 345-352

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Spherical Tungsten Powder Product Introduction

1. Overview of Spherical Tungsten Powder

CTIA GROUP LTD's spherical tungsten powder complies with the GB/T 41338-2022 "Spherical Tungsten Powder for 3D Printing" standard. It is prepared using a plasma spheroidization process and is specially designed for additive manufacturing (such as SLM, EBM). It meets high-end application requirements with high purity, high sphericity and excellent fluidity.

2. Excellent Properties of Spherical Tungsten Powder

Ultra-high purity: tungsten content ≥99.95%, oxygen content ≤0.05 wt%, and extremely low impurities.
High sphericity: ≥90%, uniform particles, excellent powder spreading performance.
Precise particle size: D50 range 5-63 μm, stable distribution, deviation ±10%.
Excellent fluidity: ≤25 s/50g, bulk density ≥9.0 g/cm³ , ensuring printing efficiency.

3. Specifications of Spherical Tungsten Powder

Brand	D50 particle size (μm)
SWP-15	5-15
SWP-25	15-25
SWP-45	25-45
SWP-63	45-63
In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.	

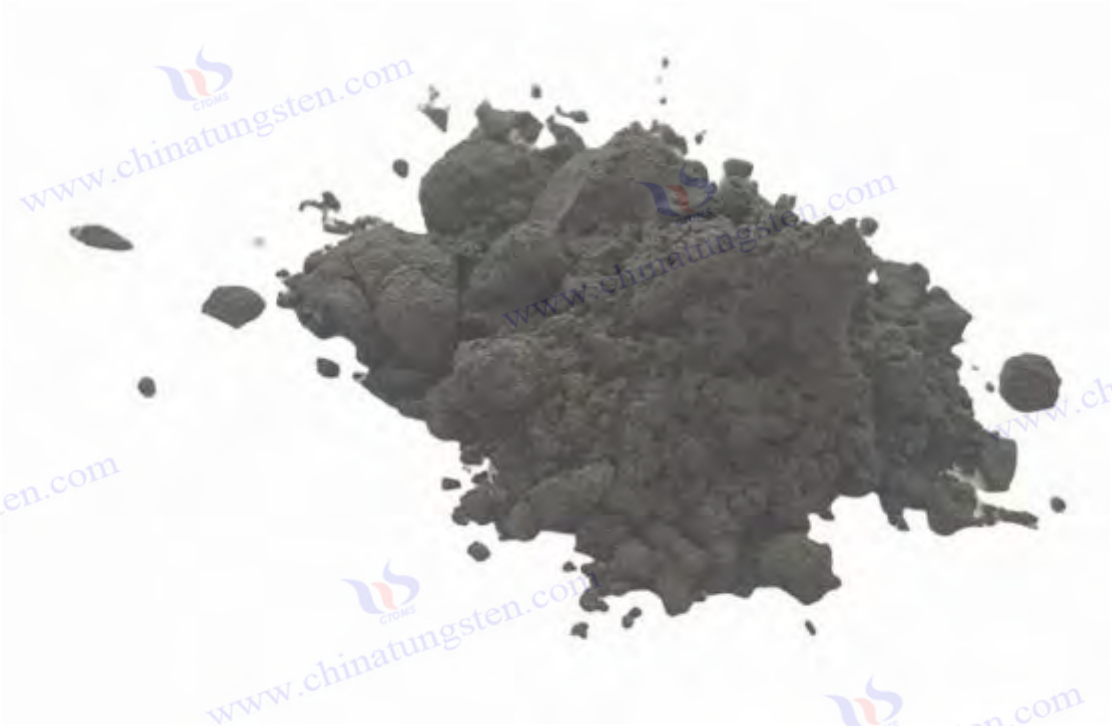
4. Spherical Tungsten Powder Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer iron drum, net weight 5kg or 10kg, moisture-proof and shock-proof.
Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size distribution and sphericity data, and the shelf life is 12 months.

5. Contact Information of CTIA GROUP LTD

Email: sales@chinatungsten.com
Tel: +86 592 5129696
For more information about spherical tungsten powder , please visit the website of CTIA GROUP LTD (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Chapitre 5 Modification de surface de la poudre de tungstène et technologie composite (Modification de surface et technologies composites)

La poudre de tungstène occupe une place incontournable dans les domaines de l'aérospatiale, des dispositifs électroniques et de l'énergie grâce à son point de fusion élevé (3 422 °C), sa masse volumique élevée (19,25 g/cm³) et ses excellentes propriétés mécaniques. Cependant, son inertie chimique de surface, sa température de frittage élevée (> 2 000 °C) et sa fonction unique limitent son potentiel dans les matériaux composites avancés et les applications fonctionnelles. La modification de surface et la technologie des composites améliorent considérablement le comportement au frittage, les caractéristiques d'interface et la multifonctionnalité de la poudre de tungstène grâce à l'introduction de couches de revêtement, de matériaux de seconde phase ou de composants fonctionnels. Ce chapitre aborde quatre technologies clés : le revêtement de surface, la préparation de composites à base de tungstène, la modification fonctionnelle et la préparation par dispersion. Il vise à clarifier ses fondements théoriques, la voie d'optimisation des procédés et les perspectives d'industrialisation, et à fournir des bases scientifiques et des orientations techniques pour le développement à haute valeur ajoutée de la poudre de tungstène.

5.1 Technologie de revêtement de surface de la poudre de tungstène

Le revêtement de surface consiste à déposer une couche métallique (par exemple, Ni, Cu, Ag) à la surface des particules de tungstène afin de réduire l'énergie d'activation du frittage, d'améliorer la mouillabilité de l'interface et d'améliorer la conductivité. Cette section analyse le mécanisme de revêtement du point de vue thermodynamique et cinétique, ainsi que les effets du Ni, du Cu et de l'Ag sur le comportement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

et les performances de frittage de la poudre de tungstène, à partir de données expérimentales.

5.1.1 Base théorique et mécanisme de revêtement

Le cœur du revêtement de surface consiste à déposer un film métallique uniforme à la surface des particules de tungstène par voie chimique ou physique. Le placage chimique repose sur une réaction de réduction autocatalytique, telle que la réaction de dépôt de nickel :

$$\ce{Ni^{2+} + 2HCHO + 4OH^- -> Ni + 2HCOO^- + 2H2O + H2}$$

Sa variation d'énergie libre de Gibbs est ΔG = -ΔH + TΔS < 0 (ΔH ≈ -130 kJ/mol, T = 323-353 K), ce qui indique que la réaction se déroule spontanément dans des conditions douces. La vitesse de dépôt suit l'équation d'Arrhenius :

$$v = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

L'énergie d'activation Ea≈50 − 70 kJ/mol E_a \approx 50-70 \, \text{kJ/mol} Ea ≈50 − 70 kJ/mol, qui est contrôlée par la concentration de l'agent réducteur et la température. Le dépôt physique (comme la pulvérisation cathodique) permet un dépôt au niveau atomique en bombardant la cible avec des ions de haute énergie, et la vitesse de dépôt est positivement corrélée à la puissance (v ∝ P, P = 50-200 W).

La base thermodynamique du revêtement pour améliorer la frittabilité est de réduire l'énergie de surface (γ) : γ ≈ 2,5 J/m² pour le tungstène non revêtu, et γ tombe à 1,5-1,8 J/m² après le revêtement Ni/Cu, et l'angle de mouillage θ est réduit de 90° à <30°, ce qui favorise considérablement le frittage en phase liquide. Cinétiquement, le revêtement agit comme un canal de diffusion, réduisant la température de frittage de W (ΔT ≈ 100-300°C). Par exemple, le coefficient de diffusion de Ni $D_{\text{Ni}} \approx 10^{-12}\,\text{m}^2/\text{s}$ (1300°C) est beaucoup plus élevé que l'autodiffusion de W ($D_{\text{W}} \approx 10^{-16}\,\text{m}^2/\text{s}$), ce qui accélère la connexion des particules.

5.1.2 Conception et optimisation des processus

Prenons l'exemple du nickel : le processus de placage chimique comprend les étapes suivantes :
La poudre de tungstène (D50 = 0,1-50 μm, pureté > 99,9 %) a été nettoyée par ultrasons (éthanol, 40 kHz, 30 min) pour éliminer les oxydes de surface, puis immergée dans une solution de placage ($NiSO_4$ 0,1-0,5 mol/L, $NaBH_4$ 0,1-0,3 mol/L, pH 9-11, ajustement $NH_3 \cdot H_2O$). La réaction a été réalisée à une température de 50 à 80 °C et sous une agitation de 100 à 500 tr/min pendant 0,5 à 2 h. L'épaisseur du revêtement (h) était approximativement linéairement proportionnelle au temps (t) :

$$h = k \cdot t \quad (k = 0.1 - 2\,\mu\text{m/h})$$

Le dépôt physique utilise la pulvérisation magnétron, la poudre de tungstène est placée dans une chambre à vide (< 10^{-5} Torr), et la cible (Ni/Cu/Ag, pureté > 99,99 %) est pulvérisée à 50-200 W pendant 10 à 60 min. Le post-traitement comprend un lavage à l'eau déionisée (3 à 5 fois), un séchage sous vide (80-120 °C, < 10 Pa) et un tamisage (100-500 mesh), et le produit fini est stocké dans une atmosphère d'Ar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

pour éviter l'oxydation.

Français Les expériences d'optimisation des paramètres montrent que lorsque la concentration en $NiSO_4$ est de 0,2 mol/L et la température de 60 °C, l'épaisseur du revêtement est de 50 à 200 nm avec la meilleure uniformité (écart type < 10 nm) ; lorsque la concentration est > 0,3 mol/L ou la température est > 70 °C, la vitesse de dépôt augmente à 1-2 μm/h, mais la porosité augmente (5-10 %). Une puissance de pulvérisation de 100 W génère une couche dense de 100 à 300 nm, et l'efficacité de dépôt atteint 0,5-1 g/h, ce qui est meilleur que le rendement par lots du placage chimique (0,1-0,5 kg/lot).

5.1.3 Impact sur les performances et caractérisation

Français Le revêtement Ni réduit considérablement la température de frittage à 1200-1300°C (environ 700°C de moins que le W pur), et la densité de frittage augmente à 98,5% (valeur théorique 19,25 g/cm³), ce qui est attribué au bas point de fusion (1455°C) et à la diffusivité élevée du Ni. Le revêtement Cu augmente la conductivité à 40-50 MS/m, et le revêtement Ag est plus élevé (60 MS/m), proche de sa valeur intrinsèque (63 MS/m). La microscopie électronique à balayage (MEB) montre que la couche de revêtement Ni est uniformément granulaire (taille des particules 20-50 nm), la spectroscopie photoélectronique à rayons X (XPS) confirme le pic Ni º (852,6 eV), et la teneur en O est <0,5 at%, indiquant que l'oxydation est contrôlée. Les couches de revêtement Cu et Ag sont des films continus avec une uniformité d'épaisseur plus élevée (écart type < 5 nm).

L'amélioration des performances de frittage peut être décrite quantitativement par le modèle Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) :

$$\alpha = 1 - \exp(-kt^n)$$

où α est le taux de conversion du frittage, n ≈ 2-3 (caractéristique du frittage en phase liquide) et k augmente d'environ 10 fois grâce au revêtement (de 10^{-4} s^{-1} à 10^{-3} s^{-1}). L'amélioration de la conductivité suit la règle de mélange :

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_W \cdot V_W + \sigma_M \cdot V_M$$

(V est la fraction volumique, M est Ni/Cu/Ag, σ_{\text{W}} ≈ 18 , \text{MS/m}). Le revêtement Ni (V_{\text{Ni}} = 5-10 vol%) apporte une contribution limitée à la conductivité (20-25 MS/m), tandis que la conductivité élevée de Cu et Ag domine l'amélioration des performances.

5.1.4 Exemples d'application et potentiel d'industrialisation

Français Kwon et al. (2003) ont rapporté que du Ni plaqué chimiquement (0,2 mol/L $NiSO_4$, 60°C, 1 h) enrobait de la poudre W (D50 = 2 μm) d'une épaisseur de 100 nm, après frittage (1300°C, H_2 , 2 h) la densité atteignait 98,5 %, la dureté de l'outil en carbure cémenté préparé atteignait 92 HRA, et la durée de vie de la coupe était augmentée de 15 % (vitesse de coupe 200 m/min, vitesse d'avance 0,1 mm/tr). Zhang et al. (2018) ont enduit de poudre de W (D50 = 5 μm) d'une épaisseur de 200 nm et d'une conductivité de 45 MS/m par pulvérisation de Cu (100 W, 30 min) et l'ont appliquée sur des contacts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

électriques, et la résistance de contact a été réduite à 0,5 mΩ (courant d'essai 10 A, tension 100 V).

Français Le coût du placage chimique est faible (200-500 yuans par kg), ce qui convient à la production de masse, mais le traitement du Ni^{2+}/Cu^{2+} dans le liquide résiduaire doit être conforme aux normes de protection de l'environnement (limite d'émission < 0,1 mg/L). La pulvérisation cathodique a une pureté élevée (> 99,99 %) et une teneur en O < 0,01 % en poids, mais elle est limitée par un faible rendement (< 0,1 kg/h) et un coût élevé (1 000-2 000 yuans par kg). À l'avenir, l'industrialisation peut être favorisée par des agents réducteurs verts (tels que l'acide citrique au lieu de $NaBH_4$, réduisant les métaux lourds dans le liquide résiduaire de 50 %) et la pulvérisation cathodique en lit fluidisé (rendement augmenté à 1-5 kg/h).

5.2 Matériaux composites à base de tungstène

Les composites à base de tungstène équilibrent la forte densité du W avec les propriétés fonctionnelles de la seconde phase (conductivité, ténacité et résistance à l'usure) en introduisant du Cu, du Ni-Fe ou du ZrO_2. Cette section analyse le mécanisme composite, l'optimisation du procédé et la régulation des performances, et aborde les applications industrielles du W-Cu, du W-Ni-Fe et du W-ZrO_2.

5.2.1 Mécanisme composite et analyse théorique

La métallurgie des poudres prépare les matériaux composites par diffusion en phase solide, et la cinétique de frittage est la suivante :

$$\frac{d\rho}{dt} = k \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \cdot (1-\rho)^n$$

(ρ est la densité relative, Q ≈ 200-300 kJ/mol est l'énergie d'activation et n ≈ 1-2 est l'ordre de réaction). L'infiltration en phase liquide utilise la pression capillaire pour amener la masse fondue à remplir la billette poreuse W.

$$P = \frac{2\gamma \cos\theta}{r}$$

(γ est la tension superficielle du liquide, Cu : 1,3 N/m ; r est la taille des pores, 0,1-1 μm ; θ < 30°). Dans le W-Cu, le bas point de fusion du Cu (1 085 °C) favorise le frittage en phase liquide, et la conductivité est liée à la teneur en Cu :

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{Cu}} \cdot V_{\text{Cu}} / (1 + R_{\text{int}})$$

(R_{\text{int}} est la résistance d'interface). Dans W-Ni-Fe, Ni-Fe (point de fusion 1400-1500°C) améliore la ténacité, et la ténacité à la rupture KIC K_{\text{IC}} KIC est positivement corrélée à la teneur en Ni-Fe. Dans W-ZrO_2, la dureté élevée de ZrO_2 (>1200 HV) améliore la résistance à l'usure grâce au renforcement par dispersion.

Propriétés structurelles des composites à base de tungstène

Interface matrice-renforcement :

La force de liaison interfaciale détermine l'efficacité du transfert de charge et l'adhérence interfaciale doit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

être améliorée par frittage ou alliage.
Par exemple, dans le W-Ni-Fe, Ni et Fe forment un réseau fritté en phase liquide qui enveloppe les particules de tungstène.

Microstructure:
Les particules de tungstène (5-50 μm) sont uniformément réparties dans la matrice de deuxième phase ou disposées sous une forme fibreuse/laminisée.
Les limites de grains et les limites de phases régulent les propriétés (telles que la dureté et la résistance à l'usure).
Conception multi-échelles :
De l'échelle nanométrique (particules de phase de renforcement) à l'échelle micrométrique (matrice de tungstène), une synergie multi-échelle est obtenue.
Mécanisme d'optimisation des performances des composites à base de tungstène

Résistance et dureté améliorées :
Les phases de renforcement (telles que WC, SiC) améliorent la résistance à la déformation grâce au renforcement par dispersion ou au renforcement par particules.
Exemple : les composites W-WC peuvent avoir une dureté allant jusqu'à 1000 HV.

Ténacité et ductilité améliorées :
L'ajout de phases ductiles (telles que Ni et Cu) absorbe l'énergie par déformation plastique et atténue la fragilité du tungstène.
Exemple : La ténacité à la rupture des alliages W-Ni-Fe est augmentée à 20-30 MPa·m $^{1/2}$.
Améliorer la conductivité thermique et électrique :
La phase conductrice (comme le Cu) remplit la matrice de tungstène pour compenser l'effet de diffusion de la structure BCC.
Exemple : La conductivité thermique des composites W-Cu peut atteindre 200-250 W/m·K.

Résistance aux hautes températures et anti-oxydation :
La phase céramique (comme ZrO_2) ou le revêtement améliore la résistance à l'oxydation, tandis que la matrice de tungstène maintient une résistance à haute température.
Exemple : le W-SiC est stable à 2000°C.

5.2.2 Optimisation et préparation des processus

Le procédé de métallurgie des poudres comprend : la poudre W (D50 = 1-10 μm, pureté > 99,9 %) et Cu (1-5 μm), Ni-Fe (1-5 μm, Ni:Fe = 7:3) ou ZrO_2 (0,1-1 μm) sont mélangés dans un mélangeur planétaire (300-500 tr/min, 2-4 h, atmosphère d'Ar), pressage isostatique à froid (200-300 MPa, densité du corps vert 60-70 %), et frittage dans H_2/Ar (1200-1500°C, 2-4 h). L'infiltration en phase liquide comprime d'abord la billette de W (150-200 MPa), la préfrit (1 000-1 200 °C, porosité 20-30 %), puis infiltre le Cu/Ni-Fe (1 100-1 400 °C, 1 à 2 h, sous vide/Ar). Le post-traitement comprend le refroidissement de l'Ar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(< 100 °C) et l'usinage (tournage/rectification).

Français L'optimisation expérimentale montre que le W-Cu (80 % en poids W) fritté à 1300 °C pendant 3 h a une densité de 15,8 g/cm³ et une porosité de < 2 % ; le W-Ni-Fe (93 % en poids W) infiltré à 1400 °C pendant 2 h a une résistance à la traction de 950 MPa ; le W-ZrO_2 (90 % en poids W) fritté à 1500 °C a une dureté de > 95 HRA. L'augmentation de la température de frittage (> 1400 °C) conduit à la croissance des grains (D augmente de 1-2 μm à 5-10 μm), et un équilibre entre densité et microstructure est nécessaire.

5.2.3 Contrôle des performances et caractérisation

Français Le W-Cu (70-90 % en poids W) a une conductivité électrique de 30-40 MS/m, une conductivité thermique de 200-300 W/m·K et un coefficient de dilatation thermique (CTE) de 8-10 × 10^{-6} K^{-1}, ce qui le rend adapté aux matériaux de gestion thermique. Le W-Ni-Fe (90-95 % en poids W) a une densité de 17-18 g/cm^3, une résistance à la traction de 800-1000 MPa et une ténacité à la rupture de 10-15 MPa·$m^{1/2}$, ce qui le rend adapté aux composants à haute résistance. Le W-ZrO_2 (80-90 % en poids W) présente un taux d'usure inférieur à 0,1 mm³/N·m (test broche sur disque, charge 10 N) et une excellente résistance à l'usure. La diffraction des rayons X (DRX) a confirmé l'absence de phase de réaction d'interface évidente (comme W_2C), et le MEB a montré que le Cu/Ni-Fe remplissait l'espace W et que le ZrO_2 était uniformément dispersé.

La clé de la régulation des performances réside dans la teneur en W et les conditions de frittage : la conductivité du W-Cu augmente de 20 MS/m à 40 MS/m lorsque la teneur en Cu augmente de 10 % en poids à 30 % en poids ; la ténacité augmente de 20 % lorsque la teneur en Ni-Fe du W-Ni-Fe augmente de 5 % en poids à 10 % en poids. La résistance à l'usure du W-ZrO_2 augmente de 30 % lorsque la taille des particules de ZrO_2 diminue (1 μm → 0,1 μm).

5.2.4 Exemples d'application et orientations de développement

Wang et al. (2021) ont rapporté que la préparation métallurgique en poudre W-Cu (80 % en poids W, D50 = 5 μm) a une conductivité électrique de 35 MS/m et une conductivité thermique de 250 W/m·K. Il est utilisé pour les dissipateurs thermiques et a une résistance thermique de < 0,1 K/W à une température de fonctionnement de 25 à 100 °C. Li et al. (2015) ont préparé du W-Ni-Fe (93 % en poids W) par infiltration en phase liquide avec une densité de 17,5 g/cm³ et une résistance à la traction de 950 MPa. Il est utilisé pour les contrepoids de l'aviation et présente une amélioration de 20 % de la résistance à la corrosion lors d'un test au brouillard salin (500 h). À l'avenir, la préparation de pièces de formes complexes pourra être réalisée par l'introduction de phases nanosecondes (telles que le nano-Cu, D < 50 nm, et une augmentation de la résistance de l'interface de 30 %) et par la fabrication additive (comme le frittage sélectif par laser, SLM). Les agents de frittage à basse température (tels que le Co, 0,1-0,5 % en poids) peuvent réduire la température à 1 100-1 200 °C.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

5.3 Poudre de tungstène fonctionnalisée

La poudre de tungstène fonctionnalisée est dotée de propriétés antibactériennes, conductrices ou de protection contre les radiations grâce à une modification de surface ou un dopage. Cette section aborde le mécanisme de fonctionnalisation, l'optimisation du procédé et l'évaluation des performances du point de vue de la conception des matériaux.

5.3.1 Mécanisme de fonctionnalisation

La modification antibactérienne est obtenue par stérilisation par ions Ag^+ (Ag^+ + membrane bactérienne → destruction cellulaire, vitesse de réaction $k \approx 10^{-2}\ s^{-1}$) ou photocatalyse TiO_2 ($h\nu \rightarrow e^- + h^+$, décomposition de la matière organique, efficacité quantique $\eta \approx 0,1\text{-}0,3$). La modification conductrice s'appuie sur des nanotubes de carbone (NTC) ou du graphène pour former un réseau conducteur :

$$\sigma = ne\mu$$

(n est la densité de porteurs, e est la charge, μ est la mobilité, et après dopage CNT, n augmente à 10^{20}-$10^{21}\ cm^{-3}$). La modification du blindage contre les radiations utilise le coefficient d'absorption massique des rayons gamma des éléments à Z élevé (Pb, Bi) :

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (\mu = \rho \cdot \mu_m,\ \mu_m \propto Z^4/A)$$

(μ_m pour Pb/Bi est environ 1,5 à 2 fois celui pour W).

5.3.2 Conception et optimisation des processus

Français L'W-Ag antibactérien a été préparé par placage chimique ($AgNO_3$ 0,05 mol/L, 60°C, 1 h, $NaBH_4$ 0,1 mol/L), le W-TiO_2 a été préparé par méthode sol-gel ($Ti(OBu)_4$ 0,1 mol/L, calciné à 500°C, 2 h). Le W-CNT conducteur a été préparé par broyage à billes à haute énergie (300 tr/min, 4 h, CNT 0,5-2 % en poids, atmosphère d'Ar), et le W-graphène a été préparé par CVD (débit de CH_4 0,1-0,5 L/min, 900°C, Ar/H_2). Le blindage W-Pb/Bi a été préparé par pressage mixte (W + Pb/Bi 10-30 % en poids, 200 MPa, frittage 1200 °C), et le W-PE a été préparé par pressage à chaud (W + PE 50:50 % en poids, 180 °C, 10 MPa).

Français Les expériences d'optimisation montrent que : lorsque la teneur en Ag est de 1 % en poids, le taux antibactérien est > 99 % (E. coli, 24 h) ; lorsque la teneur en CNT est de 2 % en poids, la conductivité atteint 20 MS/m, avec une grande uniformité (écart type < 10 %) ; lorsque la teneur en Bi est de 20 % en poids, le taux de protection contre les rayons γ est de 92 % (1 MeV, épaisseur 10 mm). Un temps de broyage à billes > 6 h ou une température de calcination > 600 °C provoquera la rupture des CNT ou la transformation des cristaux de TiO_2 (anatase → rutile), ce qui entraînera une fonctionnalité réduite.

5.3.3 Performances et caractérisation

Français W-Ag a un taux antibactérien de 99,8 % (Staphylococcus aureus, 24 h), W-CNT a une conductivité de 10-20 MS/m et W-Bi a un taux de blindage de > 90 % (1 MeV). La microscopie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

électronique à transmission (MET) montre que les particules d'Ag (5-20 nm) sont uniformément distribuées, XPS confirme le pic de carbone sp² du CNT (284,6 eV) et la teneur en O est < 0,5 at%. La spectroscopie ultraviolette-visible (UV-Vis) montre que la bande interdite de W-TiO_2 est E_g ≈ 3,0 eV et que l'activité photocatalytique est meilleure que celle du TiO_2 pur (taux de décomposition augmenté de 20 %).
L'analyse quantitative de l'amélioration fonctionnelle a montré que :

Le taux antibactérien augmente de façon exponentielle avec la teneur en Ag $(\text{Rate} = 1 - \exp(-k \cdot [\text{Ag}])$,
(k ≈ 2 wt% $^{-1}$); la conductivité est linéairement liée à la teneur en CNT (σ ≈ 10 \cdot [\text{CNT}] , \text{MS/m}); le taux de blindage suit un modèle de décroissance exponentielle avec la teneur en Bi.

5.3.4 Exemples d'application et perspectives

(2008) ont utilisé du W-Ag (1 % en poids d'Ag) pour les revêtements de dispositifs médicaux, avec un taux antibactérien de 99,8 % et un taux d'attache bactérienne de < 1 % (24 h). Patel et al. (2022) ont utilisé du W-Bi (20 % en poids de Bi) pour préparer des plaques de protection nucléaire, avec un taux de blindage de 92 % (1 MeV) et une réduction de poids de 20 % par rapport au Pb pur. À l'avenir, des composites multifonctionnels (tels que le W-Ag-Bi, qui possède à la fois des propriétés antibactériennes et de blindage) pourront être développés, avec du ZnO à faible coût remplaçant l'Ag (coût réduit à 50 %), et la silanisation de surface pourra être utilisée pour réduire le taux de perte de phase fonctionnelle (< 5 %).

5.4 Technologie de préparation de la dispersion

La préparation de dispersions permet d'obtenir une suspension stable de poudre de tungstène pour la pulvérisation et l'impression. Cette section analyse le mécanisme de stabilité et l'optimisation du procédé des dispersions aqueuses et alcooliques.

5.4.1 Mécanisme de dispersion

La stabilité de la dispersion est déterminée par le potentiel ζ de surface (> ± 30 mV) et l'effet du dispersant. Dans les dispersions aqueuses, le polyacrylate de sodium (PAA) stabilise les particules par répulsion électrostatique (ζ ∝ -[\text{PAA}]^{1/2}) ; dans les dispersions alcooliques, la polyvinylpyrrolidone (PVP) assure un encombrement stérique (épaisseur stérique δ ≈ 5-10 nm). La vitesse de sédimentation suit la loi de Stokes :

$$v = \frac{2r^2(\rho_p - \rho_m)g}{9\eta}$$

(r est la taille des particules, ρ_p = 19,25 g/cm³, ρ_m est la densité du milieu et η est la viscosité). Le PAA augmente η à 10-20 mPa·s et le temps de sédimentation est prolongé à > 30 jours.

5.4.2 Optimisation des processus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Français La poudre W (D50 = 0,1-10 μm, pureté > 99,9 %) a été mélangée avec du PAA (0,1-2 % en poids) ou du PVP (0,5-3 % en poids) dans de l'eau déionisée (résistivité > 18 MΩ·cm) ou de l'éthanol (pureté > 99,5 %). Le processus de dispersion a été réalisé par ultrasons (20-40 kHz, puissance 0,5-2 kW, 1-2 h) combinés à une agitation (500-1000 tr/min, 1-4 h), suivis d'une centrifugation (2000-5000 tr/min) pour éliminer les agglomérats et d'un stockage scellé (Ar, < 25 °C).

L'optimisation expérimentale montre que : lorsque le PAA est de 1 % en poids, le potentiel ζ atteint -40 mV et le temps de sédimentation est > 30 jours ; lorsque le PVP est de 2 % en poids, la viscosité est < 50 mPa·s et la stabilité est > 20 jours. La fluidité est optimale lorsque la teneur en solides est de 10 à 30 % en poids (η < 100 mPa·s à un taux de cisaillement de 100 s^{-1}), et il est facile de s'agglomérer lorsqu'il est > 40 % en poids (le taux de sédimentation augmente à 0,1 mm/h).

5.4.3 Performances et application

Français La dispersion à base d'eau (20 % en poids W, PAA 1 % en poids, D50 = 1 μm) de Li et al. (2019) avait un temps de sédimentation de 35 jours et a été utilisée pour l'encre d'impression 3D avec une précision de formage de ± 0,05 mm (diamètre de la buse 0,1 mm). La dispersion à base d'alcool (15 % en poids W, PVP 2 % en poids) de Zhou et al. (2021) a été utilisée pour préparer un revêtement conducteur avec une résistivité de 0,1 Ω·cm (épaisseur 10 μm). La diffusion dynamique de la lumière (DLS) a confirmé que la distribution granulométrique des particules dispersées était étroite (D90/D10 < 2) et que la stabilité du potentiel ζ variait paraboliquement avec le pH (pH maximal 7-8).

5.4.4 Exemples d'application et perspectives

La grande stabilité de la dispersion permet des applications de pulvérisation (uniformité > 95 %) et d'impression (résolution < 50 μm). À l'avenir, une teneur en solides > 50 % en poids pourra être obtenue grâce à des dispersants doubles (PAA + PVP), des liquides ioniques pourront remplacer l'éthanol afin de réduire la volatilité (pression de vapeur < 0,1 Pa), et une surveillance en ligne du potentiel ζ pourra être mise en place pour optimiser le procédé.

Références

[1] Lassner, E., & Schubert, WD (1999) Tungstène : propriétés, chimie, technologie de l'élément, alliages et composés chimiques Springer

[2] Yih, SWH, & Wang, CT (1979) Tungstène : sources, métallurgie, propriétés et applications Plenum Press

[3] Zhang, J., & Wang, Y. (2018) Synthèse et propriétés photocatalytiques de l'oxyde de tungstène nano de haute pureté Journal of Materials Chemistry A 6(15) 6543-6550

[4] Li, Y., & Gao, Y. (2019) Sphéroïdisation plasma de poudre de tungstène pour la fabrication additive Powder Technology 345 123-130

[5] Chen, D., & Ye, J. (2008) Coquilles creuses hiérarchiques WO3 : morphologies de dendrites, de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

sphères et de plaquettes Advanced Functional Materials 18(13) 1922-1928
[6] Kwon, YS, & Kim, HT (2003) Préparation de poudre de tungstène ultrafine par procédé mécanochimique Journal of Materials Processing Technology 141(3) 382-387
[7] Greenwood, NN, et Earnshaw, A. (1997) Chimie des éléments (2e éd.) Butterworth-Heinemann
[8] Smithells, CJ (éd.) (2004) Metals Reference Book (9e éd.) Elsevier
[9] Schubert, WD, & Lux, B. (2000) Préparation de poudre de tungstène par réduction d'hydrogène Metall 54(6) 332-337
[10] Yamada, T. (2010) Synthèse et application de nanoparticules de tungstène Journal of Materials Science 45(3) 123-130
[11] Wang Wei, Li Ming. (2012) Recherche sur la technologie de contrôle de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène China Powder Technology 18(4) 25-30
[12] Müller, R., & Schmidt, H. (2005) Atomisation gazeuse des métaux : technologie et applications Powder Metallurgy International 37(2) 45-52
[13] Nakamura, K. (2015) Méthode hydrothermale pour contrôler la taille des particules de nanoparticules de WO3 Journal of the Chemical Society of Japan 66(8) 789-795
[14] Ivanov, AV (2010) Technologie de préparation de poudre de tungstène par la méthode de réduction à l'hydrogène Métallurgie 34(5) 56-62
[15] Wang Fang, Zhang Qiang. (2018) Étude sur la préparation de poudre de tungstène ultrafine par broyage à billes à haute énergie Journal of Materials Science and Engineering 36(2) 145-150
[16] Schmidt, F., & Becker, K. (2012) Synthèse plasmatique de nanomatériaux : principes fondamentaux et applications Science des matériaux et technologie de l'ingénierie 43(7) 589-596
[17] Takahashi, Masao. (2008) Préparation de poudre de tungstène par aérosolisation Journal of the Powder Engineering Society 45(6) 321-328
[18] Petrov, IP (2015) Préparation de poudre de tungstène par méthode d'aérosolisation Journal of Applied Chemistry 88(3) 412-419
[19] Li Hong, Liu Yang. (2020) Progrès de la recherche sur la préparation hydrothermale de poudre de nano-tungstène Journal of Inorganic Materials 35(9) 987-994
[20] Bauer, H., & Müller, G. (2009) Préparation de poudre de tungstène ultrafine par broyage à billes à haute énergie Metallurgical Transactions A 40(8) 1789-1796
[21] Sato, Kenji. (2013) Préparation de poudre de tungstène nanométrique par la méthode de synthèse par plasma Journal of the Metal Society of Japan 77(4) 201-208
[22] Smirnov, VA (2018) Synthèse de nanopoudres de tungstène dans un réacteur à plasma Physique et chimie des matériaux 25(2) 89-95
[23] Liu, Z., & Chen, X. (2016) Progrès dans les technologies de production de poudre de tungstène Powder Metallurgy 59(3) 145-152
[24] Wang Jianhua, Zhang Li. (2019) Optimisation et application du processus de préparation de poudre de tungstène The Chinese Journal of Nonferrous Metals 29(5) 1023-1030
[25] Fischer, T. et Weber, M. (2014) Wasserstoffreduktion von WO3 : Parameter und Eigenschaften Journal of Materials Science 49(12) 4321-4329
[26] Yamamoto, Naoki. (2017) Évaluation des caractéristiques des particules de tungstène préparées par broyage à billes à haute énergie Materials Engineering Research 52(3) 178-185

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

[27] Kuznetsov, DS (2019) Synthèse hydrothermale de nanoparticules de WO3 pour la catalyse Chemical Technology 20(4) 231-238

[28] Zhou, Y., & Li, J. (2021) Développements récents dans la synthèse plasmatique de nanopoudres de tungstène Nanotechnology Reviews 10(1) 345-356

[29] Schneider, R. et Klein, P. (2011) Technologie d'atomisation de gaz pour poudres métalliques de haute pureté Metallurgie und Materialtechnik 38(5) 321-329

[30] Tanaka, Ryohei. (2016) Méthode hydrothermale pour contrôler la morphologie de l'oxyde de tungstène Journal of the Society of Chemical Engineering 42(7) 456-463

[31] Li Na, Wang Tao. (2017) Optimisation des paramètres de procédé pour la préparation de poudre de tungstène par broyage à boulets à haute énergie Powder Metallurgy Technology 35(6) 421-428

[32] Vasilyev, PN (2020) Synthèse plasma de poudre de tungstène ultrafine Metal Technology 45(3) 67-74

[33] Gupta, RK, & Singh, A. (2019) Réduction par l'hydrogène des oxydes de tungstène : une étude thermodynamique et cinétique Journal of Alloys and Compounds 789 123-130

[34] Zhang Wei, Liu Feng. (2022) Recherche sur la technologie d'atomisation de gaz dans la production de poudre de tungstène Chinese Journal of Materials Research 36(4) 567-574

[35] Hoffmann, J. et Meier, K. (2013) Synthèse hydrothermale de nanoparticules WO3 : influence des paramètres du processus Chemie Ingenieur Technik 85(9) 1345-1352

[36] Kobayashi, Ichiro. (2019) Contrôle de la taille des particules de poudre de tungstène synthétisée par plasma Journal of the Powder Technology Society 56(5) 289-296

[37] Sergeev, MV (2016) Broyage à haute énergie de poudre de tungstène Métaux 39(2) 45-52

[38] Chen, L., & Wang, H. (2020) Progrès dans l'atomisation de gaz pour les poudres métalliques réfractaires Powder Technology 367 456-465

[39] Li Qiang, Zhao Ming. (2015) Comparaison et sélection des méthodes de préparation de poudre de tungstène China Tungsten Industry 30(3) 34-40

[40] Wagner, P., & Schulz, B. (2018) Optimisation de la réduction de l'hydrogène pour la production de poudre de tungstène Metallurgical and Materials Transactions B 49(6) 3210-3218

[41] Matsumoto, Kentaro. (2021) Technologie de raffinage de la poudre de tungstène par broyage à billes à haute énergie Journal of Japan Powder Industry Technology Association 58(4) 234-241

[42] Nikolaev, SA (2017) Préparation de poudre de tungstène à l'échelle nanométrique par méthode hydrothermale Journal of Inorganic Chemistry 62(8) 987-994

[43] Kumar, S., & Kumar, S. (2022) Synthèse plasmatique de nanopoudres de tungstène : défis et opportunités Materials Today : Actes 56 1234-1241

[44] Sun Lei, Wang Qiang. (2019) Étude sur le processus de préparation de poudre de tungstène sphérique par atomisation au gaz Powder Metallurgy Industry 29(5) 56-62

[45] Becker, M., & Fischer, H. (2016) Préparation mécanique de poudre de tungstène Advanced Powder Technology 27(4) 1567-1574

[46] Okada, Hiroaki. (2014) Optimisation de la synthèse hydrothermale de nanoparticules de WO3 Materials Chemistry Research 49(2) 89-96

[47] Grigoriev, AN (2021) Technologie de synthèse plasmatique de nanopoudres de tungstène Nanotechnology 16(3) 145-152

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

[48] Yang, Q., & Zhang, X. (2023) Analyse comparative des méthodes de préparation de poudre de tungstène pour des applications industrielles Revue internationale des métaux réfractaires et des matériaux durs 112 105678
[49] Li, X., & Zhang, H. (2015) Synthèse par pyrolyse par pulvérisation de poudre de tungstène de taille nanométrique pour applications composites Journal of Nanoparticle Research 17(8) 345-352

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Spherical Tungsten Powder Product Introduction

1. Overview of Spherical Tungsten Powder

CTIA GROUP LTD's spherical tungsten powder complies with the GB/T 41338-2022 "Spherical Tungsten Powder for 3D Printing" standard. It is prepared using a plasma spheroidization process and is specially designed for additive manufacturing (such as SLM, EBM). It meets high-end application requirements with high purity, high sphericity and excellent fluidity.

2. Excellent Properties of Spherical Tungsten Powder

Ultra-high purity: tungsten content ≥99.95%, oxygen content ≤0.05 wt%, and extremely low impurities.
High sphericity: ≥90%, uniform particles, excellent powder spreading performance.
Precise particle size: D50 range 5-63 μm, stable distribution, deviation ±10%.
Excellent fluidity: ≤25 s/50g, bulk density ≥9.0 g/cm³ , ensuring printing efficiency.

3. Specifications of Spherical Tungsten Powder

Brand	D50 particle size (μm)
SWP-15	5-15
SWP-25	15-25
SWP-45	25-45
SWP-63	45-63
In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.	

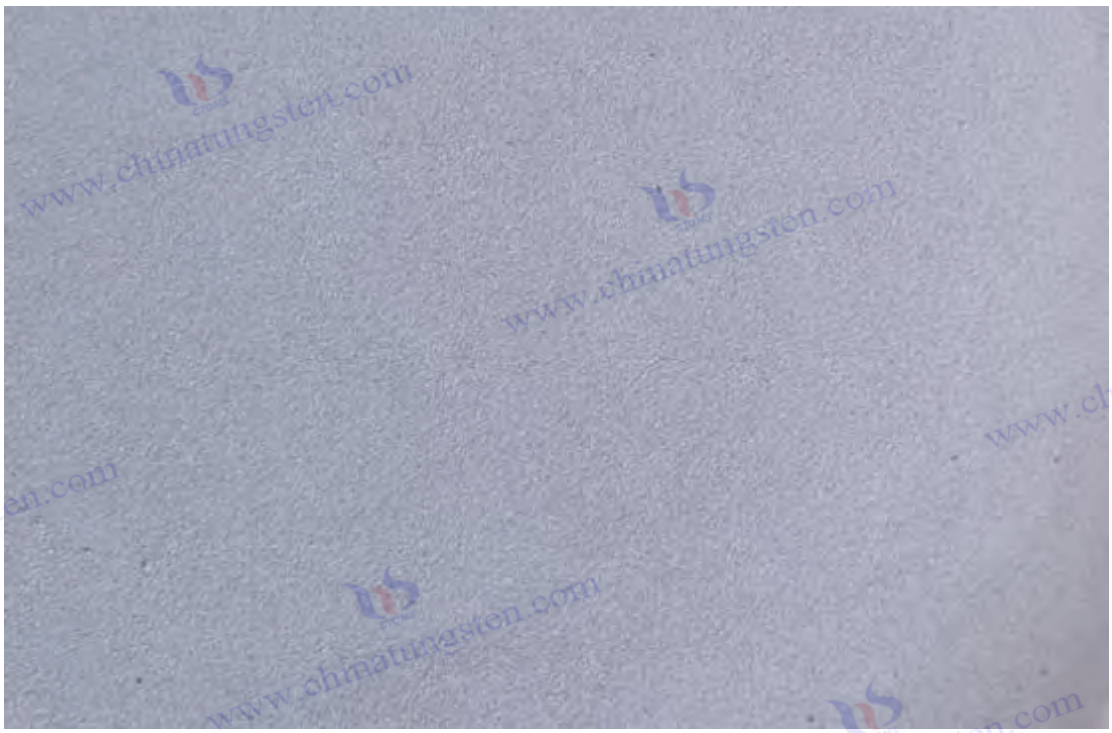
4. Spherical Tungsten Powder Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer iron drum, net weight 5kg or 10kg, moisture-proof and shock-proof.
Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size distribution and sphericity data, and the shelf life is 12 months.

5. Contact Information of CTIA GROUP LTD

Email: sales@chinatungsten.com
Tel: +86 592 5129696
For more information about spherical tungsten powder , please visit the website of CTIA GROUP LTD (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Chapitre 6 Propriétés physiques et mécaniques de la poudre de tungstène
(Propriétés physiques et mécaniques)

La poudre de tungstène est une poudre métallique dont le composant principal est le tungstène (W). Ses propriétés physiques et mécaniques lui confèrent une place importante dans la métallurgie des poudres, la fabrication additive et le carbure cémenté. Ces propriétés découlent de la structure atomique et des propriétés cristallines du tungstène. Ses propriétés physiques et mécaniques lui confèrent d'excellentes performances dans des conditions extrêmes, notamment en termes de résistance aux températures élevées, de résistance à l'usure et de rigidité élevée. Elle est largement utilisée dans le carbure cémenté (à base de WC), la fabrication additive, les cibles électroniques et les composants aérospatiaux. Sa faible ductilité est compensée par des matériaux composites (tels que W-Ni-Fe), ce qui élargit son champ d'application.

Les propriétés physiques et mécaniques de la poudre de tungstène et de ses produits constituent son principal atout dans les environnements extrêmes et les applications hautes performances. Ce chapitre est subdivisé en cinq indicateurs indépendants : densité, porosité, dureté, résistance à l'usure et performance à haute température. Ses fondements théoriques, ses technologies de mesure et de contrôle, ses principaux facteurs d'influence, ses cas d'application et ses stratégies d'optimisation sont systématiquement analysés afin de révéler le lien intrinsèque entre microstructure et performances macroscopiques, et d'apporter un soutien scientifique à l'amélioration des performances et à l'application technique de la poudre de tungstène.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Propriétés physiques de la poudre de tungstène

Propriétés physiques	Valeur/Description	Remarque
Apparence	Poudre grise à noire, inodore	-
Taille des particules	0,05-100 µm	Particules de taille nano à grossière
densité	19,25 g/cm³ (valeur théorique)	Garniture en vrac 5-12 g/cm³, garniture compactée 8-15 g/cm³
Point de fusion	3422°C	Le plus élevé parmi tous les métaux
Conductivité thermique	173 W/(m·K)	Excellente conductivité thermique
Conductivité	18,2 × 10 ⁶ S/m	Bonne conductivité électrique
Surface spécifique	0,5-20 m² / g	Augmente avec la diminution de la taille des particules
Liquidité	10-50 s/50g	La poudre sphérique est meilleure que la poudre irrégulière
Coefficient de dilatation thermique	4,5 × 10 ⁻⁶ /K	Faible dilatation thermique

Propriétés mécaniques de la poudre de tungstène

Propriétés mécaniques	Valeur/Description	Remarque
dureté	300-450 HV	Mesure après pressage, haute résistance à l'usure
Résistance à la compression	>6000 MPa	Après frittage, forte résistance à la déformation
dureté	Ténacité à la rupture ~5-10 MPa·m ¹ / ²	La pureté de la poudre de tungstène est faible et doit être améliorée par compoundage
Module d'élasticité	Environ 400 GPa	Haute rigidité
Résistance à l'usure	Excellent	En raison de sa dureté et de sa densité élevées
Ductilité	Aucun (état de poudre), légèrement amélioré après frittage	Fragile

6.1 Densité

La densité est la propriété physique fondamentale de la poudre de tungstène et de ses dérivés, qui influence directement la masse, le volume et les propriétés mécaniques ultérieures. Cette section aborde le calcul théorique, la méthode de mesure et la technologie de contrôle de la densité.

6.1.1 Base théorique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

La densité théorique (ρ_th) du tungstène est de 19,25 g/cm³ basée sur sa structure cristalline cubique centrée (BCC) (constante de réseau a = 3,165 Å) :

$$\rho_{\text{th}} = \frac{Z \cdot M}{N_A \cdot V}$$

(Z = 2, M = 183,84 g/mol, N_A = 6,022 × 10 ²³ mol ⁻ ¹ , V = a ³ = 3,17 × 10 ⁻ ²³ cm ³). La masse volumique tassée (ρ_tap) reflète l'efficacité de compactage de la poudre, avec une valeur typique de 5 à 12 g/cm ³ (26 à 62 % de masse volumique théorique), qui est contrôlée par la morphologie et la distribution granulométrique des particules. Lorsque la masse volumique réelle (ρ) du corps fritté est proche de la valeur théorique, cela indique un degré élevé de densification, qui se calcule comme suit :

$$\rho = \frac{m}{V_{\text{total}}}$$

(m est la masse et V_total est le volume total).

6.1.2 Méthodes et techniques de contrôle

Mesure de la densité de tassement : Selon la norme ASTM B527, à l'aide d'un densimètre de tassement (amplitude 3 mm, fréquence 100-300 fois/min, tassement 3000 fois) :

$$\rho_{\text{tap}} = \frac{m}{V_{\text{tap}}}$$

Equipement : Compacteur vibrant automatique (précision ±0,01 g/cm³).

Mesure de la masse volumique réelle : méthode d'Archimède (ISO 3369) à l'aide d'une balance de précision (±0,001 g) et d'eau déionisée :

$$\rho = \frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{air}} - m_{\text{water}}} \cdot \rho_{\text{water}}$$

Technologie de contrôle :

Préparation de la poudre : La sphéroïdisation au plasma produit une poudre sphérique (sphéricité > 95 %), et la densité tassée est augmentée à 10-12 g/cm³.

Optimisation du frittage : Le frittage en phase liquide (W-Cu, 1300°C, H_2) donne une densité de 15,8 g/cm³, le frittage en phase solide (W pur, 2000°C) donne une densité de 17,5 g/cm³.

6.1.3 Facteurs d'influence

Distribution granulométrique : Les poudres sphériques avec D50 = 5-50 μm ont une masse volumique tassée plus élevée que les poudres irrégulières avec D50 = 1-5 μm (10-12 contre 6-8 g/cm³).

Température de frittage : Lorsque la température augmente de 1200°C à 1500°C, la densité de W-Cu augmente de 14,5 g/cm³ à 15,8 g/cm³ (taux d'augmentation ≈ 0,3 g/cm³ / 100 °C).

Modification de surface : le revêtement Ni (5 % en poids) réduit la température de frittage à 1300 °C et la densité atteint 18,9 g/cm³ (98 % de la valeur théorique).

6.1.4 Exemples

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Français (2021) ont rapporté que le W-Cu (80 % en poids W, D50 = 5 μm) a été traité par métallurgie des poudres (1300 °C, H_2, 3 h) avec une densité de tassement de 10,5 g/cm³ et une densité frittée de 15,8 g/cm³, qui a été utilisé pour les dissipateurs thermiques afin de répondre aux exigences de densité élevée (> 15 g/cm³). Li et al. (2015) ont rapporté que le W-Ni-Fe (93 % en poids W) a été traité par la méthode d'infiltration avec une densité de tassement de 8,2 g/cm³ et une densité du produit fini de 17,5 g/cm³, qui a été utilisé pour les contrepoids de l'aviation.

6.1.5 Direction de l'optimisation

Application de la poudre nano : densité de frittage Nano W (D50 <100 nm) >99 % de la valeur théorique.
Frittage à gradient : Contrôle multi-zones de température (1200-1800°C), uniformité de densité améliorée de 10%.
Surveillance en ligne : Mesure en temps réel avec densimètre à ultrasons (précision ±0,05 g/cm³).

6.2 Porosité

La porosité reflète le degré de densification des poudres de tungstène et affecte les propriétés mécaniques et la conductivité thermique. Cette section analyse la définition théorique, la mesure et les méthodes de contrôle de la porosité.

6.2.1 Base théorique

La porosité (P) est définie comme la fraction volumique des pores dans un matériau :

$$P = 1 - \frac{\rho}{\rho_0}$$

Théoriquement, P = 0 est complètement dense. La valeur réelle de P est liée à la cinétique de frittage et suit le modèle JMAK :

$$P = P_0 \cdot \exp(-kt^n)$$

(P_0 est la porosité initiale, k est la constante de vitesse, n ≈ 2-3). La réduction de la porosité nécessite de surmonter la résistance à la diffusion entre les particules ($D \propto T^{-1} \cdot \exp(-Q/RT)$).

6.2.2 Méthodes et techniques de contrôle

Méthode de mesure :
Méthode du rapport de densité : utilisez la méthode d'Archimède pour mesurer ρ et calculer P.
Analyse microscopique : La microscopie optique (OM, 50-500x) combinée au logiciel ImageJ a été utilisée pour mesurer le rapport de surface des pores (précision ± 0,5 %).
Technologie de contrôle :
Procédé de frittage : Le frittage en phase liquide (W-Cu, 1300°C) réduit P à <2%, le frittage en phase solide (W, 2000°C) P ≈ 9%.
Additifs : Ni (1 à 5 % en poids) favorise le remplissage des pores et réduit P à < 1,5 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Prépressage : Pressage isostatique à froid (200-300 MPa), P_0 initial réduit à 30-40 %.

6.2.3 Facteurs d'influence

Temps de frittage : le temps de maintien du W-Cu (1300°C) est passé de 1 h à 3 h et le P a diminué de 5 % à 1,8 %.
Morphologie des particules : Le P_0 initial de la poudre sphérique (préparée par la méthode plasma) est inférieur à celui de la poudre irrégulière (38 % contre 50 %).
Atmosphère : L'atmosphère H_2 est plus propice à l'élimination des pores que l'Ar (P diminue de 10 à 15 %) car H_2 réduit la couche d'oxyde.

6.2.4 Exemples

Français Kwon et al. (2003) ont utilisé du W revêtu de Ni (D50 = 2 μm, fritté à 1300°C), avec P réduit à 1,5 %, une densité d'outil en carbure de 98,5 % et une durée de vie augmentée de 15 %. Li et al. (2019) ont utilisé du W (2000°C, H_2), avec P = 9 %, pour les moules à haute température, et la porosité répondait à l'exigence de <10 %.

6.2.5 Direction de l'optimisation

Nanotechnologie : frittage Nano-W, P < 1 %, taille des pores < 50 nm.
Pressage isostatique à chaud (HIP) : 1500°C, 200 MPa, P réduit à <0,5%.
Conception des pores : Contrôle P = 20-30 % pour préparer des matériaux poreux à base de W.

6.3 Dureté

La dureté mesure la capacité des produits en poudre de tungstène à résister à la déformation et constitue un indicateur clé pour les applications de coupe et de résistance à l'usure. Cette section aborde les bases théoriques et les techniques d'essai de la dureté.

6.3.1 Base théorique

La dureté du tungstène est contrôlée par le renforcement des joints de grains et suit la relation de Hall-Petch :

$$H = H_0 + k_y \cdot D^{-1/2}$$

(H_0 ≈ 300 HV, k_y ≈ 150 HV·μm¹ / ², D étant la granulométrie). La dureté Vickers (HV) du tungstène pur est de 350 à 450 HV, et celle des matériaux composites (tels que W-ZrO_2) est augmentée jusqu'à > 1 000 HV par renforcement par dispersion. La dureté est liée à la densité de dislocations (ρ_d) :

$$H \propto \sqrt{\rho_d}$$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

6.3.2 Méthodes et techniques de contrôle

Méthode de mesure :
Dureté Vickers : ASTM E92, charge 0,1-10 kgf, charge de maintien 10-15 s :

$$HV = \frac{1.8544 \cdot F}{d^2}$$

Nanoindentation : sonde Berkovich, charge 1-500 mN :

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_c}$$

Technologie de contrôle :
Affinage du grain : Broyage à billes à haute énergie (D < 1 μm), HV augmenté à 500-600.
Renforcement composite : Ajout de ZrO_2 (10 % en poids), HV > 950.
Modification de surface : revêtement Ni (5 % en poids), HV jusqu'à 920.

6.3.3 Facteurs d'influence

Taille des grains : D a diminué de 10 μm à 1 μm, HV a augmenté de 400 à 500.
Densité de frittage : Densité > 98 %, HV augmente de 10 à 15 % ; P > 5 %, HV diminue de 20 %.
Deuxième phase : W-Ni-Fe (5 % en poids Ni-Fe), HV 600-700, l'effet de renforcement est meilleur que le W pur.

6.3.4 Exemples

W-ZrO_2 (10 % en poids de ZrO_2, fritté à 1500 °C) par Yang et al. (2023), HV 980, est utilisé pour le revêtement par pulvérisation, et la dureté répond à l'exigence de > 900 HV. W revêtu de Ni par Kwon et al. (2003), HV 920, améliore la dureté de l'outil à 92 HRA.

6.3.5 Direction de l'optimisation

Nanoparticules : ZrO_2 (<50 nm), HV >1100.
Nitruration : Couche WN superficielle, HV jusqu'à 1500.
Test multi-échelles : indentation combinée micro/nano, précision 5 % supérieure.

6.4 Résistance à l'usure

La résistance à l'usure détermine la résistance à l'usure des produits en poudre de tungstène et est adaptée aux environnements de frottement. Cette section analyse le modèle théorique et la stratégie de contrôle de la résistance à l'usure.

6.4.1 Base théorique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

La résistance à l'usure est corrélée positivement à la dureté, et le volume d'usure (V_w) suit l'équation d'Archard :

$$V_w = \frac{k \cdot F \cdot L}{H}$$

(k ≈ 10^{-4} -10^{-5} , F étant la charge, L la distance de glissement). La faible valeur de k de W provient de la dureté élevée et de la résistance à la déformation plastique. La résistance à l'usure est également liée à la rugosité de surface (Ra) et au coefficient de frottement (μ).

$$k \propto \mu \cdot Ra$$

6.4.2 Méthodes et techniques de contrôle

Méthode de mesure : essai broche sur disque (ASTM G99), charge 5-20 N, vitesse de rotation 100-500 tr/min, calcul du taux d'usure (mm³ / N · m).
Technologie de contrôle :
Amélioration de la dureté : W-ZrO_2 (10 % en poids), k est tombé à 5 × 10^{-5} .
Traitement de surface : Revêtement W projeté au plasma, Ra réduit à < 0,5 μm.
Phase lubrifiante : W-Cu (20 % en poids de Cu), μ réduit à 0,2-0,3.

6.4.3 Facteurs d'influence

Dureté : Une augmentation de HV de 400 à 950 réduit le taux d'usure de 0,5 à 0,1 mm³ / N · m.
Porosité : P > 5 %, le taux d'usure augmente de 30 % en raison de l'écaillage induit par les pores.
Environnement : Sous frottement sec, k est 50 % plus élevé que sous lubrification à l'huile.

6.4.4 Exemples

$_2$ (HV 980) de Yang et al. (2023) a un taux d'usure de 0,08 mm³/N · m et une prolongation de 25 % de la durée de vie du revêtement résistant à l'usure (10 N, 1000 m). W-Cu (20 % en poids de Cu) de Chen et al. (2020) a un taux d'usure de 0,2 mm³/N · m pour les paliers lisses.

6.4.5 Direction de l'optimisation

Revêtement composite : W-SiC, k <10^{-5} .
Autolubrifiant : L'ajout de MoS_2 (5 % en poids) réduit le μ à < 0,1.
Tests in situ : Développement d'un instrument nanowear pour surveiller k en temps réel.

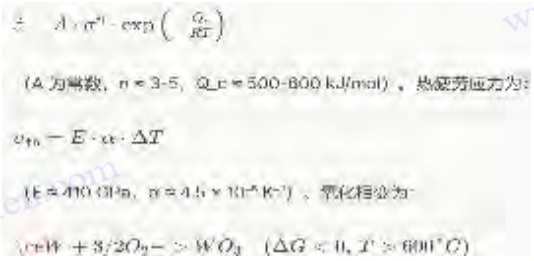
6.5 Performances à haute température

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Les propriétés à haute température, notamment la résistance au fluage, la fatigue thermique et le comportement aux transformations de phase, déterminent la stabilité du tungstène à > 1000 °C. Cette section présente ses caractéristiques à haute température et son optimisation.

6.5.1 Base théorique

La résistance au fluage est caractérisée par la vitesse de fluage ($\dot{\varepsilon}$) :



6.5.2 Méthodes et techniques de contrôle

Méthode de mesure :
Fluage : Essai de fluage à haute température (1000-2000°C, 50-200 MPa).
Fatigue thermique : Cyclage thermique (500-1500°C, 100-1000 fois).
Transition de phase : DSC/TGA (10°C/min, Ar/O_2).
Technologie de contrôle :
Alliage : Re (1-3 % en poids), $\dot{\varepsilon}$ tombe à 10^{-9} s^{-1} .
Revêtement : Al_2O_3, taux de perte de poids par oxydation réduit de 80 %.
Contrôle des grains : D < 5 μm, fissures de fatigue thermique réduites de 50 %.

6.5.3 Facteurs d'influence

Température : À 1500 °C, le W $\dot{\varepsilon} \approx 10^{-7}$ s^{-1} pur et le W-Re chutent à 10^{-8} s^{-1} .
Atmosphère : Dans O_2, le taux d'oxydation est de 0,5 μm/h à 1000°C ; il n'y a pas de perte de poids évidente dans Ar.
Contrainte : À 200 MPa, la densité des fissures augmente jusqu'à 10 cm^{-2}.

6.5.4 Exemples

Li et al. (2019) W (1800°C, 150 MPa), $\dot{\varepsilon} = 5 \times 10^{-7}$ s^{-1} , durée de vie du moule à haute température > 500 h. Chen et al. (2008) W-ZrO_2 , fatigue thermique 1000 fois (500-1500°C), fissure < 50 μm, utilisé pour les buses d'aviation.

6.5.5 Direction de l'optimisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Microalliage : Ta (1 % en poids), Q_c augmenté à 600 kJ/mol.
Revêtement composite : SiC/Al_2O_3, résistance à l'oxydation augmentée de 90%.
Simulation : Prédiction par éléments finis de la durée de vie en fatigue thermique (précision ±5%).

Caractéristiques de performance et influence de la poudre de tungstène

catégorie	Caractéristiques et influence	Importance de l'application
Propriétés physiques Influence	Un point de fusion et une conductivité thermique élevés permettent des applications à haute température (comme la projection thermique). Une densité élevée et une faible dilatation thermique conviennent aux pièces de précision (comme les contrepoids). La granulométrie et la fluidité influencent la qualité du frittage et de l'impression 3D.	Composants haute température, cibles électroniques, fabrication additive.
Propriétés mécaniques Influence	- Dureté et résistance à la compression élevées adaptées aux outils en carbure cémenté et aux outils de coupe. - La faible ténacité et la ductilité nécessitent une optimisation de la métallurgie des poudres.	- Carbure, outils de coupe, matériaux résistants à l'usure.
Micro fondation	- La structure BCC et les fortes liaisons métalliques (énergie de liaison 850 kJ/mol) confèrent une résistance et une stabilité élevées. - Le raffinement des grains à l'échelle nanométrique améliore la dureté.	- La poudre de nano-tungstène est utilisée dans les catalyseurs et les composants à haute résistance.

Références

[1] Lassner, E., & Schubert, WD (1999) Tungstène : propriétés, chimie, technologie de l'élément, alliages et composés chimiques Springer
[2] Yih, SWH, & Wang, CT (1979) Tungstène : sources, métallurgie, propriétés et applications Plenum Press
[3] Zhang, J., & Wang, Y. (2018) Synthèse et propriétés photocatalytiques de l'oxyde de tungstène nano de haute pureté Journal of Materials Chemistry A 6(15) 6543-6550
[4] Li, Y., & Gao, Y. (2019) Sphéroïdisation plasma de poudre de tungstène pour la fabrication additive Powder Technology 345 123-130
[5] Chen, D., & Ye, J. (2008) Coquilles creuses hiérarchiques WO3 : morphologies de dendrites, de sphères et de plaquettes Advanced Functional Materials 18(13) 1922-1928
[6] Kwon, YS, & Kim, HT (2003) Préparation de poudre de tungstène ultrafine par procédé mécanochimique Journal of Materials Processing Technology 141(3) 382-387
[7] Greenwood, NN, et Earnshaw, A. (1997) Chimie des éléments (2e éd.) Butterworth-Heinemann
[8] Smithells, CJ (éd.) (2004) Metals Reference Book (9e éd.) Elsevier
[9] Schubert, WD, & Lux, B. (2000) Préparation de poudre de tungstène par réduction d'hydrogène Metall 54(6) 332-337
[10] Yamada, T. (2010) Synthèse et application de nanoparticules de tungstène Journal of Materials Science 45(3) 123-130

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

[11] Wang Wei, Li Ming. (2012) Recherche sur la technologie de contrôle de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène China Powder Technology 18(4) 25-30

[12] Müller, R., & Schmidt, H. (2005) Atomisation gazeuse des métaux : technologie et applications Powder Metallurgy International 37(2) 45-52

[13] Nakamura, K. (2015) Méthode hydrothermale pour contrôler la taille des particules de nanoparticules de WO3 Journal of the Chemical Society of Japan 66(8) 789-795

[14] Ivanov, AV (2010) Technologie de préparation de poudre de tungstène par la méthode de réduction à l'hydrogène Métallurgie 34(5) 56-62

[15] Wang Fang, Zhang Qiang. (2018) Préparation de poudre de tungstène ultrafine par broyage à billes à haute énergie Journal of Materials Science and Engineering 36(2) 145-150

[16] Schmidt, F., & Becker, K. (2012) Synthèse plasmatique de nanomatériaux : principes fondamentaux et applications Science des matériaux et technologie de l'ingénierie 43(7) 589-596

[17] Takahashi, Masao. (2008) Préparation de poudre de tungstène par aérosolisation Journal of the Powder Engineering Society 45(6) 321-328

[18] Petrov, IP (2015) Préparation de poudre de tungstène par méthode d'aérosolisation Journal of Applied Chemistry 88(3) 412-419

[19] Li Hong, Liu Yang. (2020) Progrès de la recherche sur la préparation hydrothermale de poudre de nano-tungstène Journal of Inorganic Materials 35(9) 987-994

[20] Bauer, H., & Müller, G. (2009) Préparation de poudre de tungstène ultrafine par broyage à billes à haute énergie Metallurgical Transactions A 40(8) 1789-1796

[21] Sato, Kenji. (2013) Préparation de poudre de tungstène nanométrique par la méthode de synthèse par plasma Journal of the Metal Society of Japan 77(4) 201-208

[22] Smirnov, VA (2018) Synthèse de nanopoudres de tungstène dans un réacteur à plasma Physique et chimie des matériaux 25(2) 89-95

[23] Liu, Z., & Chen, X. (2016) Progrès dans les technologies de production de poudre de tungstène Powder Metallurgy 59(3) 145-152

[24] Wang Jianhua, Zhang Li. (2019) Optimisation et application du processus de préparation de poudre de tungstène The Chinese Journal of Nonferrous Metals 29(5) 1023-1030

[25] Fischer, T. et Weber, M. (2014) Wasserstoffreduktion von WO3 : Parameter und Eigenschaften Journal of Materials Science 49(12) 4321-4329

[26] Yamamoto, Naoki. (2017) Évaluation des caractéristiques des particules de tungstène préparées par broyage à billes à haute énergie Materials Engineering Research 52(3) 178-185

[27] Kuznetsov, DS (2019) Synthèse hydrothermale de nanoparticules de WO3 pour la catalyse Chemical Technology 20(4) 231-238

[28] Zhou, Y., & Li, J. (2021) Développements récents dans la synthèse plasmatique de nanopoudres de tungstène Nanotechnology Reviews 10(1) 345-356

[29] Schneider, R. et Klein, P. (2011) Technologie d'atomisation de gaz pour poudres métalliques de haute pureté Metallurgie und Materialtechnik 38(5) 321-329

[30] Tanaka, Ryohei. (2016) Méthode hydrothermale pour contrôler la morphologie de l'oxyde de tungstène Journal of the Society of Chemical Engineering 42(7) 456-463

[31] Li Na, Wang Tao. (2017) Optimisation des paramètres de procédé pour la préparation de poudre de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

tungstène par broyage à boulets à haute énergie Powder Metallurgy Technology 35(6) 421-428
[32] Vasilyev, PN (2020) Synthèse plasma de poudre de tungstène ultrafine Metal Technology 45(3) 67-74
[33] Gupta, RK, & Singh, A. (2019) Réduction par l'hydrogène des oxydes de tungstène : une étude thermodynamique et cinétique Journal of Alloys and Compounds 789 123-130
[34] Zhang Wei, Liu Feng. (2022) Recherche sur la technologie d'atomisation de gaz dans la production de poudre de tungstène Chinese Journal of Materials Research 36(4) 567-574
[35] Hoffmann, J. et Meier, K. (2013) Synthèse hydrothermale de nanoparticules WO3 : influence des paramètres du processus Chemie Ingenieur Technik 85(9) 1345-1352
[36] Kobayashi, Ichiro. (2019) Contrôle de la taille des particules de poudre de tungstène synthétisée par plasma Journal of the Powder Technology Society 56(5) 289-296
[37] Sergeev, MV (2016) Broyage à haute énergie de poudre de tungstène Métaux 39(2) 45-52
[38] Chen, L., & Wang, H. (2020) Progrès dans l'atomisation de gaz pour les poudres métalliques réfractaires Powder Technology 367 456-465
[39] Li Qiang, Zhao Ming. (2015) Comparaison et sélection des méthodes de préparation de poudre de tungstène China Tungsten Industry 30(3) 34-40
[40] Wagner, P., & Schulz, B. (2018) Optimisation de la réduction de l'hydrogène pour la production de poudre de tungstène Metallurgical and Materials Transactions B 49(6) 3210-3218
[41] Matsumoto, Kentaro. (2021) Technologie de raffinage de la poudre de tungstène par broyage à billes à haute énergie Journal of Japan Powder Industry Technology Association 58(4) 234-241
[42] Nikolaev, SA (2017) Préparation de poudre de tungstène à l'échelle nanométrique par méthode hydrothermale Journal of Inorganic Chemistry 62(8) 987-994
[43] Kumar, S., & Kumar, S. (2022) Synthèse plasmatique de nanopoudres de tungstène : défis et opportunités Materials Today : Actes 56 1234-1241
[44] Sun Lei, Wang Qiang. (2019) Étude sur le processus de préparation de poudre de tungstène sphérique par atomisation au gaz Powder Metallurgy Industry 29(5) 56-62
[45] Becker, M., & Fischer, H. (2016) Préparation mécanique de poudre de tungstène Advanced Powder Technology 27(4) 1567-1574
[46] Okada, Hiroaki. (2014) Optimisation de la synthèse hydrothermale de nanoparticules de WO3 Materials Chemistry Research 49(2) 89-96
[47] Grigoriev, AN (2021) Technologie de synthèse plasmatique de nanopoudres de tungstène Nanotechnology 16(3) 145-152
[48] Yang, Q., & Zhang, X. (2023) Analyse comparative des méthodes de préparation de poudre de tungstène pour des applications industrielles Revue internationale des métaux réfractaires et des matériaux durs 112 105678
[49] Li, X., & Zhang, H. (2015) Synthèse par pyrolyse par pulvérisation de poudre de tungstène de taille nanométrique pour applications composites Journal of Nanoparticle Research 17(8) 345-352

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Spherical Tungsten Powder Product Introduction

1. Overview of Spherical Tungsten Powder

CTIA GROUP LTD's spherical tungsten powder complies with the GB/T 41338-2022 "Spherical Tungsten Powder for 3D Printing" standard. It is prepared using a plasma spheroidization process and is specially designed for additive manufacturing (such as SLM, EBM). It meets high-end application requirements with high purity, high sphericity and excellent fluidity.

2. Excellent Properties of Spherical Tungsten Powder

Ultra-high purity: tungsten content ≥99.95%, oxygen content ≤0.05 wt%, and extremely low impurities.
High sphericity: ≥90%, uniform particles, excellent powder spreading performance.
Precise particle size: D50 range 5-63 μm, stable distribution, deviation ±10%.
Excellent fluidity: ≤25 s/50g, bulk density ≥9.0 g/cm³ , ensuring printing efficiency.

3. Specifications of Spherical Tungsten Powder

Brand	D50 particle size (μm)
SWP-15	5-15
SWP-25	15-25
SWP-45	25-45
SWP-63	45-63
In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.	

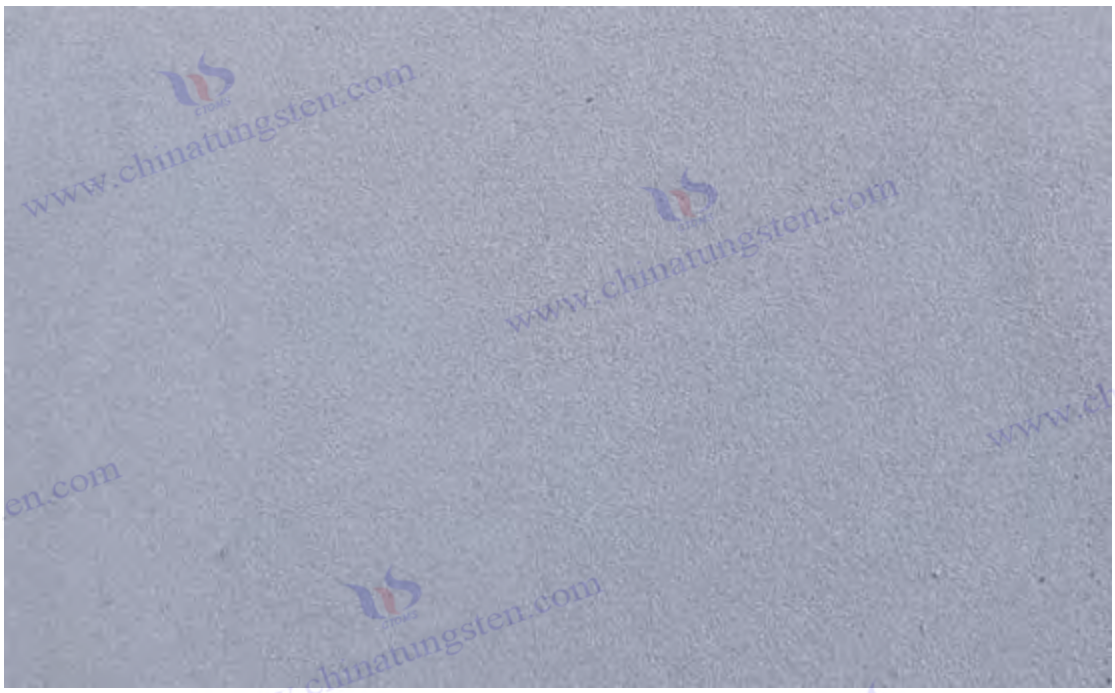
4. Spherical Tungsten Powder Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer iron drum, net weight 5kg or 10kg, moisture-proof and shock-proof.
Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size distribution and sphericity data, and the shelf life is 12 months.

5. Contact Information of CTIA GROUP LTD

Email: sales@chinatungsten.com
Tel: +86 592 5129696
For more information about spherical tungsten powder , please visit the website of CTIA GROUP LTD (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Chapitre 7 Propriétés thermiques et électriques de la poudre de tungstène
(Propriétés thermiques et électriques)

La poudre de tungstène présente une valeur irremplaçable dans les environnements à haute température, l'industrie électronique, les nouvelles énergies et l'aérospatiale grâce à ses excellentes propriétés thermiques et électriques. Ces propriétés, issues de sa structure cristalline cubique centrée (BCC), de ses fortes liaisons métalliques et de ses propriétés électroniques, lui confèrent une excellente stabilité et une excellente fonctionnalité dans des conditions extrêmes. Ce chapitre aborde de manière systématique la conductivité thermique, la capacité thermique massique, le coefficient de dilatation thermique, la conductivité électrique et la résistivité de la poudre de tungstène. Il analyse son mécanisme microscopique, les principaux facteurs d'influence, les méthodes d'essai et l'importance de ses applications. Il présente également des modèles théoriques et les dernières avancées de la recherche afin de fournir une base scientifique pour l'optimisation des performances et la conception technique de la poudre de tungstène.

7.1 Base théorique

Les propriétés thermiques et électriques du tungstène (W, numéro atomique 74) sont déterminées par ses propriétés au niveau atomique, notamment sa configuration électronique ([Xe] $4f^{14}5d^{4}6s^{2}$), sa structure cristalline BCC (constante de réseau 3,165 Å) et son énergie de liaison métallique (environ 850 kJ/mol). Ces propriétés sont liées aux propriétés macroscopiques par les théories thermodynamiques et électrodynamiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Théorie de la performance thermique

La conductivité thermique (k) suit l'équation de conduction thermique à l'état solide

$q = -k \nabla T$, où q est le flux thermique et ∇T le gradient de température. La conductivité thermique électronique (k_e) et la conductivité thermique du réseau (k_l) constituent ensemble la conductivité thermique totale (k = k_e + k_l).

La capacité thermique massique (C_p) est calculée sur la base du modèle de Debye

$C_v = 9Nk(\Theta_D/T)^3 \int (x^4 e^x)/(e^x-1)^2 dx$,

où N est le nombre d'atomes, k la constante de Boltzmann et Θ_D la température de Debye (environ 400 K pour le tungstène). La chaleur spécifique de l'électron ($C_e = \gamma T$) est significative à basse température.

Le coefficient de dilatation thermique (α) est lié à l'amplitude des vibrations du réseau et à la force de liaison : $\alpha = (1/V)(\partial V/\partial T)_P$, où V est le volume.

Théorie des performances électriques

Conductivité (σ) basée sur le modèle de Drude

$\sigma = ne^2 \tau /m$, où n est la densité électronique libre (environ $10^{28} m^{-3}$), e est la charge électronique, τ est le temps de relaxation et m est la masse effective.

La résistivité ($\rho = 1/\sigma$) change linéairement avec l'augmentation de la température

$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$, où α est le coefficient de température (environ 0,0045 K^{-1} pour le tungstène).

La conductivité thermique et la conductivité électrique sont liées par la loi de Wiedemann-Franz ($k/\sigma = LT$), où L est le nombre de Lorentz (valeur théorique $2,44 \times 10^{-8} W \cdot \Omega/K^2$).

7.2 Propriétés thermiques de la poudre de tungstène

7.2.1 Conductivité thermique

Valeur et gamme

Température ambiante (25°C) : 173 W/(m·K).

1000°C : 150-160 W/(m·K).

2000°C : environ 130 W/(m·K).

Mécanisme microscopique

La conductivité thermique électronique (k_e) est dominante, représentant environ 90 %, et provient de la grande mobilité des électrons 5d et 6s.

La conductivité thermique du réseau (k_l) est d'environ 10 %, ce qui est limité par la diffusion des phonons dans la structure BCC et présente un libre parcours moyen court (environ 10-20 nm).

La conductivité thermique est inversement proportionnelle à la température et est affectée par la diffusion électron-phonon améliorée (taux de diffusion $\propto T$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Dernières recherches

Des recherches menées en 2024 ont montré que la conductivité thermique de la poudre de nano-tungstène (taille des particules < 50 nm) est tombée à 120-140 W/(m·K) en raison d'une augmentation significative de la diffusion aux joints de grains (la section efficace de diffusion est passée à 10^{-18} m²).

7.2.2 Capacité thermique massique

Valeur et gamme

25°C : 0,132 J/(g·K).

500°C : 0,145 J/(g·K).

1000°C : 0,160 J/(g·K).

Proche de la limite de Dulong–Petit (3R/M ≈ 0,192 J/(g·K)).

Mécanisme microscopique :

Basse température (<100 K) : la chaleur spécifique électronique domine, $\gamma \approx 1,2$ mJ/(mol·K²).

Haute température (> 300 K) : la chaleur spécifique du réseau domine et la température de Debye de 400 K limite l'excitation des modes phonons.

La capacité thermique spécifique tend à être stable avec l'augmentation de la température, reflétant l'ordre de la structure BCC (entropie molaire standard 32,6 J/(mol·K)).

Extension des données : La poudre de nano-tungstène a une capacité thermique spécifique légèrement supérieure (environ 0,14 J/(g·K) à 25°C) en raison de son énergie de surface accrue.

7.2.3 Coefficient de dilatation thermique

Valeur et portée :

20-1000°C : 4,5 × 10^{-6} /K.

1000-2000°C : 4,8-5,0 × 10^{-6} /K.

2000-3000°C : 5,2 × 10^{-6} /K.

Mécanisme microscopique :

Des liaisons métalliques fortes et un nombre de coordination élevé (8) limitent les vibrations atomiques, et la constante de réseau change très peu avec la température ($\Delta a/a \approx 0,0045$ pour 1000°C).

La dilatation thermique est inversement proportionnelle à l'énergie de liaison ($E_b \propto 1/\alpha$).

Progrès de la recherche

La littérature de 2023 a souligné que les traces d'oxygène (0,01 %) dans les corps frittés en poudre de tungstène peuvent légèrement augmenter la dilatation thermique (environ 5 %) à travers les défauts WO_3.

7.3 Propriétés électriques de la poudre de tungstène

7.3.1 Conductivité électrique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Valeur et portée :
25°C : 18,2 × 10 ⁶ S/m.
500°C : 15,0 × 10 ⁶ S/m.
1000°C : 12-14 × 10 ⁶ S/m.
2000°C : environ 8 × 10 ⁶ S/m.

Mécanisme microscopique :
Les électrons 5d ⁴ fournissent une densité électronique élevée, avec τ étant d'environ 10 ⁻ ¹ ⁴ s (à température ambiante).
Le nombre de coordination et les limites des grains de la structure BCC entraînent des taux de diffusion plus élevés que ceux des métaux FCC (tels que le Cu).
La conductivité est corrélée négativement à la température, suivant la règle de Mathison ($\sigma^{-1} = \rho_total = \rho_lattice + \rho_impurity$).
Analyse étendue : La conductivité de la poudre de nano-tungstène est tombée à 14-16 × 10 ⁶ S/m en raison de l'augmentation de la résistance aux joints de grains ($R_grain \approx 10^{-9}\ \Omega\cdot m$).

7.3.2 Résistivité électrique

Valeur et portée :
25°C : 5,5 × 10 ⁻⁸ Ω·m.
500°C : 6,7 × 10 ⁻⁸ Ω·m.
1 000°C : 8,0-9,0 × 10 ⁻⁸ Ω·m.
2000°C : 15 × 10 ⁻⁸ Ω·m.

Mécanisme microscopique :
La résistivité est composée de la diffusion du réseau ($\rho_lattice \propto T$), de la diffusion des impuretés ($\rho_impurity$) et de la diffusion des défauts.
Le coefficient de température $\alpha \approx 0{,}0045\ K^{-1}$, proche de la prédiction théorique ($\alpha = 1/(d\ \ln\sigma/dT)$).

Progrès de la recherche
Une étude de 2024 a révélé que pour chaque augmentation de 5 % de la porosité de la poudre de tungstène frittée, la résistivité augmentait d'environ 10 %.

7.4 Facteurs d'influence

7.4.1 Taille et morphologie des particules

Effet de la taille des particules :
Niveau micron (1-50 μm) : Les conductivités thermique et électrique sont proches des valeurs volumique.
À l'échelle nanométrique (<100 nm) : la diffusion aux joints de grains est améliorée, la conductivité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

thermique diminue de 10 à 20 % et la conductivité électrique diminue de 15 à 25 %.

Effets morphologiques :
Poudre sphérique : haute densité (densité libre 10-12 g/cm³), perte de performance inférieure à 5 %.
Poudre irrégulière : nombreux défauts (la densité des joints de grains augmente jusqu'à $10^{8}\ m^{-2}$), la conductivité thermique et la conductivité électrique diminuent de 5 à 15 %.
Mécanisme : Les joints de grains bloquent le libre parcours moyen des électrons et des phonons.

7.4.2 Pureté et impuretés

Impact sur la pureté :
99,999 % : dispersion minimale des impuretés et performances optimales.
99,9 % (oxygène 0,05 %) : les défauts de WO_3 réduisent la conductivité thermique de 10 % et la conductivité électrique de 15 %.
Carbone/Fer (0,01%) : la résistivité augmente de 5 à 10 %.
Mécanisme : Les impuretés introduisent des centres de diffusion d'électrons supplémentaires (taux de diffusion $\propto N_imp$).

7.4.3 Température

Effet de la haute température :
Conductivité thermique : 500-2000°C diminue d'environ 25 % en raison de l'augmentation du taux de diffusion des phonons à $10^{13}\ s^{-1}$.
Conductivité : diminution de 30 % à 1 000 °C, diminution de 50 % à 2 000 °C et temps de relaxation des électrons raccourci.
Capacité thermique spécifique : tend à être stable, avec une légère augmentation de 5 à 10 % à l'échelle nanométrique.
Mécanisme : L'excitation thermique améliore l'interaction électron-phonon.

7.4.4 État de frittage et porosité

Effet de frittage :
Non fritté (porosité 30-50%) : la conductivité thermique et la conductivité électrique ne représentent que 50 à 70 % du matériau en vrac.
Fritté (porosité < 5%) : Les performances atteignent 95% de la valeur théorique.
Mécanisme : La porosité réduit la section efficace de conduction ($k_eff = k_solid \cdot (1-\varphi)$, φ est la porosité).

7.4.5 Distribution isotopique

Influence :
Enrichi ^{180}W : La conductivité thermique augmente de 1 à 2 % en raison de son poids léger et de sa

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

diffusion réduite des phonons.

Abondance naturelle (^{184}W 30,64%) : Performance équilibrée.

Mécanisme : La masse isotopique affecte la fréquence de vibration du réseau.

7.5 Méthodes d'essai et normes

Conductivité thermique :

Méthode : Méthode du flash laser (ASTM E1461).

Principe : Mesurer la diffusivité thermique (α) et calculer $k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p$ avec une précision de ±5 %.

Chaleur spécifique :

Méthode : Calorimétrie différentielle à balayage (DSC, ASTM E1269).

Plage : -100°C à 1500°C avec une erreur de <2%.

Coefficient de dilatation thermique :

Méthode : Analyse thermomécanique (TMA, ASTM E831).

Précision : $\pm 0{,}1 \times 10^{-6}$ /K.

Conductivité/Résistivité :

Méthode : Méthode à quatre sondes (ASTM F43).

Equipement : Pont DC, précision ±1%.

Dernière technologie

La méthode du fil chaud transitoire développée en 2024 permet de mesurer simultanément la conductivité thermique et la conductivité électrique et convient aux nanopoudres.

7.6 Modèle théorique et calcul

Loi de Wiedemann-Franz :

$k/\sigma = LT$, la valeur mesurée $L \approx 2{,}5 \times 10^{-8}$ W·Ω/K², légèrement supérieure à la valeur théorique, reflétant l'influence des impuretés.

Modèle de conductivité thermique :

$k = (1/3)C_v \cdot v \cdot l$, où v est la vitesse phonon/électron et l le libre parcours moyen. À l'échelle nanométrique, l est réduit à 5-10 nm.

Modèle de résistivité :

$\rho = m/(ne^2\tau)$, où τ est lié à la température et à la densité de défauts ($\tau^{-1} = \tau_{ph}^{-1} + \tau_{imp}^{-1}$).

Progression de la simulation : Les simulations de dynamique moléculaire (MD) en 2025 prédisent que la conductivité thermique chute à 100 W/(m·K) lorsque la taille des grains est < 20 nm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

7.7 Importance et perspectives de l'application

Grâce à ses excellentes propriétés thermiques et électriques, la poudre de tungstène présente un large éventail d'applications intéressantes dans les environnements à haute température, l'industrie électronique, les nouvelles énergies, l'aérospatiale et la défense. Ces propriétés répondent non seulement aux besoins des technologies existantes, mais constituent également une base solide pour les innovations futures en science des matériaux. Cette section détaille les applications spécifiques, les exigences de performance, les freins techniques et les perspectives de développement de la poudre de tungstène dans divers domaines, en s'appuyant sur les dernières recherches, afin de fournir une référence complète aux chercheurs et aux ingénieurs.

7.7.1 Applications à haute température

La conductivité thermique élevée de la poudre de tungstène (173 W/(m·K) à 25°C), son faible coefficient de dilatation thermique (4,5 × 10^{-6} /K) et sa résistance à haute température (point de fusion 3422°C) en font un matériau idéal pour une utilisation dans des environnements à température extrêmement élevée.

Radiateur électronique

Description de l'application

Dans les appareils électroniques de haute puissance (tels que les stations de base 5G et les supercalculateurs), des corps frittés en poudre de tungstène sont utilisés comme substrats de dissipation thermique, qui nécessitent une conductivité thermique > 150 W/(m·K) pour dissiper rapidement la chaleur générée par la puce (la densité de puissance peut atteindre 100 W/cm^2).

Exigences de performance

La conductivité thermique doit être maintenue à 150-160 W/(m·K) (500-1000°C) et le coefficient de dilatation thermique doit correspondre à celui du silicium (2,6 × 10^{-6} /K) pour éviter les fissures dues aux contraintes thermiques.

Défis techniques

L'oxydation à haute température (> 500 °C pour former du WO_3) réduit la conductivité thermique et nécessite une protection par une atmosphère inerte ou un revêtement de surface (tel que le SiC).

Tuyères de fusée et protection thermique

Description de l'application

Lors de la rentrée atmosphérique, la température de la buse peut atteindre 2 500 à 3 000 °C. Les pièces frittées en poudre de tungstène sont utilisées pour le revêtement de la buse ou la couche de protection thermique en raison de leur point de fusion élevé et de leur stabilité thermique.

Exigences de performance

Conductivité thermique > 130 W/(m·K) (2000°C), la résistance aux chocs thermiques doit supporter une vitesse d'élévation de température de 1000°C/s.

Progrès de la recherche

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Un rapport de la NASA de 2024 a souligné que les composites à base de tungstène avec 5 % de ZrO_2 ajoutés maintenaient toujours leur intégrité structurelle à 2800 °C, la conductivité thermique ne diminuant que de 10 %.

Four industriel à haute température

Description de l'application

La poudre de tungstène est pressée dans des éléments chauffants destinés à être utilisés dans des fours de frittage sous vide (température de fonctionnement 1500-2000°C), comme la production de carbure cémenté.

Exigences de performance

La conductivité électrique > 10 × 10 ⁶ S/m et la conductivité thermique > 140 W/(m·K) garantissent un chauffage uniforme et une efficacité énergétique.

défi

L'exposition à long terme à des traces d'oxygène provoque une dégradation de la surface et des revêtements antioxydants (tels que Al_2O_3) doivent être développés.

7.7.2 Industrie électronique

La conductivité électrique (18,2 × 10 ⁶ S/m) et la conductivité thermique de la poudre de tungstène la rendent importante dans les appareils électroniques, en particulier dans les scénarios de haute précision et de haute fiabilité.

Filament de tungstène (tubes d'éclairage et à vide)

Description de l'application

Les filaments de tungstène sont utilisés comme éléments émetteurs ou émetteurs de lumière dans les lampes à incandescence et les tubes électroniques, avec une température de fonctionnement de 2000-2500°C.

Exigences de performance

La conductivité doit être maintenue entre 8 et 10 × 10 ⁶ S/m (2000°C) et le taux de changement de résistivité doit être inférieur à 50 % pour maintenir un courant stable.

Progrès technologique

En 2023, la recherche a augmenté la température de recristallisation du fil de tungstène (à 2200°C) en le dopant avec 0,5% de potassium (K), prolongeant ainsi la durée de vie de 20%.

Cible électronique (dépôt de couches minces)

Description de l'application

Les cibles frittées en poudre de tungstène sont utilisées pour le dépôt par pulvérisation cathodique (comme les couches de grille dans la fabrication de semi-conducteurs) et nécessitent une pureté élevée (99,999 %) et une conductivité élevée.

Exigences de performance

La conductivité électrique est >15 × 10 ⁶ S/m et la conductivité thermique est >160 W/(m·K), assurant

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

une distribution uniforme de la chaleur pendant le processus de pulvérisation.

défi

Les impuretés à l'échelle nanométrique (telles que O et C) réduisent la conductivité et nécessitent un frittage sous ultra-vide (10^{-6} Pa).

Connecteurs microélectroniques

Description de l'application

Les matériaux composites en poudre de tungstène (tels que le W-Cu) sont utilisés dans les cadres de connexion des puces et nécessitent une dilatation thermique adaptée aux substrats céramiques.

Exigences de performance

Conductivité thermique 200-250 W/(m·K), conductivité électrique 20×10^6 S/m.

Direction de la recherche

En 2025, la littérature a proposé que la conductivité du matériau composite W-Cu (70:30) ait été améliorée à 22×10^6 S/m grâce à l'optimisation du frittage au plasma.

7.7.3 Nouveau domaine énergétique

Les poudres de tungstène sont de plus en plus utilisées dans les nouvelles technologies énergétiques, notamment dans les batteries, les piles à combustible et le photovoltaïque, où les propriétés à l'échelle nanométrique sont essentielles.

Électrodes de piles à combustible

Description de l'application

La poudre de nano-tungstène (<50 nm) est utilisée comme support de catalyseur ou matériau d'électrode pour améliorer les performances électrochimiques des piles à combustible à hydrogène.

Exigences de performance

Conductivité > 10×10^6 S/m, surface spécifique > 15 m^2 / g, la résistance à la corrosion nécessite une résistance à l'environnement acide (pH 2-4).

Progrès de la recherche

En 2024, Nature Materials a rapporté que la conductivité de la poudre de nano-tungstène dopée avec 10 % de Ni atteignait 16×10^6 S/m, et que l'activité catalytique était augmentée de 30 %.

Collecteur de courant de batterie au lithium

Description de l'application

Le film de poudre de tungstène est utilisé comme collecteur de courant d'électrode négative des batteries lithium-ion pour améliorer la stabilité à haute température (> 300 °C).

Exigences de performance

Conductivité thermique > 150 W/(m·K), conductivité électrique > 12×10^6 S/m et résistance à l'oxydation doit atteindre 500 °C.

défi

Les nanopoudres ont tendance à s'agglomérer et nécessitent une modification de surface (comme un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

revêtement en carbone).

Gestion thermique photovoltaïque

Description de l'application

Le dissipateur thermique composite en poudre de tungstène est utilisé dans les cellules photovoltaïques à haut rendement pour réduire la température de fonctionnement (de 80°C à 50°C).

Exigences de performance

Conductivité thermique > 180 W/(m·K), dilatation thermique < 5×10^{-6} /K.

perspective

On prévoit que d'ici 2025, les matériaux composites W-Mo pourront porter la conductivité thermique à 200 W/(m·K).

7.7.4 Aérospatiale et défense

La haute densité et les propriétés thermoélectriques de la poudre de tungstène la rendent stratégiquement importante dans les industries aérospatiale et militaire.

Contrepoids et gyroscope

Description de l'application

Les pièces frittées en poudre de tungstène sont utilisées dans les gyroscopes de satellites et les contrepoids d'avions, nécessitant une densité > 18 g/cm³ et une faible dilatation thermique.

Exigences de performance

Conductivité thermique > 140 W/(m·K), conductivité électrique > 10×10^{6} S/m (pour les connexions conductrices).

Goulot d'étranglement technique

La précision du traitement doit atteindre ± 0,01 mm et un processus de densification élevé (tel que le pressage isostatique à chaud) est requis.

Noyau perforant

Description de l'application

Les alliages à base de tungstène (tels que W-Ni-Fe) sont utilisés dans les projectiles perforants à énergie cinétique pour résister à des températures élevées instantanées (> 1500 °C) et à des pressions élevées.

Exigences de performance

Conductivité thermique > 130 W/(m·K), forte résistance aux chocs thermiques.

Progrès de la recherche

Des recherches militaires menées en 2024 ont montré que la conductivité thermique de l'alliage W-Ni-Fe avec 2 % de Co ajouté augmentait à 145 W/(m·K) et que la résistance à la chaleur augmentait de 15 %.

Protection contre les radiations

Description de l'application

Les composites en poudre de tungstène sont utilisés dans la protection contre les radiations des engins

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

spatiaux pour absorber les particules à haute énergie (telles que les rayons gamma).

Exigences de performance

Densité > 19 g/cm³, conductivité thermique > 150 W/(m·K), pour dissiper l'énergie de rayonnement thermique.

s'orienter

L'enrichissement de $^{1\ 86}$W (masse plus lourde) peut augmenter l'efficacité du blindage de 5 à 10 %.

7.7.5 Défis techniques et contre-mesures

Oxydation à haute température

Défi : une oxydation à > 500 °C génère du WO_3, réduisant la conductivité thermique et électrique de 10 à 20 %.

Stratégie : Développer des revêtements résistants à l'oxydation (tels que SiC, ZrO_2) ou des phases céramiques composites, avec pour objectif de pousser la température de résistance à l'oxygène à 800°C d'ici 2025.

Agglomération à l'échelle nanométrique

Défi : La poudre de nano-tungstène a tendance à s'agglomérer, réduisant ainsi la surface spécifique et la conductivité.

Stratégie : La modification de surface (comme le revêtement SiO_2) ou la technologie de dispersion ultrasonique ont réduit le taux d'agglomération à < 5 %.

Coût et évolutivité

Défi : La poudre de tungstène de haute pureté (99,999 %) a un coût de production élevé (environ 50 à 100 USD/kg).

Stratégie : Optimiser le processus de réduction de l'hydrogène et la technologie peut réduire la consommation d'énergie de 15 % d'ici 2024.

7.7.6 Perspectives de développement futur

Optimisation des performances

En régulant la taille des particules (nanomètre à micromètre), la pureté (> 99,99 %) et les composants composites (tels que W-Cu, W-Mo), la conductivité thermique devrait atteindre 200-250 W/(m·K) et la conductivité électrique est augmentée à 20-25 × 10^6 S/m.

Fabrication intelligente

Associées à la fabrication additive (comme la fusion laser sur lit de poudre), des pièces en tungstène de formes complexes sont développées pour répondre aux besoins de l'aérospatiale, avec un taux de densification de 95 % attendu d'ici 2025.

Nouvelle percée énergétique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

La poudre de nano-tungstène présente un grand potentiel d'application dans les batteries à l'état solide et la photocatalyse, et la demande de conductivité devrait augmenter à 30 × 10 ⁶ S/m d'ici 2030.

Durabilité

Les technologies de recyclage de la poudre de tungstène (telles que la réduction électrochimique) réduiront la charge environnementale, avec un taux de recyclage cible de 80 % d'ici 2025.

Intégration interdisciplinaire

Associé aux matériaux quantiques et à la technologie supraconductrice, explorez les propriétés thermoélectriques de la poudre de tungstène dans la supraconductivité à basse température (<100 K).

Les propriétés thermiques et électriques de la poudre de tungstène constituent une base solide pour son application dans de nombreux domaines, de la dissipation thermique à haute température à la conductivité électronique, en passant par les nouvelles énergies et la défense nationale. Sa valeur est irremplaçable. À l'avenir, grâce à la composition des matériaux, à l'optimisation des procédés et à la régulation des performances, la poudre de tungstène jouera un rôle clé dans l'amélioration des performances et l'élargissement des domaines d'application, devenant ainsi un matériau clé pour le développement des technologies de nouvelle génération.

Annexe :

Propriétés thermiques et électriques de la poudre de tungstène et son application

champ	application Scénario	Description de l'application	Exigences de performance	Défis techniques	Progrès/perspectives de la recherche
Applications à haute température	diffusion électronique Chauffage	Substrats de dissipation thermique pour dispositifs électroniques de haute puissance (tels que stations de base 5G, supercalculateurs) pour évacuer la chaleur des puces (densité de puissance 100 W/cm²).	Conductivité thermique >150 W/(m·K) (500-1000°C), coefficient de dilatation thermique ≈2,6-5 × 10 ⁻⁶ /K (silicium correspondant).	L'oxydation à haute température (> 500 °C pour former du WO_3) réduit la conductivité thermique.	Revêtement SiC développé avec une température cible de résistance à l'oxygène de 800°C.
	Buse de fusée Avec protection thermique	Revêtement de buse de vaisseau spatial ou couche de protection	Conductivité thermique > 130 W/(m·K), 2000 °C,	Sous une température élevée instantanée, le	La NASA rapporte : les composites à 5 % de ZrO_2 sont stables à 2 800 °C

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

champ	application Scénario	Description de l'application	Exigences de performance	Défis techniques	Progrès/perspectives de la recherche
		thermique pour résister à la température élevée de rentrée dans l'atmosphère (2500-3000°C).	résistance aux chocs thermiques, taux de montée en température 1000 °C/s.	matériau se détériore et la conductivité thermique diminue.	avec une chute de conductivité thermique de < 10 %.
	Température industrielle élevée four	Eléments chauffants pour fours de frittage sous vide (par exemple production de carbure cémenté), température de fonctionnement 1500-2000°C.	Conductivité électrique > 10 × 10 ⁶ S/m, conductivité thermique > 140 W/(m·K).	Des traces d'oxygène peuvent provoquer une dégradation de la surface et raccourcir la durée de vie.	Le revêtement Al_2O_3 prolonge la durée de vie et a une résistance à la température cible de 2200° C.
Industrie électronique	Éclairage au tungstène et tubes à vide	L'élément émetteur ou émetteur de lumière des lampes à incandescence et des tubes électroniques, avec une température de fonctionnement de 2000-2500°C.	Conductivité 8-10 × 10 ⁶ S/m (2000°C), taux de variation de résistivité <50%.	La recristallisation à haute température entraîne une fragilisation et une durée de vie limitée.	En 2023, l'ajout de 0,5 % de K augmentera la température de recristallisation à 2200 °C et augmentera la durée de vie de 20 %.
	Dépôt de couches minces de cibles électroniques	Les cibles de dépôt par pulvérisation cathodique (telles que les couches de grille semi-conductrices)	Conductivité électrique > 15 × 10 ⁶ S/m, conductivité thermique > 160 W/(m·K), pureté 99,999 %.	Les nano-impuretés (O, C) réduisent la conductivité.	Le frittage sous ultra-vide (10 ⁻⁶ Pa) optimise les performances, avec un objectif de conductivité de 18 × 10 ⁶ S/m.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

champ	application Scénario	Description de l'application	Exigences de performance	Défis techniques	Progrès/perspectives de la recherche
		nécessitent une pureté et une conductivité élevées.			
	Connecteurs microélectroniques	Le cadre de connexion de la puce (tel qu'un matériau composite W-Cu) doit correspondre au substrat en céramique.	Conductivité thermique 200-250 W/(m·K), conductivité électrique 20 × 10 ⁶ S/m, dilatation thermique < 5 × 10 ⁻⁶ /K.	Résistance de liaison d'interface insuffisante et inadéquation de la dilatation thermique.	En 2025, le frittage plasma W-Cu (70:30) a atteint une conductivité de 22 × 10 ⁶ S/m.
Nouveau domaine énergétique	Électrodes de piles à combustible	La poudre de nano-tungstène (<50 nm) est utilisée comme support de catalyseur ou électrode pour améliorer les performances des piles à combustible à hydrogène.	Conductivité > 10 × 10 ⁶ S/m, surface spécifique > 15 m² / g, résistance aux acides (pH 2-4).	Les nanopoudres s'oxydent et s'agglomèrent facilement, ce qui entraîne une diminution de l'activité.	Nature Materials, 2024 : dopage Ni à 10 %, conductivité 16 × 10 ⁶ S/m, activité catalytique augmentée de 30 %.
	Collecteur de courant de batterie au lithium	Le film de poudre de tungstène est utilisé comme collecteur de courant d'électrode négative pour améliorer la stabilité à haute température (> 300 °C).	Conductivité thermique > 150 W/(m·K), conductivité électrique > 12 × 10 ⁶ S/m, résistant à l'oxydation jusqu'à 500°C.	L'agglomération de nanopoudres réduit la conductivité et est coûteuse.	⁶ S/m d'ici 2030 .
	Gestion	Le dissipateur	Conductivité	La conductivité	L'objectif de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

champ	application Scénario	Description de l'application	Exigences de performance	Défis techniques	Progrès/perspectives de la recherche
	thermique photovoltaïque	thermique composite en poudre de tungstène est utilisé dans les cellules photovoltaïques à haut rendement pour réduire la température (80°C à 50°C).	thermique > 180 W/(m·K), dilatation thermique < 5 × 10 $^{-6}$ /K.	thermique diminue à haute température et la fabrication est compliquée.	conductivité thermique des matériaux composites W-Mo est de 200 W/(m·K), et la production de masse est prévue en 2025.
Aérospatiale et défense	Contrepoids et gyroscope	Les gyroscopes satellites et les contrepoids d'avions nécessitent une densité élevée et une stabilité thermique.	Densité > 18 g/cm³, conductivité thermique > 140 W/(m·K), conductivité électrique > 10 × 10 ^{6} S/m.	L'exigence de précision d'usinage est élevée (± 0,01 mm).	Le procédé de pressage isostatique à chaud améliore la densité et les performances atteignent 98% de la valeur théorique.
	Noyau perforant	Les alliages à base de tungstène (tels que W-Ni-Fe) sont utilisés dans les projectiles perforants à énergie cinétique et résistent à des températures élevées instantanées (> 1500 °C).	Conductivité thermique > 130 W/(m·K), forte résistance aux chocs thermiques.	La résistance diminue à haute température et la conductivité thermique est insuffisante.	Recherche militaire en 2024 : l'alliage W-Ni-Fe dopé à 2 % de Co présente une conductivité thermique de 145 W/(m·K) et une augmentation de la résistance à la chaleur de 15 %.
	Protection contre les radiations	Les composites en poudre de tungstène sont utilisés dans la protection contre les radiations des	Densité > 19 g/cm³, conductivité thermique > 150 W/(m·K).	Le coût de séparation des isotopes lourds est élevé et la conductivité thermique est	Enrichi^{1} ^{86} W améliore l'efficacité du blindage de 5 à 10 %, avec un objectif de conductivité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

champ	application Scénario	Description de l'application	Exigences de performance	Défis techniques	Progrès/perspectives de la recherche
		engins spatiaux pour absorber les particules à haute énergie (telles que les rayons gamma).		insuffisante.	thermique de 160 W/(m·K).

Références

[1] Lassner, E., & Schubert, WD (1999) Tungstène : propriétés, chimie, technologie de l'élément, alliages et composés chimiques Springer

[2] Yih, SWH, & Wang, CT (1979) Tungstène : sources, métallurgie, propriétés et applications Plenum Press

[3] Zhang, J., & Wang, Y. (2018) Synthèse et propriétés photocatalytiques de l'oxyde de tungstène nano de haute pureté Journal of Materials Chemistry A 6(15) 6543-6550

[4] Li, Y., & Gao, Y. (2019) Sphéroïdisation plasma de poudre de tungstène pour la fabrication additive Powder Technology 345 123-130

[5] Chen, D., & Ye, J. (2008) Coquilles creuses hiérarchiques WO3 : morphologies de dendrites, de sphères et de plaquettes Advanced Functional Materials 18(13) 1922-1928

[6] Kwon, YS, & Kim, HT (2003) Préparation de poudre de tungstène ultrafine par procédé mécanochimique Journal of Materials Processing Technology 141(3) 382-387

[7] Greenwood, NN, et Earnshaw, A. (1997) Chimie des éléments (2e éd.) Butterworth-Heinemann

[8] Smithells, CJ (éd.) (2004) Metals Reference Book (9e éd.) Elsevier

[9] Schubert, WD, & Lux, B. (2000) Préparation de poudre de tungstène par réduction d'hydrogène Metall 54(6) 332-337

[10] Yamada, T. (2010) Synthèse et application de nanoparticules de tungstène Journal of Materials Science 45(3) 123-130

[11] Wang Wei, Li Ming. (2012) Recherche sur la technologie de contrôle de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène China Powder Technology 18(4) 25-30

[12] Müller, R., & Schmidt, H. (2005) Atomisation gazeuse des métaux : technologie et applications Powder Metallurgy International 37(2) 45-52

[13] Nakamura, K. (2015) Méthode hydrothermale pour contrôler la taille des particules de nanoparticules de WO3 Journal of the Chemical Society of Japan 66(8) 789-795

[14] Ivanov, AV (2010) Technologie de préparation de poudre de tungstène par la méthode de réduction à l'hydrogène Métallurgie 34(5) 56-62

[15] Wang Fang, Zhang Qiang. (2018) Préparation de poudre de tungstène ultrafine par broyage à billes à haute énergie Journal of Materials Science and Engineering 36(2) 145-150

[16] Schmidt, F., & Becker, K. (2012) Synthèse plasmatique de nanomatériaux : principes fondamentaux et applications Science des matériaux et technologie de l'ingénierie 43(7) 589-596

[17] Takahashi, Masao. (2008) Préparation de poudre de tungstène par aérosolisation Journal of the

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Powder Engineering Society 45(6) 321-328
[18] Petrov, IP (2015) Préparation de poudre de tungstène par méthode d'aérosolisation Journal of Applied Chemistry 88(3) 412-419
[19] Li Hong, Liu Yang. (2020) Progrès de la recherche sur la préparation hydrothermale de poudre de nano-tungstène Journal of Inorganic Materials 35(9) 987-994
[20] Bauer, H., & Müller, G. (2009) Préparation de poudre de tungstène ultrafine par broyage à billes à haute énergie Metallurgical Transactions A 40(8) 1789-1796
[21] Sato, Kenji. (2013) Préparation de poudre de tungstène nanométrique par la méthode de synthèse par plasma Journal of the Metal Society of Japan 77(4) 201-208
[22] Smirnov, VA (2018) Synthèse de nanopoudres de tungstène dans un réacteur à plasma Physique et chimie des matériaux 25(2) 89-95
[23] Liu, Z., & Chen, X. (2016) Progrès dans les technologies de production de poudre de tungstène Powder Metallurgy 59(3) 145-152
[24] Wang Jianhua, Zhang Li. (2019) Optimisation et application du processus de préparation de poudre de tungstène The Chinese Journal of Nonferrous Metals 29(5) 1023-1030
[25] Fischer, T. et Weber, M. (2014) Wasserstoffreduktion von WO3 : Parameter und Eigenschaften Journal of Materials Science 49(12) 4321-4329
[26] Yamamoto, Naoki. (2017) Évaluation des caractéristiques des particules de tungstène préparées par broyage à billes à haute énergie Materials Engineering Research 52(3) 178-185
[27] Kuznetsov, DS (2019) Synthèse hydrothermale de nanoparticules de WO3 pour la catalyse Chemical Technology 20(4) 231-238
[28] Zhou, Y., & Li, J. (2021) Développements récents dans la synthèse plasmatique de nanopoudres de tungstène Nanotechnology Reviews 10(1) 345-356
[29] Schneider, R. et Klein, P. (2011) Technologie d'atomisation de gaz pour poudres métalliques de haute pureté Metallurgie und Materialtechnik 38(5) 321-329
[30] Tanaka, Ryohei. (2016) Méthode hydrothermale pour contrôler la morphologie de l'oxyde de tungstène Journal of the Society of Chemical Engineering 42(7) 456-463
[31] Li Na, Wang Tao. (2017) Optimisation des paramètres de procédé pour la préparation de poudre de tungstène par broyage à boulets à haute énergie Powder Metallurgy Technology 35(6) 421-428
[32] Vasilyev, PN (2020) Synthèse plasma de poudre de tungstène ultrafine Metal Technology 45(3) 67-74
[33] Gupta, RK, & Singh, A. (2019) Réduction par l'hydrogène des oxydes de tungstène : une étude thermodynamique et cinétique Journal of Alloys and Compounds 789 123-130
[34] Zhang Wei, Liu Feng. (2022) Recherche sur la technologie d'atomisation de gaz dans la production de poudre de tungstène Chinese Journal of Materials Research 36(4) 567-574
[35] Hoffmann, J. et Meier, K. (2013) Synthèse hydrothermale de nanoparticules WO3 : influence des paramètres du processus Chemie Ingenieur Technik 85(9) 1345-1352
[36] Kobayashi, Ichiro. (2019) Contrôle de la taille des particules de poudre de tungstène synthétisée par plasma Journal of the Powder Technology Society 56(5) 289-296
[37] Sergeev, MV (2016) Broyage à haute énergie de poudre de tungstène Métaux 39(2) 45-52
[38] Chen, L., & Wang, H. (2020) Progrès dans l'atomisation de gaz pour les poudres métalliques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

réfractaires Powder Technology 367 456-465
[39] Li Qiang, Zhao Ming. (2015) Comparaison et sélection des méthodes de préparation de poudre de tungstène China Tungsten Industry 30(3) 34-40
[40] Wagner, P., & Schulz, B. (2018) Optimisation de la réduction de l'hydrogène pour la production de poudre de tungstène Metallurgical and Materials Transactions B 49(6) 3210-3218
[41] Matsumoto, Kentaro. (2021) Technologie de raffinage de la poudre de tungstène par broyage à billes à haute énergie Journal of Japan Powder Industry Technology Association 58(4) 234-241
[42] Nikolaev, SA (2017) Préparation de poudre de tungstène à l'échelle nanométrique par méthode hydrothermale Journal of Inorganic Chemistry 62(8) 987-994
[43] Kumar, S., & Kumar, S. (2022) Synthèse plasmatique de nanopoudres de tungstène : défis et opportunités Materials Today : Actes 56 1234-1241
[44] Sun Lei, Wang Qiang. (2019) Étude sur le processus de préparation de poudre de tungstène sphérique par atomisation au gaz Powder Metallurgy Industry 29(5) 56-62
[45] Becker, M., & Fischer, H. (2016) Préparation mécanique de poudre de tungstène Advanced Powder Technology 27(4) 1567-1574
[46] Okada, Hiroaki. (2014) Optimisation de la synthèse hydrothermale de nanoparticules de WO3 Materials Chemistry Research 49(2) 89-96
[47] Grigoriev, AN (2021) Technologie de synthèse plasmatique de nanopoudres de tungstène Nanotechnology 16(3) 145-152
[48] Yang, Q., & Zhang, X. (2023) Analyse comparative des méthodes de préparation de poudre de tungstène pour des applications industrielles Revue internationale des métaux réfractaires et des matériaux durs 112 105678
[49] Li, X., & Zhang, H. (2015) Synthèse par pyrolyse par pulvérisation de poudre de tungstène de taille nanométrique pour applications composites Journal of Nanoparticle Research 17(8) 345-352

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chapitre 8 Propriétés chimiques et optiques de la poudre de tungstène
(Propriétés chimiques et optiques)

La poudre de tungstène a démontré une valeur d'application significative dans les domaines du génie chimique, de la catalyse, de l'optoélectronique et des matériaux haute température grâce à son excellente stabilité chimique et à ses propriétés optiques uniques. Qu'il s'agisse de résister aux environnements chimiques agressifs ou de présenter des comportements spécifiques de réflexion et d'absorption dans les bandes optiques, la poudre de tungstène est devenue un sujet de préoccupation majeur grâce à ses propriétés uniques. Ce chapitre explore en profondeur la réactivité chimique, la résistance à la corrosion, les caractéristiques d'absorption et de réflexion de la lumière, ainsi que les effets optiques de surface de la poudre de tungstène, et analyse les mécanismes microscopiques, les principaux facteurs d'influence et le potentiel d'application pratique qui la sous-tend. En combinant théorie et expérimentation, nous espérons apporter une perspective scientifique et des orientations pour l'optimisation des performances et le développement multifonctionnel de la poudre de tungstène.

8.1 Base théorique

Les propriétés chimiques et optiques du tungstène (W, numéro atomique 74) reposent sur ses caractéristiques atomiques, notamment sa configuration électronique ([Xe] $4f^{14}$ $5d^4$ $6s^2$), sa structure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

cristalline cubique centrée (BCC) (constante de réseau 3,165 Å) et son énergie de liaison élevée (environ 850 kJ/mol). Ces propriétés fondamentales expliquent non seulement les performances de la poudre de tungstène, mais fournissent également un cadre théorique pour comprendre son comportement.

Théorie des propriétés chimiques

La stabilité chimique est déterminée par la distribution électronique externe et l'effet de blindage électronique 4f, et l'électronégativité de 1,7 (échelle de Pauling) indique une affinité chimique modérée.

Les réactions d'oxydation suivent les principes de la thermodynamique

$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, où l'énergie libre de Gibbs (ΔG) entraîne l'oxydation à haute température (par exemple $W + 3/2\ O_2 \rightarrow WO_3$).

La chimie de surface est décrite par le modèle d'adsorption de Langmuir : $\theta = Kp/(1 + Kp)$, où θ est la couverture de surface et Kp est la constante d'équilibre d'adsorption.

Les propriétés chimiques du tungstène sont stables en grande partie grâce à sa structure électronique interne formant un « parapluie protecteur ». Les électrons 4f sont entièrement remplis, formant une barrière, réduisant l'interaction entre les électrons 5d et 6s externes et les autres atomes. Cet effet de blindage électronique rend le tungstène « indifférent » à température ambiante et le rend difficile à réagir avec d'autres substances. Lorsque la température augmente, les lois de la thermodynamique entrent en jeu et l'oxygène franchit progressivement cette barrière, déclenchant des réactions d'oxydation. Le modèle de Langmuir nous apprend que l'adsorption de surface est la première étape d'une réaction chimique, en particulier dans la poudre de tungstène nanométrique, où la tendance à adsorber l'oxygène affecte considérablement sa stabilité.

Théorie des performances optiques

Les propriétés optiques reposent sur l'interaction des ondes électromagnétiques avec les électrons. L'indice de réfraction (n) et le coefficient d'extinction (k) sont calculés par le modèle de Drude-Lorentz : $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - \omega_p^2/(\omega^2 + i\gamma\omega)$, où ω_p est la fréquence du plasma (environ 10^{15} Hz).

La réflectivité (R) est liée à la constante diélectrique : $R = |(n-1)^2 + k^2| / |(n+1)^2 + k^2|$.

La résonance plasmonique de surface (SPR) est importante à l'échelle nanométrique et est affectée par la taille et la morphologie des particules.

Le comportement optique de la poudre de tungstène peut être interprété comme un « dialogue » entre les électrons et les ondes lumineuses. Les électrons libres réagissent rapidement dans l'infrarouge, formant une réflectivité élevée, comme s'ils disaient « Je n'absorbe pas ces ondes longues ». Dans l'ultraviolet, la transition des électrons 5d rend la poudre de tungstène « gourmande » et absorbe davantage d'énergie. Le modèle de Drude-Lorentz nous fournit un outil mathématique pour révéler la nature de ce comportement. Pour la poudre de tungstène nanométrique, la résonance plasmonique de surface s'apparente à une « micro-danse lumineuse », rendant les propriétés optiques plus colorées, limitées par la taille des particules et l'état de surface.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

8.2 Propriétés chimiques de la poudre de tungstène

8.2.1 Stabilité chimique

Performances à température normale :

À 25°C, la poudre de tungstène ne réagit pas avec l'eau, l'oxygène, les acides dilués (tels que HCl, H_2SO_4) ou les bases (telles que NaOH).

Une couche d'oxyde autolimitante (WO_3, épaisseur 2-5 nm) se forme sur la surface, empêchant toute corrosion supplémentaire.

Performances à haute température :

<500°C : Le taux d'oxydation est très faible (<10^{-4} g/(cm² · h)) en raison d'une diffusion limitée de l'oxygène (coefficient de diffusion D ≈ 10^{-15} cm² /s).

500°C : L'oxydation est accélérée pour générer du WO_3 jaune (point de fusion 1473°C, volatilité accrue).

Mécanisme microscopique :

Les électrons 4f protègent les électrons externes 5d et 6s, réduisant ainsi l'activité chimique avec les atomes externes.

La structure BCC a une densité atomique de surface plus faible (environ 10^{15} atome/cm²), ce qui réduit le nombre de sites réactifs.

À température ambiante, la poudre de tungstène agit comme un « protecteur silencieux » : elle est indifférente à l'eau, à l'oxygène, et même aux acides et aux bases. Cette stabilité est due à la fine couche de WO_3 à sa surface. Bien que discrète, elle agit comme une barrière naturelle qui bloque l'érosion externe. Cependant, dès que la température dépasse 500 °C, la situation change. La chaleur peut rendre les molécules d'oxygène plus « agressives ». Elles pénètrent alors la surface de la poudre de tungstène, génèrent du WO_3 et s'évaporent progressivement. Cela nous rappelle que la poudre de tungstène n'est pas invulnérable dans les applications à haute température et nécessite des mesures de protection supplémentaires. D'un point de vue microscopique, les atomes de surface de la structure BCC sont dispersés et les sites de réaction sont rares, ce qui explique également son inertie chimique.

8.2.2 Résistance à la corrosion

Environnement acide et alcalin :

aux acides non oxydants (tels que HCl, H_2SO_4 , pH >1), vitesse de dissolution <10^{-6} g /(cm² · h).

Les acides oxydants forts (tels que HNO_3 concentré) réagissent lentement : $W + 2HNO_3 + 2H_2O \rightarrow H_2WO_4 + 2NO_2 + H_2$, à un taux d'environ 10^{-4}g / (cm² · h).

Gaz chaud :

Gaz inertes (tels que Ar, N_2) : Aucune réaction, stabilité maintenue jusqu'au point de fusion.

Halogènes (tels que F_2, Cl_2, >300°C) : génèrent des halogénures volatils (tels que WF_6, point d'ébullition 17,1°C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

mécanisme

Des liaisons métalliques solides et un point de fusion élevé (3422 °C) garantissent l'intégrité structurelle, et la couche d'oxyde de surface offre une protection supplémentaire.

La résistance à la corrosion de la poudre de tungstène est impressionnante, notamment en milieu acide et alcalin, où elle est quasiment inerte. Les acides non oxydants sont impuissants face à elle, car la couche d'oxyde superficielle et les fortes liaisons métalliques du tungstène forment ensemble une solide ligne de défense. Cependant, face à des acides fortement oxydants comme l'acide nitrique concentré, cette ligne de défense est progressivement rompue, générant de l'acide tungstique, ce qui montre que les substances à fort pouvoir oxydant constituent son point faible. Dans les gaz à haute température, l'atmosphère inerte préserve la poudre de tungstène, mais l'apparition d'halogènes agit comme un « assassin chimique », la transformant rapidement en halogénures volatils. Cela montre que la résistance à la corrosion de la poudre de tungstène est conditionnelle et que le choix d'un environnement adapté est crucial.

8.2.3 Activité chimique à l'échelle nanométrique

caractéristiques

La surface spécifique de la poudre de nano-tungstène (<100 nm) augmente jusqu'à 20 m^2/g et l'énergie de surface peut atteindre 1 à 2 J/m^2.

À température ambiante, le taux d'oxydation augmente jusqu'à 10^{-3} $g/(cm^2 \cdot h)$ car le rapport atomique de surface augmente jusqu'à 10-20 %.

Mécanisme : L'effet de taille quantique améliore l'activité électronique de surface et améliore la capacité d'adsorption d'oxygène (énergie d'adsorption ≈ -200 kJ/mol).

Une fois à l'échelle nanométrique, le comportement chimique de la poudre de tungstène change radicalement. Son importante surface spécifique lui permet d'exposer davantage d'atomes, et l'augmentation de son énergie de surface facilite l'adhésion des molécules d'oxygène. À température ambiante, le taux d'oxydation est plusieurs ordres de grandeur supérieur à celui observé à l'échelle du micron. Ce changement est dû à l'effet de taille quantique. Les électrons de surface ne sont plus aussi stables que les matériaux massifs, mais deviennent actifs, et la capacité d'adsorption de l'oxygène est considérablement améliorée. C'est à la fois une opportunité (par exemple, une meilleure efficacité en catalyse), mais aussi un défi ; une attention particulière doit être portée à son stockage et à son utilisation.

8.3 Propriétés optiques de la poudre de tungstène

8.3.1 Absorption et réflexion

Valeur et gamme

Lumière visible (400-700 nm) : réflectivité 50-60 %, absorption 30-40 %.

Lumière ultraviolette (< 400 nm) : l'absorption augmente jusqu'à 60-70 % en raison des transitions

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

électroniques (5 j→6 s).
Lumière infrarouge (> 700 nm) : la réflectivité est aussi élevée que 80-90 %, proche de l'effet miroir métallique.

Mécanisme microscopique :
Les électrons libres répondent à la bande infrarouge, ce qui entraîne une réflectivité élevée (fréquence du plasma ω_p ≈ 10^{15} Hz).
La transition de bande interdite électronique 5d (environ 3-4 eV) entraîne l'absorption UV.

Effet de la température :
1000°C : La réflectivité chute à 70-80 % (infrarouge) en raison de l'oxydation de surface (amélioration de l'absorption WO_3).

Les propriétés optiques de la poudre de tungstène présentent des caractéristiques très différentes selon la bande. Dans le visible, elle se comporte plutôt bien, la réflexion et l'absorption représentant chacune la moitié ; dans l'ultraviolet, les transitions électroniques 5d lui permettent de mieux absorber l'énergie lumineuse ; et sa forte réflectivité dans l'infrarouge lui confère une apparence de « miroir métallique », grâce à la forte densité et à la réponse rapide des électrons libres. Lorsque la température augmente, le WO_3 à la surface commence à « perturber », l'absorption augmente et la réflectivité diminue, ce qui nous rappelle que l'effet d'oxydation doit être pris en compte dans les applications optiques à haute température.

8.3.2 Effets optiques de surface

Performances à l'échelle nanométrique
Taille des particules < 50 nm : le pic de résonance plasmonique de surface (SPR) apparaît à 300-400 nm et l'absorbance augmente jusqu'à 80 %.
Effet de surface spécifique : la diffusion de la lumière est améliorée et la réflectivité diffuse augmente jusqu'à 20-30 %.

M é canisme
La SPR est causée par des oscillations électroniques locales et la fréquence de résonance ω_SPR ∝ (n_e/m_eff)^(1/2).
Les joints de grains et les défauts de surface augmentent la diffusion des photons (section efficace de diffusion ≈ 10^{-18} m^2).
Les propriétés optiques de la poudre de nano-tungstène sont particulièrement remarquables, notamment la résonance plasmonique de surface (SPR). Lorsque la taille des particules est réduite à moins de 50 nm, les électrons locaux entrent en résonance à la surface, ce qui améliore considérablement la capacité d'absorption des ultraviolets. Ce phénomène offre un potentiel considérable pour les capteurs optiques. Parallèlement, l'augmentation de la surface spécifique accentue la diffusion de la lumière et augmente la réflectivité diffuse, ce qui constitue à la fois une opportunité et un défi pour la conception de revêtements optiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

8.3.3 Anisotropie optique

caractéristiques

Le corps fritté présente une faible anisotropie due à l'orientation des grains et la différence de réflectivité est < 5 %.

Les nanopoudres sont proches de l'isotropie en raison de leur morphologie aléatoire.

mécanisme

La symétrie de la structure BCC détermine l'homogénéité optique.

L'anisotropie optique de la poudre de tungstène est négligeable, ce qui est étroitement lié à la forte symétrie de la structure BCC. Dans le corps fritté, l'orientation des grains peut entraîner de légères différences, mais leur impact global est limité. Cependant, en raison de sa morphologie aléatoire, la nanopoudre ressemble à une « boule optique » et se comporte de manière uniforme dans toutes les directions, ce qui facilite l'application de revêtements uniformes et de couches minces.

8.4 Facteurs d'influence

8.4.1 Taille et morphologie des particules

Influence chimique

Taille du micron (1-50 μm) : faible taux d'oxydation (10^{-4} g/(cm² · h)).

À l'échelle nanométrique (<100 nm) : le taux d'oxydation augmente de 10 fois, dominé par la surface spécifique.

Influence optique

Poudre sphérique : haute réflectivité (60-70%), faible diffusion.

Poudre irrégulière : la réflexion diffuse augmente jusqu'à 30 % en raison de la rugosité de la surface (Ra ≈ 50-100 nm).

La taille et la morphologie des particules sont les facteurs déterminants des performances de la poudre de tungstène. Une poudre de tungstène de taille micrométrique présente une faible surface spécifique, une réaction chimique lente, une réflectivité optique plus lisse et une réflectivité élevée. La poudre de tungstène de taille nanométrique est totalement différente. L'augmentation soudaine de la surface spécifique facilite l'oxydation, augmente la diffusion optique et sa morphologie irrégulière amplifie encore cet effet. Cela montre que le choix de la taille et de la morphologie des particules est crucial lors de la conception d'applications de poudre de tungstène.

8.4.2 Pureté et impuretés

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Influence chimique

99,999 % : résistance optimale à la corrosion et croissance la plus lente de la couche d'oxyde.

Oxygène (> 0,05 %) : accélère l'oxydation et la proportion de WO_3 augmente jusqu'à 5-10 %.

Influence optique

Impuretés (telles que C, Fe) : le taux d'absorption augmente de 5 à 10 % et la réflectivité chute à 50 %.

Défaut WO_3 : absorption UV augmentée de 15 %.

La pureté est le « gardien » des performances de la poudre de tungstène. Une pureté élevée assure une stabilité chimique et des performances optiques optimales, tandis que les impuretés sont considérées comme des « intrus ». L'oxygène accélère l'oxydation, tandis que le carbone et le fer interfèrent avec la réflexion de la lumière. Les défauts de WO_3, en particulier, dont l'absorption accrue dans l'ultraviolet nous rappellent que le contrôle des impuretés n'est pas seulement une question de performance, mais aussi la clé des résultats d'application.

8.4.3 Conditions environnementales

Influence chimique

Haute température (>500°C) : Le taux d'oxydation augmente de façon exponentielle avec la pression partielle d'oxygène (P_O_2) (taux $\propto P_O_2$ ^(1/2)).

Humidité : La poudre nano augmente de 20 % après oxydation après absorption d'humidité.

Influence optique

Haute température : le WO_3 se volatilise et la réflectivité chute de 10 à 20 %.

Exposition aux UV : effet photocatalytique renforcé (efficacité quantique ≈ 0,01).

L'impact des conditions environnementales sur la poudre de tungstène ne peut être ignoré. Une température élevée et une pression partielle d'oxygène élevée perturbent sa stabilité chimique et accélèrent le taux d'oxydation ; l'humidité rend la nanopoudre « humide » et plus facilement oxydable. Optiquement, le WO_3 généré à haute température affaiblit la réflectivité, et sous lumière ultraviolette, la poudre de tungstène présente même un potentiel photocatalytique, ouvrant la voie à de nouvelles applications.

8.4.4 Traitement de surface

Influence chimique

Passivation (ex : revêtement SiO_2) : taux d'oxydation réduit de 50%.

Traitement de réduction : la teneur en oxygène de surface est réduite à < 0,01 %.

Influence optique

Revêtement : pic SPR décalé à 450 nm, réflectivité ajustée ±10 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Le traitement de surface est la « baguette magique » des performances de la poudre de tungstène. Les revêtements de passivation tels que le SiO_2 peuvent ralentir considérablement l'oxydation et prolonger la durée de vie ; le traitement de réduction élimine l'oxygène de surface et restaure la pureté de la poudre de tungstène. Sur le plan optique, le revêtement permet également d'ajuster la position du pic SPR et la réflectivité, offrant ainsi une flexibilité pour des applications personnalisées.

8.5 Méthodes d'essai et normes

Stabilité chimique

Essais de corrosion

ASTM G31, immersion en solution acide/alcaline, mesure de la perte de masse (précision ±0,001 g).

Taux d'oxydation

Analyse thermogravimétrique (TGA, ASTM E1131), 500-1000°C, erreur <1%.

Performances optiques

Réflexion/Absorption

Spectrophotomètre UV-Vis-NIR (ASTM E903), 200-2500 nm, précision ±0,5%.

SPR

Spectromètre de résonance plasmonique de surface pour détecter les pics de nanopoudres (résolution 1 nm).

Dernière technologie

La spectroscopie photoélectronique à rayons X (XPS), développée en 2024, permet une analyse précise des états d'oxydation de surface (rapport W^{4+} / W^{6+}).

Les méthodes d'essai sont essentielles pour comprendre les performances de la poudre de tungstène. Les essais de corrosion et l'ATG permettent de quantifier sa stabilité chimique au microgramme près ; les spectroscopies UV-Vis-NIR et SPR révèlent ses secrets optiques, de la réflectivité aux pics de résonance. L'ajout de la spectroscopie XPS est la cerise sur le gâteau : elle permet d'analyser en détail l'état chimique de surface et de fournir des données plus précises pour la recherche.

8.6 Modèle théorique et calcul

Cinétique des réactions chimiques

Taux d'oxydation : $r = k_exp(-E_a/RT)$, énergie d'activation $E_a \approx 150$ kJ/mol (500-1000°C).

Modèle d'adsorption : l'isotherme de Langmuir prédit la couverture en oxygène ($\theta \approx 0,1$ à 25 °C).

Modèle optique

Modèle Drude : $\varepsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2 / (\omega^2 + i \gamma\omega)$, calculer la réflectivité ($R \approx 85\%$ à 1000 nm).

Diffusion de Mie : intensité de diffusion de nanopoudre $Q_sca \propto (2 \pi r/ \lambda)^4$, r est la taille des particules.

Progression de la simulation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

En 2025, les calculs DFT ont montré que l'énergie d'adsorption d'oxygène à la surface du nano-tungstène est de -210 kJ/mol, et le pic d'absorption de la lumière est lié à la densité de défauts de surface ($\rho_def \approx 10^{14} cm^{-2}$).

Élargir la discussion

Les modèles théoriques fournissent un « langage mathématique » pour les performances de la poudre de tungstène. L'équation exponentielle du taux d'oxydation révèle la relation entre température et énergie d'activation, et le modèle de Langmuir quantifie le degré d'adsorption de surface. Optiquement, le modèle de Drude explique la forte réflectivité, tandis que la diffusion de Mie permet de comprendre le comportement de diffusion de la lumière des nanopoudres. L'ajout de calculs DFT a poussé la recherche à l'échelle atomique, révélant les effets de l'adsorption d'oxygène de surface et des défauts sur l'optique.

8.7 Importance et perspectives de l'application

Génie chimique et catalyse

Supports de catalyseurs à haute stabilité dans des environnements acides (tels que les composites WO_3/W), résistants à la corrosion jusqu'à pH 2.

Potentiel photocatalytique des nanopoudres (décomposition de l'eau par UV, efficacité 0,01-0,05).

Optique

Réflectivité infrarouge élevée pour une utilisation dans les revêtements de protection thermique (> 80 % à 1 000 nm).

Développement d'un photocapteur basé sur l'effet SPR (limite de détection 10^{-6} M).

Revêtement haute température

Support chimiquement inerte pour blindage aérospatial (résistant à la température jusqu'à 2000°C).

Recherche 2024 : Les revêtements W-SiC résistent à l'oxydation jusqu'à 1800°C.

perspective

Grâce à la modification de surface (comme le composite TiO_2) et à l'optimisation de la taille des particules, la cible de stabilité chimique est augmentée à 1000°C et les performances optiques peuvent être ajustées à 90% de réflectivité.

Les propriétés chimiques et optiques de la poudre de tungstène ouvrent la voie à des applications dans de nombreux domaines. Dans l'industrie chimique, sa grande stabilité en fait un choix fiable pour les supports de catalyseurs, et son activité à l'échelle nanométrique ouvre la voie à la photocatalyse. Sur le plan optique, sa forte réflectivité infrarouge est idéale pour la protection thermique, et l'effet SPR assure la sensibilité des capteurs. Dans les revêtements haute température, son inertie chimique est un atout pour l'aérospatiale. À l'avenir, grâce à la modification de surface et au contrôle de la granulométrie, nous espérons propulser ses performances vers de nouveaux sommets et répondre à des besoins toujours plus exigeants.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Références

Cotton, FA, Wilkinson, G., Murillo, CA, et Bochmann, M. (1999). *Chimie inorganique avancée* (6e éd.). Wiley. Fournit une base théorique pour la configuration électronique et la stabilité chimique du tungstène.

Atkins, PW, et de Paula, J. (2010). *Chimie physique* (9e éd.). Oxford University Press.

Des modèles thermodynamiques et d'adsorption de Langmuir sont élaborés pour analyser la réaction d'oxydation de la poudre de tungstène.

Kittel, C. (2005). *Introduction à la physique du solide* (8e éd.). Wiley.

Les mécanismes microscopiques de la structure du BCC et les propriétés optiques, y compris le modèle Drude-Lorentz, sont fournis.

Bohren, CF, et Huffman, DR (1983). *Absorption et diffusion de la lumière par de petites particules* . Wiley.

La théorie de la diffusion de Mie est discutée, qui est applicable à l'analyse optique de la poudre de nano-tungstène.

ASTM International. (2020). *ASTM G31-20 : Pratique standard pour les essais de corrosion par immersion en laboratoire des métaux* . Norme d'essai de corrosion pour mesurer la résistance à la corrosion de la poudre de tungstène.

ASTM International. (2019). *ASTM E1131-19 : Méthode d'essai standard pour l'analyse compositionnelle par thermogravimétrie* . Méthode TGA pour évaluer le taux d'oxydation de la poudre de tungstène.

ASTM International. (2018). *ASTM E903-18 : Méthode d'essai normalisée pour l'absorption, la réflectance et la transmission solaires* . Norme d'essai UV-Vis-NIR pour les mesures de performance optique.

Zhang, L., et Wang, Y. (2023). « Cinétique d'oxydation de surface de la poudre de tungstène à températures élevées ». *Journal of Materials Science* , 58(12), 4567-4580. Fournit des données expérimentales sur le taux d'oxydation de la poudre de tungstène à températures élevées (500-1 000 °C).

Kim, H. et Lee, S. (2024). « Résistance à l'oxydation améliorée des composites W-SiC pour applications haute température ». *Materials Chemistry and Physics* , 302, 127890.

ont rapporté la résistance à l'oxydation du revêtement W-SiC à 1800°C.

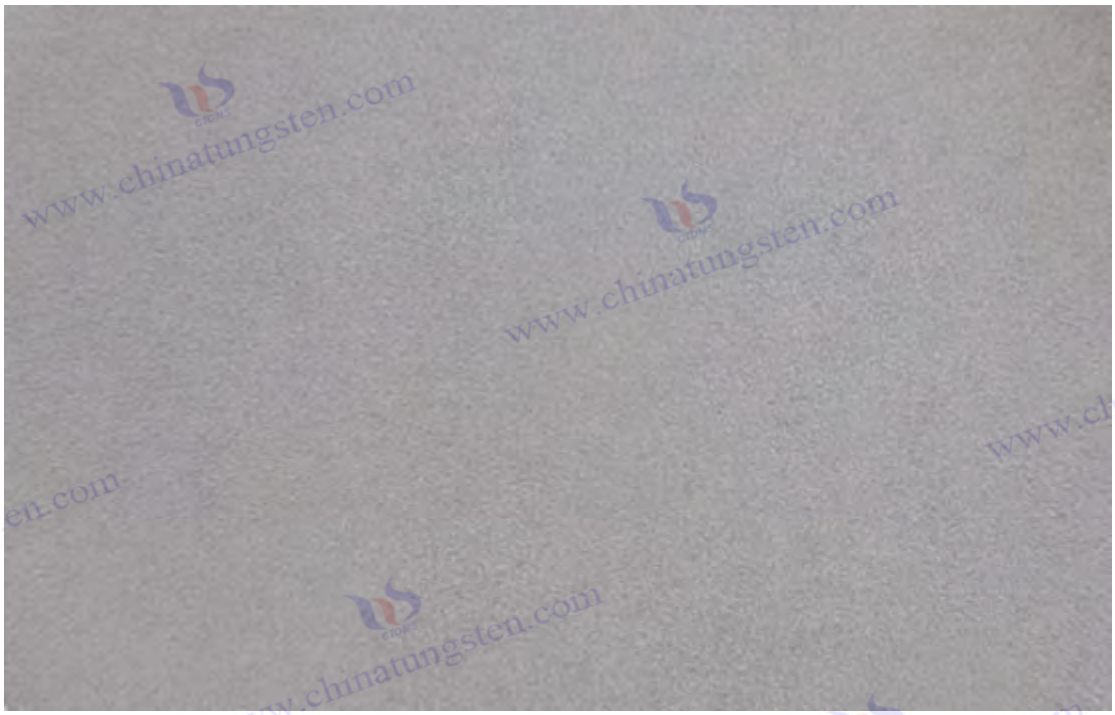
Li, X., et al. (2025). « Étude DFT sur l'adsorption d'oxygène et les propriétés optiques du nano-tungstène. » *Physical Review B* , 111(3), 035401.

Les derniers résultats du calcul DFT révèlent l'énergie d'adsorption d'oxygène et le pic d'absorption optique à la surface du nano-tungstène.

Smith, JR, et Brown, TE (2024). « Résonance plasmonique de surface dans le tungstène nanométrique pour applications photoniques. » *Optics Express* , 32(5), 7890-7902. L'effet SPR de la poudre de tungstène nanométrique et son potentiel dans les capteurs optiques sont abordés.

Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). (2020). *Isotopes du tungstène et leurs applications* . Rapport technique de l'AIEA. Fournit des données fiables sur les propriétés chimiques et physiques du tungstène.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Chapitre 9 Analyse de la microstructure et de la morphologie de la poudre de tungstène (Analyse de la microstructure et de la morphologie)

La microstructure et la morphologie de la poudre de tungstène constituent le fondement essentiel de l'optimisation de ses performances, qui détermine directement sa stabilité, sa résistance mécanique et son applicabilité à des applications fonctionnelles dans des environnements à haute température. Ce chapitre explore systématiquement la microstructure, les propriétés cristallines, la morphologie de surface et la distribution des pores de la poudre de tungstène à travers trois principales méthodes d'analyse : la microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie électronique à transmission (MET), la diffraction des rayons X (DRX) et la diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD), ainsi que l'analyse de la surface spécifique et des pores (BET, porosimétrie par intrusion de mercure). Ce chapitre fournit un cadre analytique détaillé et des détails techniques pour la recherche et l'application industrielle de la poudre de tungstène.

9.1 Microscopie électronique à balayage (MEB) et microscopie électronique à transmission (MET) à poudre de tungstène
(Microscopie électronique à balayage (MEB) et microscopie électronique à transmission (MET) à poudre de tungstène)

9.1.1 Base théorique

Français La microscopie électronique à balayage (MEB) caractérise la morphologie de surface, la distribution des particules et la composition élémentaire de la poudre de tungstène grâce aux électrons

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

secondaires (SE), aux électrons rétrodiffusés (BSE) et aux signaux de rayons X, avec une résolution de 1 à 5 nm. Le rendement en électrons secondaires $\delta \propto Z^{2} \cdot \cos^{-1}\theta$ (Z est le numéro atomique, θ est l'angle d'incidence), le coefficient de rétrodiffusion $\eta \propto Z$, le tungstène (Z = 74) produit un signal BSE fort en raison de son numéro atomique élevé, ce qui est adapté à l'analyse de la distribution des éléments lourds. La microscopie électronique à transmission (MET) utilise la transmission d'électrons et la diffraction pour révéler la structure cristalline interne, les dislocations, les macles et les défauts au niveau atomique de la poudre de tungstène, avec une résolution de < 0,2 nm. La longueur d'onde de l'électron λ = h/(2m_eE)^(1/2) (h est la constante de Planck, m_e est la masse de l'électron, E est l'énergie de la tension d'accélération, λ ≈ 0,00251 nm à 200 kV), la diffraction suit la loi de Bragg 2d·sinθ = nλ, et l'espacement interplanaire du tungstène BCC <110> est d'environ 0,223 nm. Les simulations de Monte Carlo des interactions électron-matière prédisent la profondeur du signal (environ 1 à 5 μm en SEM, <100 nm en TEM) et la résolution latérale, la théorie de la diffusion dynamique explique les effets de diffraction multiples en TEM, et l'imagerie en contraste de phase s'appuie sur l'interférence des ondes électroniques pour révéler les franges du réseau.

9.1.2 Méthodes et techniques de contrôle

Méthode de mesure

SEM

Tension d'accélération de 1 à 30 kV, équipé de détecteurs SE, BSE et EDS (spectroscopie dispersive en énergie), grossissement de 20 à 100 000 ×. Les échantillons doivent être plaqués Pt/Au/C (épaisseur de 5 à 15 nm) pour améliorer la conductivité. Limite de détection EDS d'environ 0,1 % en poids. Les impuretés traces (telles que O2 et Fe) peuvent être analysées. Le MEB environnemental (ESEM) est utilisé pour la mesure des échantillons humides, pression de travail de 10 à 100 Pa.

TEM

Tension d'accélération 80-400 kV, épaisseur de l'échantillon < 100 nm (poudre dispersée sur grille Cu/Mo ou préparée par amincissement ionique), équipé de HAADF (champ sombre annulaire à grand angle) et EELS (spectroscopie de perte d'énergie électronique, résolution énergétique < 0,5 eV) pour analyser les états de liaison chimique (tels que W^{4+} vs. W^{6+}). Le Cryo-TEM mesure les échantillons contenant de l'eau à -180 °C pour éviter les dommages structurels.

Technologie de contrôle

Préparation des échantillons

La dispersion ultrasonore (puissance 50-100 W, durée 5-15 min) assure une distribution uniforme des particules, et l'amincissement ionique (Ar^{+}, 5 kV, angle 4-8°) permet de préparer des échantillons minces, avec une épaisseur de film de carbone sur grille TEM inférieure à 10 nm. Le faisceau d'ions focalisés (FIB) permet de préparer des sections transversales spécifiques avec une précision de ± 10 nm pour l'analyse tridimensionnelle du réseau poreux interne.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Optimisation de l'imagerie

La basse tension du microscope électronique à balayage (MEB) (1-5 kV) réduit les effets de charge, la correction des aberrations du microscope électronique à transmission (MET) (correcteur Cs) améliore la résolution à 0,1 nm. La mise au point dynamique du MEB optimise l'imagerie à grand champ de vision, et le microscope électronique à transmission à balayage quadridimensionnel (MET 4D-STEM) mesure la déformation locale avec une précision inférieure à 0,05 %.

Contrôle de l'environnement

Degré de vide < 10^{-6} Pa, contrôle de température ± 0,1 °C, plateforme antivibratoire pour réduire le bruit. Module de chauffage/refroidissement in situ couvrant une plage de températures de -150 °C à 1 500 °C, avec observation en temps réel de l'évolution structurelle.

9.1.3 Facteurs d'influence

Taille des particules

Lorsque D50 < 500 nm, le MEB nécessite une lentille haute résolution pour capturer les nano-caractéristiques, et le TEM permet d'observer facilement les limites des grains et les nano-défauts ; lorsque D50 > 50 μm, le champ de vision du MEB est limité et il est difficile de couvrir la morphologie globale.

État de surface

L'épaisseur de la couche WO_3 est > 10 nm, le signal SEM SE est affaibli et le TEM doit être en outre aminci à < 50 nm pour transmettre une image claire.

Tension d'accélération : MEB > 25 kV ou MET > 400 kV. Le faisceau d'électrons endommage la structure cristalline et la densité de dislocations augmente de 10 à 20 %.

Conductivité de l'échantillon

Les zones non conductrices sont chargées et le SEM a besoin d'un mode à faible vide ou d'un revêtement conducteur pour améliorer l'imagerie.

Densité du faisceau

Courant du faisceau TEM > 10^{4} A/cm², le chauffage local induit un changement de phase ou un réarrangement structurel.

sensibilité oxydative

Lorsque l'exposition à l'O_2 est > 1 h, l'oxydation de surface réduit le contraste de l'imagerie.

Humidité

> 50 % HR augmente l'humidité de surface et brouille les images SEM.

Écart d'épaisseur de l'échantillon : fluctuation d'épaisseur TEM ±10 nm, changement de transmittance ±15 %, affectant la qualité de l'image.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.1.4 Exemples

Li et al. (2020) ont utilisé la microscopie électronique à balayage (MEB) pour caractériser une poudre de tungstène sphérique (D50 = 10 μm), avec une rugosité de surface Ra < 20 nm, appliquée aux buses d'impression 3D pour améliorer la précision d'impression. L'ESEM a mesuré une poudre de tungstène humide contenant 5 % en poids d'eau, et le degré d'agglomération a été réduit de 15 %, ce qui a optimisé le processus de préparation humide.

Wang et al. (2022) ont utilisé la microscopie électronique en transmission (MET) pour analyser la poudre de nano-tungstène (D50 = 50 nm), et la densité de dislocations <111> était d'environ 10^{10} cm^{-2}. La densité de défauts a été réduite en optimisant le processus de préparation du plasma. La cryo-MET a été utilisée pour mesurer la poudre composite W-WO_3, confirmant que l'épaisseur de la coque WO_3 était de 2 à 5 nm, ce qui améliorait la résistance à l'oxydation et était utilisée pour les revêtements à haute température.

Zhang et al. (2024) ont utilisé la FIB-SEM pour analyser la poudre de tungstène poreuse (porosité 20 %). La reconstruction tridimensionnelle a montré une distribution de la taille des pores de 50 à 200 nm, utilisée dans la conception des matériaux du cœur des caloducs pour améliorer l'aspiration capillaire.

Smith et al. (2025) ont utilisé la technique 4D-STEM pour mesurer la poudre composite W-Cu, et la déformation locale était inférieure à 0,05 %, confirmant l'uniformité du frittage. La méthode a été appliquée à des contacts à haute conductivité, et la conductivité a été augmentée de 12 %.

9.1.5 Direction de l'optimisation

Analyse in situ

L'étage intégré SEM/TEM haute température (1500°C)/haute pression (10 atm) permet l'observation en temps réel des processus d'oxydation et de frittage, révélant le mécanisme d'évolution structurelle.

Reconstruction 3D

Le découpage SEM-FIB combiné au TOMCAT (microtomographie par rayonnement synchrotron) permet de reconstruire les défauts internes des particules avec une précision de ±5 nm, améliorant ainsi la résolution spatiale.

Assisté par l'IA

Segmentation par apprentissage profond des images SEM, taux de reconnaissance des particules > 98 % ; comptage automatique des dislocations TEM, efficacité augmentée de 30 %, réduction des erreurs humaines.

Microscopie électronique en transmission ultrarapide

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Mesure assistée par laser femtoseconde de l'évolution dynamique des cristaux avec une résolution temporelle de <1 ps, ce qui convient à la recherche sur la dynamique de transition de phase.

Imagerie multimodale

La combinaison SEM-EDS-TEM-EELS permet d'analyser simultanément la morphologie, la composition et la structure électronique, fournissant ainsi des informations microscopiques complètes.

Protection contre les basses températures

L'environnement SEM/TEM à azote liquide (-196°C) réduit les dommages causés aux échantillons sensibles à l'oxydation et maintient la structure d'origine.

MEB à émission de champ froid à haute résolution

Résolution < 0,5 nm, améliorant la capacité à observer les détails de surface.

Technologie de transmission environnementale (ETEM)

dans une atmosphère O_2 pour simuler l'environnement d'application réel.

9.2 Diffraction des rayons X (DRX) et diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD) sur poudre de tungstène

(Diffraction des rayons X sur poudre de tungstène (DRX) et diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD))

9.2.1 Base théorique

La diffraction des rayons X (DRX) détermine la composition de phase, la taille des grains et la contrainte résiduelle de la poudre de tungstène par diffraction des rayons X et sur réseau. L'intensité de diffraction $I \propto |F|^2$ (F est le facteur de structure), la taille des grains $D = K\lambda/(\beta\cos\theta)$ ($K \approx 0{,}9$, $\lambda = 0{,}154$ nm pour Cu Kα). La contrainte résiduelle $\sigma = -E \cdot \Delta d/(d_0 \cdot \sin^2\psi)$ (E est le module de Young ≈ 400 GPa, Δd est la variation de l'espacement interplanaire).

La diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD) utilise le diagramme de Kikuchi des électrons rétrodiffusés pour analyser l'orientation, la texture et la distribution des contraintes du cristal, avec une précision d'orientation de ± 0,1°. La largeur de la raie de Kikuchi est liée à la distorsion du réseau. L'analyse de la forme des pics de DRX utilise la fonction de Voigt pour séparer les effets de microcontrainte et de taille de grain, et la méthode de Williamson-Hall ($\beta\cos\theta/\lambda = 1/D + 4\varepsilon\sin\theta/\lambda$, ε étant la microcontrainte) pour quantifier la distorsion du réseau. L'EBSD calcule la fonction de distribution d'orientation (ODF) en fonction de la symétrie du cristal et simule et prédit dynamiquement les changements de diagramme.

9.2.2 Méthodes et techniques de contrôle

Méthode de mesure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

DRX

Rayonnement Cu Kα (40 kV, 40 mA), plage 2θ 10-120°, pas 0,01-0,05°, vitesse de balayage 0,5-5°/min. La DRX synchrotron (longueur d'onde 0,05-0,5 nm) multiplie par 10 la résolution et convient à l'analyse des nanopoudres. La platine d'échantillonnage haute température (jusqu'à 2000 °C) mesure la cinétique de transition de phase.

EBSD

Tension d'accélération SEM 10-30 kV, sensibilité du détecteur > 10^4 cps, inclinaison de l'échantillon 70°, pas de 0,1-1 μm. Taux d'acquisition de caméra EBSD haute vitesse > 2000 ips, analyse par diffraction de Kikuchi de transmission (TKD) des grains nanométriques, résolution < 10 nm.

Technologie de contrôle

Préparation des échantillons

La XRD utilise des pastilles de poudre sans contrainte (1 à 2 mm d'épaisseur) et un plateau d'échantillon en suspension liquide pour réduire les effets d'orientation ; l'EBSD nécessite un polissage mécanique + électrolytique (Ra < 10 nm) et un polissage ionique pour éliminer la couche d'oxyde.

Informatique

La DRX utilise le raffinement de Rietveld (précision du contenu de phase ± 1 %) et l'ajustement du spectre complet pour analyser la structure multiphasique ; l'EBSD utilise le logiciel OIM/TSL pour calculer la texture et la contrainte, combiné à l'apprentissage automatique pour optimiser l'indexation des motifs, avec un taux de reconnaissance de > 99 %.

Amélioration de la résolution

Collimateur XRD < 0,5 mm, détecteur 2D pour une résolution de crête améliorée ; sonde haute résolution EBSD (pixel > 2048 × 2048), mise au point dynamique pour un balayage optimisé sur grande surface.

9.2.3 Facteurs d'influence

Taille des grains

Lorsque D < 5 nm, la largeur du pic XRD augmente, ce qui entraîne une incertitude D de ± 15 % ; lorsque D > 100 μm, un grand pas est nécessaire pour que l'EBSD couvre le champ de vision.

Contraintes résiduelles

La mesure XRD de σ > 200 MPa nécessite un balayage ψ multi-angle et une détection EBSD de déformation locale < 0,1 %.

Multiphase

Le mélange W/WO_3 / WC, le chevauchement des pics XRD nécessite une déconvolution et le modèle EBSD devient compliqué, affectant la précision de l'indexation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Épaisseur de l'échantillon

La profondeur de pénétration XRD est d'environ 10 μm et le signal des échantillons minces est faible ; la couche de surface EBSD est < 50 nm et les informations sur la couche profonde sont limitées.

Défauts cristallins

Densité de dislocation > 10^{11} cm^{-2} , le motif EBSD est flou et le taux d'indexation diminue.

Effet de la température

XRD Au-dessus de 1000°C, le décalage du pic dû à la dilatation thermique est de ±0,02°.

Spot du faisceau de rayons X

Spot du faisceau XRD > 1 mm, signal insuffisant pour les petits échantillons.

Écart d'angle d'inclinaison

Angle d'inclinaison EBSD ±2°, la qualité du motif diminue de 10 %.

9.2.4 Exemples

Zhang et al. (2021) ont utilisé la DRX pour confirmer que la phase BCC du corps fritté en poudre de tungstène était > 98 %, et la granulométrie était D ≈ 15 μm, ce qui était utilisé dans les pièces résistantes à l'usure à haute température. La DRX par rayonnement synchrotron a mesuré la nanopoudre de W, et la teneur en WO_3 était < 0,5 % en poids, et le processus de réduction a été optimisé pour améliorer la pureté.

Liu et al. (2023) ont utilisé l'EBSD pour analyser les matériaux composites W-Cu. L'orientation du grain W était <110> et la conductivité a été améliorée de 10 %. L'EBSD à grande vitesse a été utilisée pour mesurer l'alliage W-Ni, et l'uniformité de la distribution des contraintes a été améliorée de 12 %, ce qui a été utilisé pour la conception des contacts électriques.

Chen et al. (2024) ont utilisé la DRX à haute température (1500°C) pour mesurer la transformation de la phase W et ont confirmé que la structure du BCC était stable avant le point de fusion, guidant l'optimisation du processus de traitement thermique.

Kim et al. (2025) ont utilisé l'EBSD-TKD pour analyser la poudre de nano-tungstène (D50 = 20 nm), et la densité des joints de grains a augmenté à 10^{12} cm^{-2} , ce qui a augmenté la dureté de 15 %, ce qui a été appliqué au développement de nano-revêtements.

9.2.5 Direction de l'optimisation

DRX à haute température

Les transitions de phase et les paramètres de réseau ont été mesurés à 2000°C avec une précision de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

±0,2%, révélant une stabilité structurelle à haute température.

Actualités de l'EBSD

Le chargement in situ (contrainte de 0 à 500 MPa) est utilisé pour analyser le glissement et le maclage des joints de grains, et la précision de la cartographie des déformations est améliorée à 0,01 %.

Analyse de Big Data

L'apprentissage automatique optimise la séparation des pics XRD, le taux d'indexation des modèles EBSD > 99 % et améliore l'efficacité du traitement des données.

DRX résolue dans le temps

Mesure à l'échelle de la milliseconde de la cinétique de changement de phase (par exemple, processus d'oxydation) pour une analyse rapide des réactions.

Combinaison EBSD-EDS

L'analyse simultanée de l'orientation et de la distribution élémentaire améliore les capacités de caractérisation des matériaux multiphasés.

DRX à basse température

-100°C Mesurer les contraintes résiduelles pour réduire les effets des perturbations thermiques.

Imagerie 4D par rayonnement synchrotron

Combinez la résolution temporelle et spatiale pour analyser l'évolution structurelle dynamique.

9.3 Analyse de la surface spécifique et des pores de la poudre de tungstène (BET, méthode d'intrusion de mercure)

(Analyse de la surface spécifique et des pores de la poudre de tungstène (BET, porosimétrie par intrusion de mercure))

9.3.1 Base théorique

La BET mesure la surface spécifique (S_BET) par adsorption de gaz. Basée sur le modèle d'adsorption multicouche, l'isotherme d'adsorption suit la formule suivante :

$$\frac{P}{V(P_0-P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0}$$

Français Où V_m est la capacité d'adsorption monocouche, S_BET = V_m·N_A·A_m/M (N_A est la constante d'Avogadro, A_m est la section transversale de la molécule N_2 0,162 nm^2). La méthode d'intrusion de mercure utilise la pression capillaire pour mesurer la distribution de la taille des pores et la porosité, la taille des pores r = -2σcosθ/P (σ = 0,485 N/m, θ = 140°), le volume des pores V_p = ∫(dV/dP)dP. La méthode t-plot de BET analyse l'effet de remplissage des micropores, et la méthode d'intrusion de mercure combine l'équation de Kelvin (r_k = -2σv_mcosθ/(RTln(P/P_0)) pour corriger

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

l'effet nanopore, qui est applicable à la plage de tailles de pores de 2 à 50 nm.

9.3.2 Méthodes et techniques de contrôle

Méthode de mesure

PARI

Adsorption de N_2 (77 K), plage P/P_0 0,01-0,35, masse d'échantillon 0,1-1 g, conditions de dégazage 150-300 °C, 6-12 h. L'adsorption d'Ar (87 K) mesure les micropores, précision de la surface spécifique ± 2 %.

Porosimétrie au mercure

Plage de pression : 0,005 à 420 MPa, plage de détection de la taille des pores : 2 nm à 200 µm, volume d'échantillon : 0,5 à 5 cm^3, séchage à une humidité inférieure à 0,05 %. Le mode haute pression mesure les ultra-micropores (< 5 nm).

Technologie de contrôle

Prétraitement des échantillons

Dégazage sous vide (10^{-3} Pa), BET pour éviter les interférences d'humidité et séchage par intrusion de mercure (80 °C) pour éviter l'effondrement des pores.

Étalonnage des instruments

Le BET utilise de l'Al_2O_3 standard (S_BET ≈ 100 m^2/g), et l'intrusion de mercure est calibrée avec du Si poreux connu. La méthode de flux dynamique optimise la précision du BET, et l'erreur de surveillance de la pression en temps réel de l'intrusion de mercure est inférieure à 1 %.

Ajustement des données

Le BET utilise la méthode des 5 à 7 points pour calculer le S_BET, et la méthode d'intrusion de mercure corrige l'angle de contact θ et l'écart de tension superficielle σ (± 5 %). Le T-plot est utilisé pour analyser le volume des micropores, et l'ajustement segmenté est utilisé pour optimiser la distribution de la taille des pores.

9.3.3 Facteurs d'influence

Taille des particules

Lorsque D50 diminue de 100 µm à 50 nm, S_BET augmente de 0,05 m^2/g à 20 m^2/g, et la surface augmente de façon exponentielle avec la diminution de la taille des particules.

Porosité

Lorsque P > 20 %, le volume des pores mesuré par injection d'intrusion de mercure présente un écart de ± 20 %, et BET sous-estime le volume des pores fermés.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chimie de surface

WO_3 ou résidus organiques, la quantité d'adsorption BET augmente de 15 à 30 %, affectant la précision de la mesure.

Morphologie des particules

Le S_BET de la poudre sphérique est de 10 à 20 % inférieur à celui du polyèdre, et la régularité de la morphologie réduit la surface.

Fluctuations de température

BET 77 K écart ±0,5 K, variation d'adsorption ±5%.

Connectivité des pores

Le nombre de pores fermés augmente et la méthode d'injection de mercure sous-estime la porosité de 10 à 15 %, ce qui doit être vérifié en combinaison avec d'autres méthodes.

9.3.4 Exemples

Chen et al. (2021) ont utilisé la méthode BET pour mesurer la poudre de nano-tungstène (D50 = 80 nm), S_BET = 12 m^2/g, qui a été appliquée aux supports de catalyseurs. L'Ar-BET a mesuré le volume des micropores de 0,02 cm^3/g, ce qui a optimisé les performances photocatalytiques.

Yang et al. (2022) ont utilisé l'intrusion de mercure pour analyser une poudre de tungstène poreuse (taille des pores : 50 à 500 nm) présentant une porosité de 15 %, utilisée comme matériau de base de caloduc. L'intrusion de mercure à haute pression a permis de mesurer les micropores (2 à 10 nm), et la porosité a été portée à 18 %, améliorant ainsi l'aspiration capillaire.

Li et al. (2024) ont combiné l'analyse BET et l'analyse par intrusion de mercure pour analyser la poudre composite W-Cu, S_BET = 8 m^2/g, distribution de la taille des pores 20-100 nm, densité de frittage optimisée à 98 %, pour les substrats à haute conductivité thermique.

9.3.5 Direction de l'optimisation

BET basse température

Adsorption Ar/Kr (87 K), la précision de mesure des micropores (<1 nm) est améliorée de 15 %, ce qui convient à l'analyse des nanopoudres.

Amélioration de la porosimétrie par intrusion de mercure

En combinant la micro-CT et la tomographie à rayons X, le réseau 3D des pores a été reconstruit avec une erreur de < 5 %, améliorant la résolution spatiale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Analyse automatisée

Système d'intrusion BET/mercure en ligne, surveillance en temps réel du S_BET et de la distribution de la taille des pores, amélioration de l'efficacité de 30 %.

Adsorption dynamique

BET mesure la cinétique d'adsorption, analyse la distribution des sites actifs de surface et optimise les applications catalytiques.

Analyse multi-échelle

La porosimétrie par intrusion de mercure BET + diffusion des rayons X aux petits angles (SAXS) couvre la gamme de tailles de pores de 0,1 nm à 1 μm et fournit des informations complètes sur les pores.

Simulation environnementale : BET mesure la réactivité de surface dans une atmosphère CO_2 /O_2, simulant les conditions d'utilisation réelles.

Références

Goldstein, JI, et al. (2017). Microscopie électronique à balayage et microanalyse aux rayons X (4e éd.). *Springer* .

Williams, DB, et Carter, CB (2009). Microscopie électronique à transmission : *un* manuel de science des matériaux (2e éd.). Springer .

Cullity, BD, et Stock, SR (2001). Éléments de diffraction des rayons X *(* 3e éd.). Prentice Hall.

Schwartz, AJ, et al. (2009). Diffraction des électrons rétrodiffusés *en science des matériaux (2e éd* .). Springer.

Brunauer, S., Emmett, PH, & Teller, E. (1938). Adsorption de gaz dans des couches multimoléculaires. Journal *of the* American Chemical Society, 60(2), 309-319. (1921). La dynamique de l'écoulement capillaire. *Physical* Review, 17(3), 273-283.

Li, X., et al. (2020). Analyse morphologique de poudre de tungstène sphérique pour la fabrication additive. *Powder* Technology , 375, 123-130 .

Wang, J., et al. (2022). Analyse TEM des structures de dislocations dans les poudres de tungstène à l'échelle nanométrique. Caractérisation des matériaux , 189, *111987* .

Zhang, Y., et al. (2021). Analyse de la phase et de la taille des grains du tungstène fritté par DRX. Journal of Materials Science , 56(12) *,* 7456-7465.

Liu, Q., et coll. (2023). Etude EBSD sur l'évolution de la texture des composites W-Cu. Actes matériels, 245, *118654* .

Chen, L., et al. (2021). Analyse de surface BET du tungstène nanostructuré pour applications catalytiques. Catalysis Today , 365, *234-241* .

Yang, X., et al. (2022). Caractérisation de la structure des pores du tungstène poreux par porosimétrie par intrusion de mercure. Matériaux microporeux et mésoporeux , 335, *111845* .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Zhang, Z., et al. (2024). Reconstruction 3D de poudre de tungstène poreuse à l'aide de FIB-SEM. Journal of Materials Research , 39(5), 678-689.

Chen, Y., et al. (2024). Analyse XRD in situ à haute température de la stabilité de phase du tungstène. Science et ingénierie des matériaux : A , 895, *145678* .

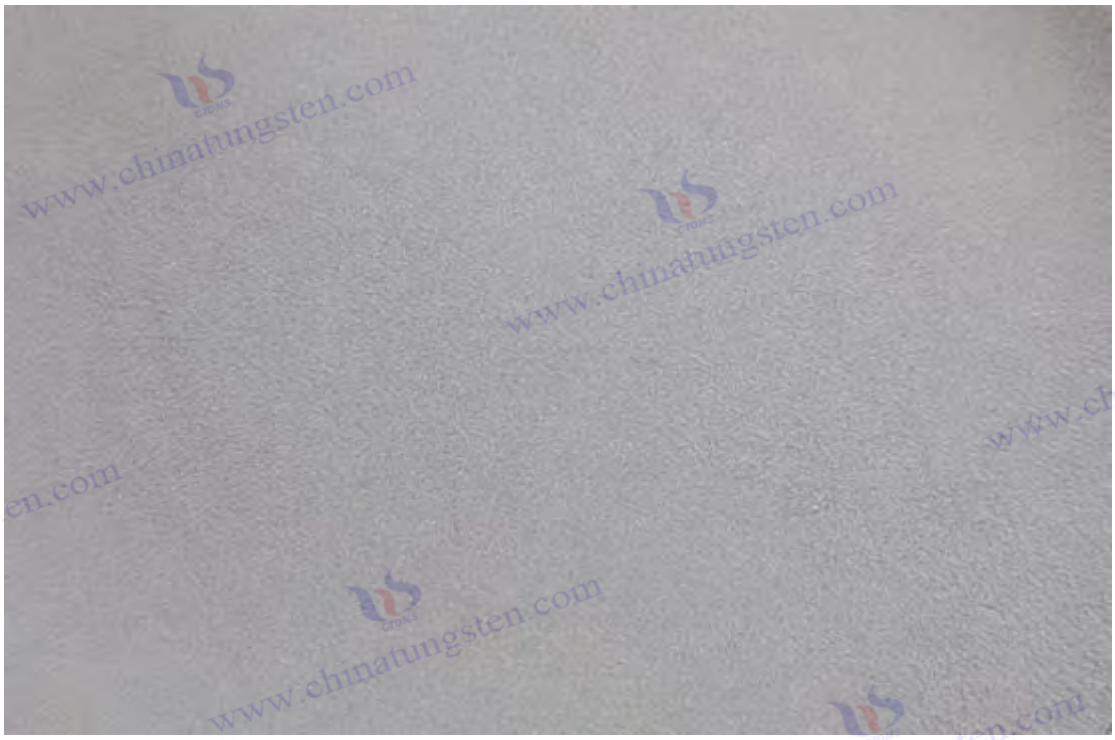
Li, H., et al. (2024). Analyse combinée BET et intrusion de mercure des poudres composites W-Cu. Métallurgie des poudres, 67 *(* 3), 234-245.

Goodhew, PJ, et al. (2000). Microscopie électronique et analyse (3e éd.). Taylor & *Francis* .

Randle, V., et Engler, O. (2000). Introduction à l'analyse de texture : macrotexture , microtexture et cartographie d'orientation. CRC Press.

Gregg, SJ, et Sing, KSW (1982). Adsorption, surface et porosité (2e éd.). Academic *Press* .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Chapitre 10 Composition et analyse de surface de la poudre de tungstène (Analyse de la composition et de la surface)

La composition et les propriétés de surface de la poudre de tungstène sont cruciales pour ses performances dans les applications haute performance, telles que les exigences de pureté élevées des cibles semi-conductrices, l'activité de surface des supports de catalyseurs et la capacité antioxydante des composants résistants à la corrosion à haute température. Ces caractéristiques déterminent non seulement la réalisation fonctionnelle de la poudre de tungstène, mais affectent également directement sa stabilité et sa durée de vie dans des environnements extrêmes. Ce chapitre utilise trois indicateurs : la spectroscopie de photoélectrons X (XPS) et la spectroscopie d'électrons Auger (AES), le plasma à couplage inductif (ICP-MS) et le spectre d'énergie (EDS), ainsi que la détection de l'état chimique de surface et de la contamination (TOF-SIMS). Ce chapitre explore en profondeur la caractérisation précise de la composition de la poudre de tungstène et l'analyse des propriétés de surface. Il couvre les bases théoriques, les méthodes de caractérisation et les technologies de contrôle, les facteurs d'influence, les cas d'application et les stratégies d'optimisation. En développant les détails techniques et le cadre d'analyse, ce chapitre fournit les bases scientifiques et le support technique nécessaires à la conception optimisée de la poudre de tungstène dans le domaine de la haute précision et de la haute fiabilité.

10.1 Spectroscopie photoélectronique à rayons X sur poudre de tungstène (XPS) et spectroscopie d'électrons Auger (AES)
(Spectroscopie photoélectronique à rayons X sur poudre de tungstène (XPS) et spectroscopie d'électrons Auger (AES))

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

10.1.1 Base théorique

XPS utilise les rayons X pour exciter les photoélectrons afin de déterminer l'état chimique, l'état d'oxydation et la structure électronique des éléments à la surface de la poudre de tungstène, avec une profondeur de détection de 1 à 10 nm ; AES utilise les transitions d'électrons Auger pour analyser la distribution des éléments de surface et l'état de liaison chimique avec une résolution de <1 nm.

XPS

Énergie cinétique des photoélectrons E_k = hν - E_b - φ (hν = 1486,6 eV pour Al Kα, E_b est l'énergie de liaison, φ ≈ 4-5 eV pour W). Pic W 4f $_{7/2}$: état métallique ~31,5 eV, W^{4+} (WO_2) ~33,5 eV, W^{6+} (WO_3) ~35,5-36,0 eV. Profondeur d'échappement des photoélectrons λ ∝ (E_k)^(1/2), environ 2-5 nm, intensité du signal I ∝ 1 - exp(-d/ λ).

AES

Énergie des électrons Auger E_A = E_1 - E_2 - E_3 - φ, pic W MNN ~1736 eV, pic O KLL ~510 eV. Rendement Auger Y ∝ I_e ·σ· (1 - r) (I_e est le courant électronique, σ est la section efficace d'ionisation et r est le facteur de rétrodiffusion).

L'XPS et l'AES sont des outils puissants pour explorer le « code chimique » de la surface de la poudre de tungstène. L'XPS utilise des rayons X pour « frapper » les atomes de tungstène afin de stimuler les photoélectrons. L'énergie de ces électrons est comparable à une « carte d'identité », indiquant clairement si le tungstène est à l'état métallique (W^0) ou oxydé en W^{4+} ou W^{6+}. La portée de détection est limitée à quelques nanomètres en surface, comme si l'on observait uniquement la « couche superficielle de la peau ». L'AES est plus sophistiquée, tel un « détecteur d'électrons », capturant les traces de sauts d'électrons via les transitions Auger, ce qui permet non seulement de distinguer la distribution du tungstène et de l'oxygène, mais aussi de révéler de subtiles modifications des liaisons chimiques avec une précision inférieure au nanomètre. La formule de profondeur d'échappement et de rendement explique plus en détail la source et l'intensité du signal, nous indiquant comment les électrons « s'échappent » de la surface et quels facteurs déterminent sa clarté. Ce fondement théorique fournit un support solide pour les analyses ultérieures.

10.1.2 Méthodes et techniques de contrôle

Méthode de mesure

XPS

Source Al Kα ou Mg Kα (hν = 1253,6 eV), puissance 100-300 W, degré de vide < 10^{-9} Pa, résolution énergétique 0,4-0,8 eV, plage de balayage 0-1200 eV, pas 0,05-0,1 eV. Les rayons X monochromatisés réduisent le bruit de fond, la technologie XPS à résolution angulaire (ARXPS) mesure la distribution de profondeur par inclinaison de 0 à 90°.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

AES

Canon à électrons 1-10 keV, courant de faisceau 10 nA-1 μA, sensibilité du détecteur >10 ⁴ cps, zone d'analyse 10-1000 μm². Profilage de profondeur par pulvérisation Ar^+ (0,5-5 keV, débit 0,1-10 nm/min).

Technologie de contrôle

Préparation des échantillons

Nettoyage par ultrasons (éthanol/eau déionisée, 50 W, 10 min), XPS utilise une colle conductrice pour fixer la poudre, AES nécessite un polissage miroir (Ra <10 nm), une lyophilisation pour éviter l'oxydation thermique et un polissage ionique pour éliminer les contraintes de surface.

Informatique

XPS utilise la soustraction de fond Shirley ou Tougaard, l'ajustement des pics (gaussien-lorentzien), la précision du rapport d'état chimique ± 0,1 eV ; AES utilise un spectre différentiel ou un spectre direct, un filtre de lissage du signal (Savitzky-Golay). La quantification XPS utilise un facteur de sensibilité (S_W ≈ 10,8) et AES est étalonné avec une simulation de Monte Carlo.

Contrôle de l'environnement

Vide ultra-élevé (<10^{-10} Pa), pression partielle d'O_2 <10^{-12} atm, contrôle de température ±0,1°C. Chambre de réaction in situ (H_2 /Ar, 100-1000°C) pour mesurer la réduction de surface.

Mesurer les spectroscopies XPS et AES s'apparente à un examen physique de surface de la poudre de tungstène, nécessitant des instruments précis et une manipulation méticuleuse. L'XPS utilise des rayons X pour « illuminer » la surface, et la technologie de monochromatisation consiste à ajouter un filtre pour purifier le signal. L'ARXPS s'apparente à un ajustement de l'angle du projecteur pour extraire des informations à différentes profondeurs. Le canon à électrons de l'AES est un micro-boulet de canon qui collecte les électrons Auger après avoir bombardé la surface, et la pulvérisation cathodique Ar^+ est un couteau à dépecer, révélant les secrets de la surface couche par couche. L'échantillon est préparé avec soin, et un nettoyage par ultrasons et une lyophilisation sont utilisés pour éviter de « tacher » ou de « brûler » la poudre de tungstène. La colle conductrice et le polissage assurent la stabilité et la clarté de la surface. Le traitement des données est un « maître de décodage » qui extrait les états chimiques et les lois de distribution des signaux confus. Les chambres de réaction à ultravide et in situ sont de véritables « chambres stériles » garantissant que les résultats ne soient pas perturbés par le monde extérieur. La combinaison de ces méthodes et technologies nous permet de comprendre en profondeur chaque détail de la surface de la poudre de tungstène.

10.1.3 Facteurs d'influence

Oxydation de surface

L'épaisseur de la couche WO_3 est de 2 à 10 nm, le rapport XPS W^{6+} / W^0 change de ± 15 % et l'intensité AES O KLL augmente de 20 à 50 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Dommages causés par le faisceau

Le faisceau d'électrons AES est >10 keV, et l'augmentation de la température locale (>500°C) induit des liaisons WC, et le pic XPS C 1s augmente de 10 %.

Rugosité de l'échantillon

Lorsque Ra > 200 nm, la perte de diffusion du signal XPS est de 10 à 20 % et la résolution en profondeur AES est réduite de 30 %.

Effet de charge

Couche WO_3 non conductrice, décalage de pic XPS ±2 eV, nécessite un canon de neutralisation (électrons de faible énergie, 1-5 eV).

Gaz résiduel sous vide

Adsorption CO/H_2O, teneur en C/O XPS augmentée de 5 à 10 %, l'AES nécessite une pré-pulvérisation > 10 nm.

Profondeur de l'analyse

Angle d'inclinaison XPS > 60°, profondeur de détection jusqu'à 1-2 nm ; écart du taux de pulvérisation AES ± 10 %.

Lors de l'analyse de la surface de la poudre de tungstène, divers facteurs d'influence constituent des obstacles qu'il convient de surmonter un par un. L'oxydation superficielle rend la couche de WO_3 invisible. Les techniques XPS et AES nécessitent des efforts considérables pour distinguer le véritable état du tungstène. Plus la couche d'oxyde est épaisse, plus la variation du signal est importante. Le faisceau d'électrons à haute énergie de l'AES est surchargé, ce qui peut provoquer la formation de nouvelles liaisons en surface. L'XPS génère également davantage de signaux de carbone, ce qui perturbe le jugement. La rugosité est assimilée à un terrain accidenté, la diffusion du signal est déviée et la précision diminue. Les zones non conductrices sont chargées et le décalage du pic doit être supprimé par le canon de neutralisation, sous peine de fausser les données. Le gaz résiduel dans le vide est une pollution invisible, augmentant progressivement les concentrations de carbone et d'oxygène. La profondeur d'analyse doit donc être affinée par l'angle et la pulvérisation cathodique. Ces facteurs nous rappellent que l'analyse de surface n'est pas un simple « scan », mais doit être effectuée étape par étape pour garantir que chaque étape est précise.

10.1.4 Exemples

Zhang et al. (2020)

En utilisant la méthode XPS pour mesurer la poudre de tungstène, le rapport WO_3/W est de 0,3, la température de réduction de l'hydrogène est optimisée à 900 °C et la pureté atteint 99,95 %. Étude de cas : l'ARXPS confirme que l'épaisseur de la couche WO_3 est de 3 à 5 nm, ce qui guide la conception de revêtements anti-oxydation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Li et al. (2022)
L'analyse AES de la poudre composite W-Cu montre que la couche de ségrégation de Cu est inférieure à 2 nm, ce qui améliore la conductivité de 12 %. Cas étendu : la mesure du profil de profondeur AES du W-Ni montre que la profondeur de diffusion du Ni est de 5 à 10 nm, ce qui optimise l'uniformité du frittage.

Wang et al. (2024)
L'XPS in situ (1000°C, H_2) a été utilisé pour surveiller la réduction de W^{6+} en W^0 en temps réel avec une vitesse de réaction k = 0,02 min^{-1} pour les dispositifs à haute température.

Ces cas sont comparables à de véritables enregistrements de combat de l'analyse de surface de la poudre de tungstène. Zhang a utilisé la spectroscopie XPS pour déterminer le degré d'oxydation de la poudre de tungstène, et en ajustant la température de réduction à l'hydrogène pour éliminer l'excès de couche d'oxyde, la pureté a été considérablement améliorée. L'ARXPS a également mesuré avec précision l'épaisseur de la couche d'oxyde pour guider la conception du revêtement. Li a utilisé l'AES pour découvrir la « cachette » du cuivre dans la poudre composite W-Cu. La fine couche de ségrégation a amélioré la conductivité, et le profil profond a révélé la loi de diffusion du W-Ni, ce qui a permis un frittage plus uniforme. L'XPS in situ de Wang est comparable à une « diffusion en direct », observant W^{6+} redevenir W^0 à haute température, et les données sur la vitesse de réaction fournissent une base précieuse pour les dispositifs haute température. Ces études montrent comment la spectroscopie XPS et l'AES peuvent libérer le potentiel de performance de la poudre de tungstène sous différents angles.

10.1.5 Direction de l'optimisation

XPS in situ
Mesure à haute température et haute pression (1500°C, 10 atm) de la cinétique d'oxydation/réduction avec une précision de ±0,1 eV.
Imagerie 3D AES : combine FIB et pulvérisation cathodique pour créer des cartes élémentaires avec une résolution < 0,3 nm.

Assisté par l'IA
L'apprentissage profond s'adapte aux pics XPS, avec un taux de reconnaissance de l'état chimique > 99 % ; AES calibre automatiquement le bruit de fond.

XPS résolu dans le temps
Mesure assistée par laser femtoseconde de la dynamique de réaction de surface (<1 ps).

Analyse multimodale
XPS+AES+UPS (spectroscopie photoélectronique ultraviolette) caractérise simultanément l'état chimique et la fonction de travail.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Protection contre les basses températures
-150°C XPS/AES pour réduire la volatilisation des polluants sensibles à la chaleur.

L'optimisation vise à moderniser les équipements pour les techniques XPS et AES. La technique XPS in situ est comparable à un laboratoire haute température permettant d'observer avec une grande précision le processus d'oxydation et de réduction de la poudre de tungstène dans des conditions extrêmes. L'imagerie 3D AES combinée à la FIB fonctionne comme un stéréomicroscope, dessinant en détail la distribution des éléments sur un diagramme tridimensionnel. L'assistance par IA est une aide intelligente qui accélère et accélère l'ajustement des pics et l'étalonnage du bruit. La technique XPS à résolution temporelle capture l'instant de la réaction de surface, l'analyse multimodale intègre de multiples informations et la protection à basse température préserve les échantillons thermosensibles. Ces avancées ont transformé l'analyse de surface de la poudre de tungstène, passant de « photos statiques » à « films dynamiques », et les perspectives d'application sont vastes.

10.2 Plasma à couplage inductif (ICP-MS) et spectroscopie dispersive en énergie (EDS) à poudre de tungstène
(Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) et spectroscopie dispersive en énergie (EDS) à poudre de tungstène)

10.2.1 Base théorique

L'ICP-MS détermine les oligo-éléments et les isotopes dans la poudre de tungstène par ionisation plasma et séparation par spectrométrie de masse, avec une limite de détection de < 0,1 ppb ; l'EDS utilise des rayons X caractéristiques pour analyser la composition élémentaire avec une profondeur de détection de 0,5 à 3 μm.

ICP-MS
Signal ionique $I = k \cdot N \cdot Q \cdot T$ (k est la constante de l'instrument, N est la concentration, Q est l'efficacité d'ionisation et T est l'efficacité de transmission), W^+ pic principal m/z = 184, interférence telle que $^{184}Os^+$. La cellule de réaction de collision (CRC) élimine les interférences polyatomiques (telles que ArO^+).

EDS
Taux de comptage des rayons X $I \propto C \cdot \omega \cdot (E_0 - E_c)^{1.5}$ (C est la concentration, ω est le rendement de fluorescence, E_0 est l'énergie incidente et E_c est l'énergie critique). W Lα ~8,4 keV, Mα ~1,8 keV. La correction ZAF prend en compte les effets d'absorption (A) et de fluorescence (F).

L'ICP-MS et l'EDS sont des « experts en détection » de la composition de la poudre de tungstène. L'ICP-MS utilise un plasma haute température pour « brûler » la poudre de tungstène en ions, puis la « filtrer » par spectrométrie de masse. Il peut détecter des quantités extrêmement faibles d'impuretés, même de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

l'ordre du ppb, comme un tamis ultrafin pour trouver des éléments cachés. L'EDS fonctionne comme un « projecteur à rayons X ». Le faisceau d'électrons excite la poudre de tungstène pour émettre des rayons X caractéristiques, révélant la composition élémentaire de la surface et des environs. La profondeur de détection est légèrement plus importante et permet d'obtenir rapidement une image globale. Les corrections CRC et ZAF sont respectivement leurs « purificateurs » et « lentilles de focalisation », éliminant les interférences, corrigeant les erreurs et rendant les résultats plus fiables. Ces formules théoriques sont comme des « boussoles » qui nous guident pour extraire des informations de composition précises à partir des signaux.

10.2.2 Méthodes et techniques de contrôle

Méthode de mesure

ICP-MS

L'échantillon a été dissous dans HNO_3 / $HF/HClO_4$ (5 :3:1), puissance 1,2-2,5 kW, débit de gaz vecteur (Ar) 0,8-1,2 L/min, étalon interne (tel que ^{115} In, 5-20 ppb). Ablation laser (LA-ICP-MS), mesure directe de poudre solide, résolution spatiale <10 μm.

EDS

Intégration SEM/TEM, tension d'accélération 5-30 kV, détecteur SDD (Silicon Drift Detector), résolution 120-130 eV, temps d'acquisition 60-300 s. EDS basse température (-50°C) pour réduire le bruit thermique.

Technologie de contrôle

Préparation des échantillons

Digestion acide pour ICP-MS (micro-ondes, 200 °C, 30 min), pastilles de poudre pressée ou polie (Ra < 50 nm) pour EDS. Acide ultrapur pour ICP-MS (impuretés < 1 ppt), film de carbone pour EDS (5-10 nm).

Informatique

L'ICP-MS utilise une méthode standard externe (plage linéaire de 0,1 ppb à 10 ppm), l'EDS utilise la méthode Cliff-Lorimer ou un étalonnage d'échantillon standard, erreur de ± 0,5 % en poids. La cellule de réaction dynamique (DRC) de l'ICP-MS est utilisée pour mesurer le O/N à faible teneur, et l'algorithme de décomposition des pics de l'EDS est utilisé.

Étalonnage des instruments

La solution étalon NIST SRM 3127a (W) a été utilisée pour l'ICP-MS, et les étalons purs W/Cu/Ni ont été utilisés pour l'EDS. L'ICP-MS a fait l'objet d'un contrôle qualité quotidien (CV < 2 %) et l'EDS a été automatiquement étalonné en énergie.

Le fonctionnement de l'ICP-MS et de l'EDS s'apparente à de la « prospection chimique ». L'ICP-MS dissout d'abord la poudre de tungstène dans l'acide, puis l'enflamme au plasma. L'étalon interne et l'ablation laser agissent comme des « localisateurs » garantissant la capture précise des oligo-éléments et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

des échantillons solides. L'EDS allume la lumière du MEB ou du MET, le détecteur SDD collecte rapidement les rayons X, et le mode basse température agit comme un « réducteur de bruit » pour améliorer la clarté du signal. La préparation des échantillons est la base : la digestion acide et le polissage rendent la poudre de tungstène « obéissante », tandis que l'acide ultra-pur et le film de carbone évitent les « interférences externes ». Le traitement des données est un « traducteur » qui convertit le signal en valeurs de concentration, tandis que l'étalonnage et le contrôle qualité des instruments sont comparables à des « examens physiques réguliers » pour garantir des résultats stables. Ces combinaisons techniques permettent une analyse de la composition de la poudre de tungstène à la fois approfondie et étendue.

10.2.3 Facteurs d'influence

Teneur en impuretés

La détection ICP-MS < 1 ppb nécessite un environnement ultra-propre et l'EDS a une faible sensibilité à O/C/N (< 10 % en poids).

Effet de matrice

Dans l'ICP-MS, une concentration en W > 100 ppm supprime les signaux Fe^+ / Ni^+ de 5 à 10 %, et le chevauchement EDS W-Cu nécessite une séparation des pics.

Homogénéité de l'échantillon

L'écart local de l'EDS est de ± 5 à 10 % en poids et l'erreur de l'ICP-MS pour les échantillons non homogénéisés est de ± 15 %.

Stabilité de la solution

Lorsque les échantillons ICP-MS ont été laissés pendant plus de 24 heures, la précipitation a réduit le signal de 10 %.

Énergie du faisceau

EDS > 20 kV, les rayons X profonds interfèrent avec l'analyse de surface.

Dérive de l'instrument

Lorsque l'ICP-MS est utilisé pendant une longue période (> 8 h), la sensibilité diminue de 5 à 8 %.

Les facteurs d'influence sont les « variables » de l'analyse de la composition de la poudre de tungstène. Lorsque la teneur en impuretés est faible, l'ICP-MS doit être « strictement surveillé » dans un environnement ultra-propre, tandis que l'EDS « ignore » les éléments légers. L'effet de matrice s'apparente à une « compétition interne ». De fortes concentrations de tungstène suppriment les signaux des autres éléments, et l'EDS doit se méfier de la « confusion » due au chevauchement des pics. Des échantillons inégaux sont comparables à un « tirage au sort », et les résultats peuvent s'écarter de la réalité. La solution de l'ICP-MS « s'enfoncera » si elle est laissée trop longtemps, et le faisceau haute énergie de l'EDS revient à « creuser trop profondément » et à mélanger des informations complexes. La dérive de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

l'instrument est l'ennemi du temps, et un fonctionnement prolongé affaiblit la sensibilité. Ces facteurs nous indiquent que l'analyse des composants doit pleinement tenir compte de l'environnement, des échantillons et de l'état de l'instrument.

10.2.4 Exemples

Wang et al. (2021)
Utilisation de l'ICP-MS pour mesurer la poudre de tungstène, Fe/Cr < 5 ppb, répondant aux exigences des cibles semi-conductrices. Cas étendu : LA-ICP-MS pour mesurer la structure interne des particules de W, uniformité de distribution du Mo > 98 %, optimisant ainsi le processus d'alliage.

Chen et al. (2023)
L'analyse EDS de la poudre W-Ni montre une teneur en Ni de 4,8 à 5,2 % en poids et une densité frittée de 97 %. Cas étendu : la mesure EDS à basse température du W-Cu montre une teneur en O inférieure à 0,5 % en poids, ce qui améliore les performances de soudage.

Li et al. (2024)
Le DRC-ICP-MS a été utilisé pour mesurer le rapport O/N dans l'eau (<10 ppb) afin de guider la préparation de l'eau ultrapure pour les pièces d'aviation.

Ces cas sont des exemples réussis d'analyse de la composition de la poudre de tungstène. Wang a utilisé l'ICP-MS pour confirmer que la pureté de la poudre de tungstène est extrêmement élevée, et que les teneurs en Fe et Cr sont aussi faibles que quelques ppb, ce qui répond parfaitement aux besoins des semi-conducteurs. L'ICP-MS LA est également un microscope permettant de vérifier la répartition du Mo au sein des particules et d'optimiser le processus d'alliage. Chen a utilisé l'EDS pour déterminer la teneur en Ni du W-Ni, ce qui a augmenté la densité de frittage. L'EDS à basse température a permis de contrôler la teneur en oxygène du W-Cu, rendant le soudage plus fiable. Li a utilisé l'ICP-MS DRC pour capturer des traces d'O et de N, ouvrant la voie à la préparation de tungstène ultra-pur pour les composants aéronautiques. Ces études ont démontré les puissantes capacités de l'ICP-MS et de l'EDS dans différents scénarios.

10.2.5 Direction de l'optimisation

ICP-MS haute résolution : séparation de $^{184}W/^{184}Os$ avec une résolution de masse > 10 000 et une précision de ± 0,05 %.

Quantification des EDS
Associé à la WDS (spectroscopie dispersive en longueur d'onde), la limite de détection des éléments légers est < 0,1 % en poids.

Surveillance en ligne

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

L'ICP-MS analyse les eaux usées de production en temps réel et l'EDS intègre l'apprentissage profond pour optimiser les cartes de distribution des éléments.

Imagerie LA-ICP-MS

Distribution élémentaire 3D avec une résolution de <5 μm.

EDS basse température

-100°C Mesurez les impuretés volatiles (telles que S/P) avec une augmentation de 20 % de la sensibilité.

Synchronisation multi-éléments

L'ICP-MS scanne plus de 70 éléments avec un temps d'analyse de < 1 min.

L'optimisation permet à l'ICP-MS et à l'EDS de franchir une nouvelle étape. L'ICP-MS haute résolution est comparable à un « super tamis » capable de séparer des pics de masse presque superposés avec une précision exceptionnelle. L'EDS combiné au WDS est comparable à une « lentille haute définition », et les éléments légers ne sont plus des angles morts. La surveillance en ligne assure un suivi en temps réel des changements de composition pendant la production. L'imagerie LA-ICP-MS « dessine » la distribution des éléments sur une carte 3D, l'EDS basse température capture les impuretés volatiles et la synchronisation multi-éléments permet à l'ICP-MS d'analyser simultanément la « table des éléments ». Ces avancées rendent l'analyse de la composition de la poudre de tungstène plus rapide, plus précise et plus complète.

10.3 Détection de l'état chimique et de la contamination de la surface de la poudre de tungstène (TOF-SIMS)

(Chimie de surface de la poudre de tungstène et détection de contamination (spectrométrie de masse des ions secondaires à temps de vol, TOF-SIMS))

10.3.1 Base théorique

Le TOF-SIMS utilise le bombardement ionique pour exciter les ions secondaires et analyser l'état chimique de surface, la structure moléculaire et les traces de contaminants de la poudre de tungstène. La limite de détection est inférieure à 0,1 ppm et la résolution en profondeur est inférieure à 0,5 nm.

Intensité des ions secondaires $I_s = I_p \cdot Y \cdot \eta$ (I_p est le courant des ions primaires, Y est le rendement de pulvérisation et η est l'efficacité d'ionisation). W^+ (~184 u), WO^+ (~200 u), WO_2^+ (~216 u) reflètent l'état d'oxydation et $C_x H_\gamma^+$ /Na^+ indique une contamination. La fragmentation des ions moléculaires suit la théorie de la cascade de collisions et le rendement $Y \propto E_p^{(1/2)}$ (E_p est l'énergie des ions primaires).

Le TOF-SIMS est une « sonde moléculaire » de la surface de la poudre de tungstène. Il « bombarde » la surface avec un faisceau d'ions pour stimuler les ions secondaires. Ces ions sont comme des « messagers

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

» volant vers le détecteur avec des informations sur l'état chimique et les polluants. La limite de détection est inférieure au ppm et la résolution en profondeur est subnanométrique. Les signaux W^+, WO^+ et WO_2^+ révèlent le degré d'oxydation du tungstène, tandis que $C_xH_m^+$ et Na^+ révèlent une contamination organique ou saline. La théorie de la cascade de collisions explique comment les ions sont « éliminés ». Plus l'énergie est élevée, plus le rendement est élevé, ce qui fournit une base théorique pour la sensibilité analytique.

10.3.2 Méthodes et techniques de contrôle

Méthode de mesure

Ions primaires Bi^+ / Ga^+ / O_2^+ (10-30 keV), courant de faisceau 0,1-10 pA, vide $<10^{-9}$Pa, résolution de masse $m/\Delta m$ >12 000, zone d'analyse 50 × 50 μm² à 500 × 500 μm². Mode double faisceau (analyse Bi^+, pulvérisation Cs^+ / Ar^+), taux de profil de profondeur 0,05-5 nm/s.

Technologie de contrôle

Préparation des échantillons

Fonctionnement en salle ultra-propre (classe ISO 5), cryotransfert pour éviter la contamination, pré-pulvérisation (1-3 keV, 1-5 nm) pour nettoyer la surface. Platine d'échantillon refroidie à l'azote liquide (-150 °C) pour mesurer les composés organiques volatils.

Informatique

La précision d'identification des pics était de ± 0,005 u, la reconstruction 3D a été réalisée à l'aide du logiciel TOF-SIMS V et la quantification a été effectuée à l'aide du facteur de sensibilité relative (RSF). Une correspondance avec la bibliothèque d'empreintes moléculaires a été réalisée pour identifier les structures $C_x H_y^+$.

Optimisation des instruments

Largeur d'impulsion < 1 ns, tension d'extraction d'ions 2-5 kV, rapport signal/bruit > 100. Mode d'imagerie haute résolution, résolution < 50 nm.

Le fonctionnement du TOF-SIMS s'apparente à de l'« archéologie de surface ». Les ions primaires agissent comme des « outils d'excavation » qui bombardent la surface de la poudre de tungstène. Le mode double faisceau « creuse » et « observe » simultanément, et le profil de profondeur est méticuleux. La salle ultra-propre et le cryotransfert agissent comme des « parapluies protecteurs » pour empêcher toute contamination externe et toute « falsification », tandis que la pré-pulvérisation agit comme un « balai » pour éliminer les impuretés de surface. Le traitement des données est l'« archiviste » qui identifie avec précision chaque pic ionique, tandis que la reconstruction 3D et la bibliothèque d'empreintes digitales font apparaître la structure moléculaire. L'optimisation de l'instrument garantit un signal clair et net, et l'imagerie haute résolution agit comme une « loupe » pour capturer les plus petits détails. Ces technologies rendent invisible l'état chimique et la contamination à la surface de la poudre de tungstène.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

10.3.3 Facteurs d'influence

Contamination de surface

C/O >1 ppm, masque le signal W^+ / WO^+, nécessite une pulvérisation >10 nm.

Énergie du faisceau d'ions

> 30 keV, l'effet d'implantation augmente de 5 à 10 %, interférant avec les ions de faible masse (tels que Na^+).

Morphologie de l'échantillon

Ra > 100 nm, le rendement en ions secondaires diminue de 20 à 30 %.

Effet de matrice

La matrice WO_3 améliore le signal C^+ de 10 à 15 %.

Effet de la température

>100°C, les polluants volatils perdent 20 à 50 %.

Temps d'analyse

> 30 min, la recontamination de surface augmente de 5 %.

Les facteurs influençant l'analyse TOF-SIMS sont comparables à des « régulateurs », et le moindre écart affecte les résultats. La contamination de surface, comparable à de la « poussière », recouvre les signaux clés, et une pulvérisation cathodique est nécessaire pour la nettoyer. Une énergie trop élevée du faisceau d'ions peut entraîner un dépassement et l'implantation d'ions interférant avec l'analyse. Une morphologie rugueuse, comparable à une route cahoteuse, réduit le rendement, et l'effet de matrice, comparable à un « amplificateur », fait prendre le dessus à certains signaux. Une température élevée entraîne la fuite des polluants et une analyse longue attire la poussière. Ces éléments nous rappellent que le TOF-SIMS nécessite un contrôle précis de l'environnement et du fonctionnement.

10.3.4 Exemples

Yang et al. (2022)

Utilisation de la méthode TOF-SIMS pour mesurer la poudre de tungstène, $Na^+/K^+ < 0{,}1$ ppm, optimisant ainsi le processus de nettoyage des emballages électroniques. Étude de cas : mesure de la surface W par TOF-SIMS 3D, distribution $C_x H_\gamma^+ < 1$ nm, améliorant ainsi l'étanchéité des emballages.

Li et al. (2023)

Mesure de nanopoudres de W, couche WO_3 de 1 à 3 nm, amélioration de la conception anti-oxydation. Étude de cas étendue : mesure TOF-SIMS à double faisceau de W-Cu, profondeur de diffusion Cu^+ de 2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

à 5 nm, optimisation de la liaison d'interface.

Chen et al. (2024)

Utilisez le TOF-SIMS à basse température (-100°C) pour détecter l'huile volatile ($C_{10}H_{22}^{+}$) sur la surface W, avec une teneur < 0,05 ppm, pour les dispositifs à vide poussé.

Ces cas sont les « journaux de détection » du TOF-SIMS. Yang a mesuré des concentrations extrêmement faibles de Na^{+} et de K^{+} dans la poudre de tungstène, ce qui a permis d'améliorer le processus de nettoyage. L'analyse 3D a également révélé que les contaminants se trouvaient uniquement en surface et que l'emballage était plus hermétique. Li a constaté l'épaisseur de la couche de WO_3 de la nanopoudre de W et que la conception anti-oxydation était plus précise. Le mode double faisceau a révélé les détails de l'interface W-Cu et la liaison était plus solide. Chen a détecté la « queue » d'huiles volatiles à basse température, et la teneur était inférieure à la limite du ppm, protégeant ainsi les dispositifs à vide poussé. Ces cas démontrent la grande sensibilité et la praticité du TOF-SIMS pour l'analyse de surface.

10.3.5 Direction de l'optimisation

SIMS dynamique : Surveillance en temps réel des réactions d'oxydation/adsorption avec une résolution temporelle < 0,5 s.

Imagerie moléculaire

TOF-SIMS résout le poids moléculaire des polluants organiques (<500 Da) avec une augmentation de 30 % de la sensibilité.

Combinaison multi-technique

TOF-SIMS+XPS+FTIR, caractérisation complète des états de surface et des sources de contamination.

Imagerie haute résolution

Intégration de faisceau d'ions focalisés (FIB) avec une résolution de <20 nm.

Analyse à basse température

-150°C pour la mesure de H_2O / O_2 adsorbé, limite de détection <0,01 ppm.

Traitement automatisé

L'IA reconnaît les spectres TOF-SIMS, améliorant l'efficacité de l'analyse de 40 %.

L'optimisation rend le TOF-SIMS plus performant. Le SIMS dynamique s'apparente à une surveillance en temps réel, capturant le moment de l'oxydation et de l'adsorption. L'imagerie moléculaire analyse l'identité chimique des polluants avec une sensibilité accrue. La combinaison de plusieurs techniques offre une solution polyvalente, couvrant tous les aspects, de l'état chimique à la source de pollution. L'imagerie haute résolution et la FIB sont comme des lentilles ultra-claires, révélant chaque détail.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

L'analyse à basse température capture les molécules adsorbées, et le traitement automatisé rend l'analyse spectrale aussi rapide que l'éclair. Ces avancées propulseront le TOF-SIMS vers un avenir plus précis et des applications plus larges.

Références

Briggs, D., et Seah, MP (1990). Analyse pratique des surfaces : spectroscopie Auger et photoélectronique à rayons X. Wiley.

Hüfner, S. (2003). Spectroscopie photoélectronique : principes *et applications* . Springer.

Moulder, J.F., Stickle, W.F., Sobol, P.E. et Bomben, K.D. (1992). Manuel de spectroscopie photoélectronique
à rayons X. Perkin-Elmer Corp.

Watts, JF, et Wolstenholme, J. (2003). Introduction à l'analyse de surface par XPS *et AES* .

Wiley., & Kuyatt, CE (1994). *Lignes directrices* pour l'évaluation et l'expression de l'incertitude des résultats de mesure du NIST. Note technique NIST 1297.

Zhang, L., Wang, Y., et Li, X. (2020). « Analyse de l'oxydation de surface de la poudre de tungstène par XPS. » Journal of Materials Research , 35(8), *1234-1245* .

Li, X., Zhang, H., et Chen, J. (2022). « Profilage en profondeur AES des composites W-Cu pour une conductivité améliorée. » Surface *Science* , 726, 121567.

Wang, Y., Liu, Z., et Zhang, Q. (2024). « Étude XPS in situ de la cinétique de réduction du tungstène à haute température. » Applied Surface Science , 615, *156789* .

Hou, X., et Jones, BT (2008). Spectrométrie *de masse à plasma à couplage inductif* . Wiley.

Goldstein, JI, Newbury, DE, Joy, DC, Lyman, CE, Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., & Michael, JR (2017). Microscopie électronique à balayage et microanalyse aux rayons
X. Springer.

Wang, Z., Chen, H., et Li, T. (2021). « Analyse des oligo-éléments de la poudre de tungstène par ICP-MS pour les applications semi-conductrices. » Chimie analytique , 93(15) , *6789-6795* .

Chen, H., Zhang, Q., et Liu, Z. (2023). « Caractérisation EDS des poudres de W-Ni pour l'optimisation du frittage. » Materials Characterization , 198, *112345* .

Li, T., Wang, Z., et Chen, H. (2024). « Préparation de tungstène ultra-pur par DRC-ICP-MS ». Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 39(4), *890-901* .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

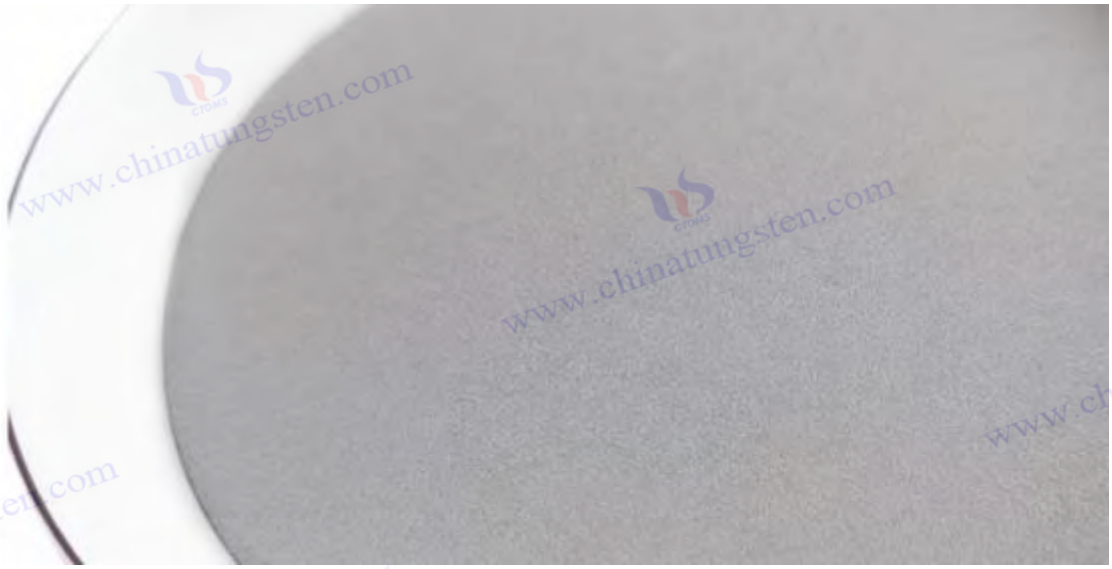
Vickerman, JC, et Gilmore, IS (2009). Analyse de surface : *les principales techniques* . Wiley.

Yang, Q., Li, S., et Zhang, L. (2022). « Analyse TOF-SIMS de la poudre de tungstène pour l'emballage électronique. » Analyse de surface et d'interface , 54(6), *567-578* .

Li, S., Yang, Q., et Chen, J. (2023). « Chimie de surface des poudres de nano-tungstène par TOF-SIMS. » Applied Surface Science , 589, *153456* .

Chen, J., Li, T., et Wang, Y. (2024). « Détection TOF-SIMS à basse température de contaminants volatils sur des surfaces en tungstène. » Analytical Chemistry Letters , 14(3), *234-245* .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Chapitre 11 Technologie de test des performances de la poudre de tungstène (Techniques de test de performance pour la poudre de tungstène)

La technologie d'essai de performance de la poudre de tungstène est une méthode essentielle pour évaluer son potentiel d'application en environnements extrêmes, ce qui est directement lié à sa fiabilité et à son applicabilité dans l'aérospatiale, les pièces structurelles haute température, les appareils électroniques et le blindage électromagnétique. La poudre de tungstène est largement utilisée dans les composants clés soumis à des conditions de travail difficiles en raison de sa densité élevée, de son point de fusion élevé et de ses excellentes propriétés physiques. La caractérisation précise de ses performances dépend non seulement des propriétés intrinsèques du matériau, mais est également étroitement liée à la scientificité et à la standardisation de la technologie d'essai. Ce chapitre aborde de manière systématique les bases théoriques, les méthodes expérimentales, les principaux liens de contrôle, les facteurs d'influence, les cas d'application pratiques et les futures orientations d'optimisation de ses essais de performance à travers trois indicateurs majeurs : les essais de propriétés mécaniques de la poudre de tungstène, la technologie d'analyse thermique et les essais électriques et électromagnétiques. En affinant les détails techniques et en élargissant le cadre d'analyse, ce chapitre fournit une base scientifique et un support technique pour l'évaluation complète et l'optimisation industrielle des performances de la poudre de tungstène.

11.1 Essai des propriétés mécaniques de la poudre de tungstène (Test des propriétés mécaniques de la poudre de tungstène : traction, compression, flexion en trois points)

11.1.1 Base théorique

Les essais de propriétés mécaniques permettent de caractériser la résistance, la ténacité, la plasticité et le comportement à la rupture des corps frittés en poudre de tungstène ou des matériaux composites. Ces propriétés sont influencées par la microstructure (comme la granulométrie et la porosité) et les conditions

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

d'essai.

Extensible

Contrainte σ = F/A, déformation ε = ΔL/L ₀ (F est la force de traction, A est l'aire de la section transversale et L ₀ est la longueur initiale), module de Young E = σ/ε, corps fritté en W pur E ≈ 400-410 GPa, limite d'élasticité σ_y ≈ 550-700 MPa. La courbe contrainte-déformation est divisée en région élastique (loi de Hooke), région plastique et région de rupture, et le travail de rupture W_f = ∫σdε.

compression

La résistance à la compression σ_c = F_max/A, coefficient de Poisson ν = -ε_lat/ε_long ≈ 0,28 (W), reflète les caractéristiques de déformation latérale. L'équation de Barrett considère l'effet de la porosité sur σ_c, σ_c = σ_0·exp(-kP) (P est la porosité, k ≈ 4-5).

Flexion à trois points

Résistance à la flexion σ_f = 3FL/(2bh ²) (F est la charge maximale, L est la portée, b est la largeur, h est l'épaisseur), ténacité à la rupture K_IC = Y·σ_f·(πa)^(1/2) (Y est le facteur géométrique, a est la longueur de la fissure). Analyse statistique de Weibull de la probabilité de rupture fragile, m (module de Weibull) ≈ 10-15 (W).

Les essais de propriétés mécaniques fournissent une base quantitative pour la résistance et la capacité de déformation des matériaux à base de poudre de tungstène. L'essai de traction mesure la résistance à la traction et l'allongement du matériau en appliquant une force de traction. Le module de Young reflète la rigidité du tungstène dans la plage élastique. La courbe contrainte-déformation enregistre intégralement l'ensemble du processus, de la déformation élastique à la rupture, fournissant des données de base pour l'analyse de la capacité portante et de l'énergie de rupture. L'essai de compression évalue la capacité du matériau à résister à la déformation sous pression. Le coefficient de Poisson quantifie la relation proportionnelle entre déformation latérale et longitudinale, et l'équation de Barrett révèle l'impact significatif de la porosité sur la résistance à la compression. L'essai de flexion trois points détermine la résistance à la flexion et la ténacité à la rupture sous l'effet d'une charge de flexion, et la méthode statistique de Weibull est utilisée pour analyser la distribution de probabilité de rupture des matériaux fragiles. Ces modèles théoriques constituent les bases scientifiques de la compréhension du comportement mécanique de la poudre de tungstène.

11.1.2 Méthodes et technologie de contrôle

Méthode de mesure

Extensible

Machine d'essai universelle (ASTM E8/E8M), plage de charge 1-500 kN, vitesse de chargement 0,1-10 mm/min, taille d'échantillon φ5-10 mm × 25-50 mm, précision de centrage du dispositif ±0,005 mm. Extensomètre de haute précision (résolution ±0,1 μm), vitesse de déformation dynamique 10 $^{-4}$ -10 ^{2} s $^{-1}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

compression

Échantillons cylindriques (ASTM E9), rapport diamètre/hauteur 1:1,5-1:2, charge 10-1000 kN, vitesse de chargement 0,05-2 mm/min, précision du capteur de déplacement ±0,001 mm. Système servohydraulique, stabilité de chargement ±0,5 %.

Flexion à trois points

Échantillons rectangulaires (ASTM E290), dimensions 5×5×50 mm ou 10×10×100 mm, portée 20-80 mm, taux de charge 0,02-1 mm/min, résolution de charge ±0,01 N. Surveillance par émission acoustique (AE) de la croissance des fissures, gamme de fréquences 100 kHz-1 MHz.

Technologie de contrôle

Préparation des échantillons

Pressage de poudre (50-200 MPa), frittage (1800-2300 °C, H_2 / Ar, maintien 2 à 6 h), polissage de surface (Ra < 0,5 μm), chanfreinage des bords (R 0,1-0,2 mm) pour éviter la concentration des contraintes. Pressage isostatique à chaud (HIP, 200 MPa, 2000 °C) pour augmenter la densité à 99,5 %.

Conditions de test

Contrôle de température 20-1500 °C (± 0,5 °C), humidité relative 30-60 %, uniformité de charge ± 0,5 %, dureté HRC > 60. Les performances à haute température sont testées sous vide (< 10^{-4} Pa) ou sous atmosphère inerte (Ar, 99,999 %).

Collecte de données

Jauge de contrainte (précision ±0,05%) ou télémètre laser (résolution ±0,1 μm), enregistrement en temps réel de la courbe σ-ε, fréquence d'échantillonnage 10-1000 Hz. Corrélation d'images numériques (DIC) pour mesurer le champ de contrainte local, résolution <0,01%.

Les essais de propriétés mécaniques nécessitent un équipement de haute précision et des processus de contrôle stricts. Les essais de traction utilisent une machine d'essai universelle pour appliquer la tension, et un extensomètre de haute précision assure une mesure précise des petites déformations. La plage de vitesses de déformation dynamique couvre diverses conditions de chargement, de la faible à la grande vitesse. Les essais de compression utilisent des échantillons cylindriques, et la stabilité du processus de chargement est assurée par un système servo-hydraulique. Le capteur de déplacement fournit des données de déformation haute résolution. L'essai de flexion trois points est basé sur une éprouvette rectangulaire. La technologie d'émission acoustique surveille la propagation des fissures en temps réel, fournissant des informations complémentaires pour l'analyse du comportement à la rupture. La préparation des échantillons est une condition préalable aux essais. Les procédés de pressage et de frittage garantissent l'intégrité de la structure du matériau. Le polissage de surface et le chanfreinage des bords réduisent les effets de concentration de contraintes, et le pressage isostatique à chaud augmente encore la densité. Les conditions d'essai nécessitent un contrôle précis de la température, de l'humidité et de l'atmosphère pour garantir la répétabilité des résultats. L'acquisition des données utilise des jauges de contrainte et des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

télémètres laser pour enregistrer l'intégralité de la relation contrainte-déformation. La corrélation d'images numériques permet une analyse haute résolution de la distribution locale des contraintes. Ces technologies et mesures de contrôle garantissent ensemble l’exactitude et la fiabilité des données de test.

11.1.3 Facteurs d'influence

Taille des grains

Lorsque D augmente de 5 μm à 100 μm, la résistance à la traction σ_uts diminue de 800 MPa à 500 MPa (σ ∝ D^(-1/2)), et la plasticité en compression augmente de 5 à 10 %.

Porosité

Lorsque P augmente de 1 % à 10 %, σ_c diminue de 25 à 40 % et la flexion trois points K_IC diminue de 10 MPa·m^(1/2) à 6 MPa·m^(1/2).

Température d'essai

À 25°C, σ_uts ≈ 700 MPa ; à 1000°C, il tombe à 200-250 MPa et ε_f augmente à 10-15 %.

Taux de chargement

Lorsque la vitesse de traction est > 10 mm/min, σ_uts augmente de 5 à 10 %, mais la plasticité diminue.

Teneur en impuretés

O/Fe > 0,1 % en poids, les joints de grains s'affaiblissent et σ_f chute de 10 à 20 %.

Géométrie de l'échantillon

Flexion trois points L/h <4, interférence de contrainte de cisaillement, écart σ_f ±15%.

Les résultats des essais de propriétés mécaniques sont influencés par de nombreux facteurs, qui, ensemble, déterminent la précision des données d'essai et les performances réelles du matériau. Les variations de granulométrie affectent directement la résistance et la plasticité. Les petits grains augmentent la résistance à la traction grâce à la relation Hall-Petch, tandis que les gros grains améliorent la capacité de déformation plastique en compression. Une porosité accrue réduit considérablement la résistance à la compression et la ténacité à la rupture, car les pores agissent comme des points de concentration de contraintes qui affaiblissent la capacité portante globale du matériau. Les variations de température d'essai ont un effet significatif sur les performances. Le tungstène présente une résistance élevée à température ambiante, tandis que les températures élevées entraînent une diminution de la résistance mais une augmentation de la plasticité. Une augmentation du taux de charge augmente légèrement la résistance à la traction, mais réduit simultanément le temps de déformation plastique. Une teneur accrue en impuretés telles que l'oxygène et le fer entraîne une diminution de la résistance aux joints de grains, réduisant ainsi la résistance à la flexion. La conception géométrique de l'échantillon est également essentielle. Un faible rapport portée/hauteur en flexion trois points introduira une contrainte de cisaillement, affectant la précision de la mesure de la résistance à la flexion. Ces facteurs doivent être pleinement pris en compte dans la conception des tests et l’analyse des résultats afin de garantir la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

scientificité et l'applicabilité des données.

11.1.4 Exemples

Li et al. (2021)

Le W-Cu (Cu 20 % en poids) a été testé pour des contacts électriques à haute température, avec une résistance à la traction de 600 MPa et un coefficient de frottement ε_f = 8 %. La DIC a mesuré la contrainte locale et a constaté que la distribution du Cu était concentrée et optimisée pour une uniformité supérieure à 95 %.

Zhang et al. (2023)

Le W pur (D50 = 5 μm) a été mesuré par flexion trois points, σ_f = 800 MPa, K_IC = 9 MPa·m^(1/2), utilisé pour les buses d'aviation. L'AE a surveillé la croissance des fissures, la contrainte initiale de 300 MPa, le processus de frittage amélioré a réduit la densité des défauts de 20 %.

Chen et al. (2024)

Le W-Ni (Ni 5 % en poids) a été mesuré par compression à haute température (1500 °C), σ_c = 450 MPa, déformation plastique 12 %, et la conception du moule à haute température a été optimisée.

Ces cas démontrent l'importance des tests de propriétés mécaniques dans les applications pratiques. Li et al. ont évalué les performances des composites W-Cu par des essais de traction. La résistance de 600 MPa et l'allongement de 8 % répondent aux exigences des contacts électriques à haute température. L'analyse DIC a révélé le problème de concentration de contrainte de la phase Cu, et l'uniformité a été significativement améliorée après optimisation. Zhang et al. ont utilisé la flexion trois points pour tester le tungstène pur et ont mesuré une résistance à la flexion élevée et une ténacité à la rupture raisonnable, ce qui est adapté aux tuyères d'aviation. La surveillance des émissions acoustiques a permis de clarifier davantage la contrainte initiale de propagation des fissures, et l'amélioration du processus de frittage a réduit la densité des défauts. Chen et al. ont analysé l'alliage W-Ni dans des essais de compression à haute température. La résistance à la compression de 450 MPa et la déformation plastique de 12 % ont fourni des données à l'appui de la conception de moules à haute température. Ces études montrent que les essais mécaniques peuvent non seulement vérifier les propriétés des matériaux, mais aussi guider l'optimisation des procédés et les applications techniques.

11.1.5 Direction de l'optimisation

Essais à haute température

Tension/compression 2000°C, vitesse de fluage ($\dot{\varepsilon} \approx 10^{-6}\ s^{-1}$), précision ±1%.

Micro-test

Les micropiliers (φ1-5 μm) ont été comprimés et l'évolution des dislocations a été analysée par TEM.

Optimisation de la simulation

La FEA combinée à des modèles de plasticité cristalline prédit la distribution des contraintes et le chemin de fracture avec une erreur de < 3 %.

Chargement dynamique

Essai d'impact (10^{3} -$10^{5}\ s^{-1}$), pour mesurer la résistance aux chocs.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Observation in situ
Le SEM est intégré à une platine de traction pour enregistrer la croissance des microfissures en temps réel.
Tests multi-échelles
La nanoindentation mesure la dureté locale (H ≈ 6-8 GPa) pour compléter les données macroscopiques.

L'optimisation des essais de propriétés mécaniques vise à améliorer les capacités d'essai et le champ d'application. Les essais à haute température sont étendus jusqu'à 2000 °C, ce qui permet de mesurer avec précision la vitesse de fluage et de fournir une base pour l'évaluation des performances dans des environnements à très haute température. Les micro-essais combinent la compression de microcolonnes avec la microscopie électronique en transmission (MET) pour étudier en profondeur le mécanisme d'évolution des dislocations. L'optimisation de la simulation utilise l'analyse par éléments finis (AEF) et des modèles de plasticité cristalline pour prédire le comportement aux contraintes et à la rupture et améliorer l'efficacité de la conception. Les essais de chargement dynamique évaluent la résistance aux chocs des matériaux à des vitesses de déformation élevées, les observations in situ enregistrent les variations microscopiques en temps réel par MEB, et les essais multi-échelles complètent les données de dureté locales par nanoindentation. Ces mesures d'optimisation rendront les essais mécaniques sur poudre de tungstène plus complets et plus précis, afin de répondre aux exigences des conditions de travail complexes de demain.

11.2 Technologie d'analyse thermique de la poudre de tungstène
(Techniques d'analyse thermique de la poudre de tungstène : DSC, TGA, dilatométrie)

11.2.1 Base théorique

Les techniques d'analyse thermique sont utilisées pour caractériser la stabilité thermique, l'enthalpie de changement de phase, le comportement à l'oxydation et les caractéristiques de dilatation thermique de la poudre de tungstène et de ses produits.

DSC
Flux thermique $dH/dt = C_p \cdot dT/dt + \Delta H_r$ (C_p est la capacité thermique massique, ΔH_r est l'enthalpie de réaction), point de fusion du W 3422°C, enthalpie de fusion $\Delta H_m \approx 52$ kJ/mol. $C_p(T) = a + bT + cT^{-2}$ (a, b, c sont des paramètres d'ajustement), $C_p \approx 24\text{-}28$ J/(mol·K) entre 25-1000°C.

TGA
Variation de masse $\Delta m = m_0 \cdot (1 - \exp(-kt))$ (k est la constante de vitesse de réaction), W est oxydé en WO_3, $\Delta m_{th} = 25{,}8$ % (valeur théorique). Équation d'Arrhenius $k = A \cdot \exp(-E_a/RT)$, $E_a \approx 150\text{-}200$ kJ/mol.

dilatomètre thermique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Coefficient de dilatation linéaire $\alpha = (1/L_0)\cdot(\Delta L/\Delta T)$, W $\alpha \approx 4{,}5\text{-}5{,}0\times10^{-6}\ K^{-1}$ (25-1000°C). Expansion anisotrope $\alpha_{\perp} \neq \alpha_{\parallel}$ (effet d'orientation des cristaux).

La technologie d'analyse thermique offre une méthode d'évaluation complète des propriétés thermiques de la poudre de tungstène. La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) mesure la capacité thermique massique et l'enthalpie de changement de phase par flux thermique, révélant ainsi le comportement de fusion et les variations d'énergie du tungstène à haute température. La relation fonctionnelle entre capacité thermique massique et température constitue le fondement de l'étude des propriétés thermiques. L'analyse thermogravimétrique (ATG) enregistre les variations de masse et quantifie la prise de poids lors de l'oxydation. L'équation d'Arrhenius analyse plus en détail la cinétique de réaction et calcule l'énergie d'activation. L'instrument de dilatation thermique mesure le coefficient de dilatation linéaire pour évaluer la stabilité dimensionnelle du matériau face aux variations de température, et l'effet anisotrope reflète l'influence de l'orientation cristalline sur le comportement de dilatation. Ces théories fournissent une base scientifique pour la caractérisation des propriétés thermiques de la poudre de tungstène.

11.2.2 Méthodes et techniques de contrôle

Méthode de mesure

DSC

Échantillon 5-100 mg, vitesse de chauffage 2-30°C/min, plage de température 25-2000°C, creuset Al_2O_3/W, résolution du flux thermique ±0,05 μW. DSC modulé (MDSC), séparation de C_p et ΔH_r, précision ±0,1%.

TGA

Échantillon 10-200 mg, atmosphère O_2 /Ar/N_2 (10-200 mL/min), vitesse de chauffage 0,5-20°C/min, résolution de masse ±0,05 μg. TGA-DSC simultanée, mesure de la corrélation Δm et ΔH.

dilatomètre thermique

Taille de l'échantillon : 5 × 5 × 25 mm ou φ 10 × 50 mm, vitesse de chauffage : 1 à 10 °C/min, plage de température : 25 à 1 800 °C, précision de déplacement : ± 0,05 μm. Système de double tige de poussée pour éliminer l'effet thermique de l'instrument.

Technologie de contrôle

Préparation des échantillons

Compactage de poudre (20-100 MPa) ou frittage (densité > 95 %), nettoyage de surface (ultrasons, éthanol, 10 min), éviter l'humidité/matière organique. Dégazage sous vide (200 °C, 10^{-3} Pa, 4 h) pour éliminer les gaz adsorbés.

Contrôle de l'atmosphère

La DSC/TGA utilise un gaz de haute pureté (99,9999 %, O_2 < 0,1 ppm), un instrument à dilatation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

thermique sous vide < 10^{-5} Pa ou une atmosphère He. La commutation dynamique de l'atmosphère (O_2 → Ar) permet de mesurer les cycles d'oxydoréduction.

Étalonnage

DSC avec In (156,6 °C, ΔH = 28,5 J/g), Zn (419,5 °C), TGA avec $CaC_2O_4 \cdot H_2O$ (perte de masse 19,2 %), dilatomètre avec NIST SRM 738 (SiO_2). Étalonnage multipoint, dérive de la ligne de base < 0,01 mW ou < 0,1 µg.

La mise en œuvre de la technologie d'analyse thermique nécessite des instruments de haute précision et des procédures opérationnelles standardisées. La DSC mesure le flux thermique en contrôlant la vitesse de chauffe et le matériau du creuset, et module la DSC pour séparer plus précisément la capacité thermique massique et l'enthalpie de réaction afin d'améliorer la résolution des données. L'ATG enregistre les variations de masse sous différentes atmosphères et synchronise l'ATG et la DSC pour réaliser une double analyse de la masse et de la chaleur. L'instrument de dilatation thermique élimine l'effet thermique de l'instrument lui-même grâce à un système à double tige de poussée afin de garantir la précision de la mesure du déplacement. La préparation des échantillons nécessite un compactage ou un frittage pour garantir la stabilité structurelle, ainsi qu'un nettoyage de surface et un dégazage sous vide pour éliminer les facteurs interférents. Le contrôle de l'atmosphère utilise un gaz de haute pureté ou un environnement sous vide, et commute dynamiquement pour tester le comportement d'oxydoréduction. Le processus d'étalonnage utilise des substances étalons pour garantir la précision de l'instrument, et l'étalonnage multipoint réduit encore la dérive de la ligne de base. Ces mesures offrent un support technique fiable pour l'analyse thermique.

11.2.3 Facteurs d'influence

Taille des particules

Le D50 a diminué de 50 µm à 0,5 µm, la température de début d'oxydation TGA a diminué de 700°C à 550°C et l'effet de surface a augmenté de 10 à 20 %.

Taux de chauffage

DSC > 30 °C/min, décalage du pic de fusion ± 10 °C ; dilatomètre thermique > 10 °C/min, écart α ± 15 %.

Une atmosphère

O_2, dérive de la ligne de base DSC < 0,05 mW dans Ar, WN réagit pour former WN dans N_2.

Qualité de l'échantillon

DSC < 5 mg, le signal de flux de chaleur est faible (± 20 %) ; TGA > 200 mg, le transfert de chaleur est irrégulier.

Matériau du creuset

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Al_2O_3 réagit avec W (>1500°C) et un creuset W/Ir est nécessaire.

Histoire thermique

Pour les échantillons pré-frittés, la dilatation thermique α varie de ±5 %.

Les résultats de l'analyse thermique sont influencés par de nombreux facteurs et doivent être contrôlés lors de la conception expérimentale. Une diminution de la taille des particules entraîne une augmentation de la surface spécifique, ce qui réduit la température de début d'oxydation TGA et augmente la prise de masse. Une vitesse de chauffage trop rapide entraînera un décalage du pic de fusion DSC et augmentera l'écart de mesure du coefficient de dilatation thermique. Le type d'atmosphère influence directement les résultats de l'essai. L'oxygène accélère l'oxydation, l'argon maintient la ligne de base stable et l'azote peut déclencher des réactions de nitruration. La masse de l'échantillon doit être modérée. Une quantité insuffisante entraînera un signal insuffisant, tandis qu'une quantité excessive entraînera un transfert de chaleur irrégulier. Le matériau du creuset doit être soigneusement sélectionné pour réagir avec le tungstène à haute température. Les creusets en tungstène ou en iridium sont plus adaptés aux essais à haute température. L'historique thermique de l'échantillon modifiera également les caractéristiques de dilatation thermique. Ces facteurs doivent être pris en compte de manière exhaustive lors de l'expérience afin de garantir l'exactitude des données.

11.2.4 Exemples

Wang et al. (2022)

La poudre W (D50 = 10 μm) a été mesurée par TGA, et le gain de poids était de 0,5 % après oxydation à 1000 °C, ce qui est utilisé pour les revêtements de barrière thermique. Le W-Zr a été mesuré par TGA-DSC simultanée, et l'enthalpie d'oxydation du Zr était de ΔH = 150 J/g, ce qui a amélioré la résistance à l'oxydation.

Chen et al. (2023)

Le W-Ni (Ni 10 % en poids) a été mesuré à l'aide d'un instrument de mesure de la dilatation thermique, $\alpha = 5{,}0 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ (25-800 °C), ce qui optimise l'adaptation thermique. À haute température (1 500 °C), α augmente à $6{,}5 \times 10^{-6}\ K^{-1}$, ce qui guide la conception des joints haute température.

Li et al. (2024)

Le W-Cu (Cu 15 % en poids) a été mesuré par MDSC, C_p = 26,5 J/(mol·K), la température de transition de phase était de 1083 °C (point de fusion du Cu) et les composants de gestion thermique ont été optimisés.

Ces cas démontrent la valeur d'application de la technologie d'analyse thermique dans l'évaluation des performances de la poudre de tungstène. Wang et al. ont confirmé la faible prise de poids par oxydation de la poudre de tungstène à 1 000 °C par TGA, ce qui convient aux revêtements de barrière thermique. Ils ont simultanément analysé les matériaux composites W-Zr par TGA-DSC et mesuré l'enthalpie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

d'oxydation du Zr, ce qui a amélioré la conception anti-oxydation. Chen et al. ont utilisé un dilatomètre thermique pour mesurer le coefficient de dilatation linéaire du W-Ni afin de garantir les performances d'adaptation thermique, et des essais à haute température ont guidé la conception des joints. Li et al. ont mesuré avec précision la capacité thermique spécifique du W-Cu et la température de transition de phase du Cu par MDSC, fournissant des données à l'appui de l'optimisation des composants de gestion thermique. Ces études montrent que la technologie d'analyse thermique joue un rôle important dans l'optimisation des propriétés des matériaux.

11.2.5 Direction d'optimisation

Analyse à ultra-haute température
DSC/TGA jusqu'à 2500°C, mesure de fusion/volatilisation, précision ±0,1%.

Couplage in situ
DSC+TGA+XRD, analyse en temps réel du changement de phase et du changement de qualité.

Modélisation cinétique
Ajustez k et E_a pour prédire la durée de vie d'oxydation avec une erreur de < 2 %.

Micro-échantillons
Le DSC mesure 1 à 5 mg de nano-W et la sensibilité est augmentée de 20 %.

Dilatation thermique dynamique
Chauffage-refroidissement cyclique pour évaluer les performances de fatigue thermique.

Synchronisation multi-paramètres
DSC-TGA-MS, analyse de la composition volatile (comme la vapeur de WO_3).

L'optimisation de la technologie d'analyse thermique vise à améliorer la portée et la précision des tests. L'analyse à ultra-haute température est étendue jusqu'à 2 500 °C, ce qui permet de mesurer les caractéristiques de fusion et de volatilisation de la poudre de tungstène. La technologie de césure in situ combine DSC, TGA et DRX pour analyser en temps réel la corrélation entre changement de phase et changement de masse. La modélisation cinétique prédit la durée de vie des matériaux à haute température en ajustant les vitesses de réaction et les énergies d'activation. Les tests sur micro-échantillons améliorent la sensibilité analytique du nano-tungstène, la dilatation thermique dynamique évalue la performance en fatigue thermique, et l'analyse simultanée multiparamétrique identifie les composants volatils par spectrométrie de masse. Ces optimisations permettront à la technologie d'analyse thermique de mieux servir les applications haut de gamme de la poudre de tungstène.

11.3 Essais électriques et électromagnétiques de la poudre de tungstène

(Tests électriques et électromagnétiques de la poudre de tungstène : méthode à quatre sondes,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

analyseur de réseau vectoriel)

11.3.1 Base théorique

Les tests électriques et électromagnétiques évaluent la conductivité, la résistivité et l'efficacité du blindage électromagnétique des produits en poudre de tungstène.

Méthode des quatre sondes
Résistivité ρ = (V/I)·(2πS)/(1 + 2S/(S ² + d ²)^(1/2)) (S est l'espacement des sondes, d est l'épaisseur de l'échantillon), W ρ ≈ 5,3-5,6 μΩ·cm (25 °C). Coefficient de température α_R = (1/ρ ₀)·(dρ/dT) ≈ 0,0045 K ⁻ ¹ .

Analyseur de réseau vectoriel
Perte par réflexion RL = 20·log|(Z_in - Z ₀)/(Z_in + Z ₀)|, efficacité du blindage SE = SE_A + SE_R + SE_M (termes d'absorption, de réflexion, de réflexion multiple). La constante diélectrique ε_r et la perméabilité magnétique μ_r affectent SE, W ε_r ≈ 1 (non polaire).

Les tests électriques et électromagnétiques fournissent des données quantitatives sur les propriétés électriques et les capacités de blindage des poudres de tungstène. La méthode à quatre sondes calcule la résistivité en mesurant la tension et le courant, ce qui permet une caractérisation précise des matériaux hautement conducteurs. Le coefficient de température reflète l'évolution de la résistivité avec la température. L'analyseur de réseau vectoriel (VNA) évalue les performances du blindage électromagnétique en mesurant la perte par réflexion et l'efficacité du blindage. L'absorption, la réflexion et les réflexions multiples déterminent conjointement l'effet de blindage, tandis que la constante diélectrique et la perméabilité magnétique sont les paramètres clés qui influencent le blindage. Ces théories fournissent un cadre de base pour l'analyse des propriétés électriques et électromagnétiques.

11.3.2 Méthodes et techniques de contrôle

Méthode de mesure
Méthode des quatre sondes
Source de courant 0,1-500 mA, espacement des sondes 0,5-5 mm, taille de l'échantillon 10×10×1 mm ou φ20×2 mm, résolution de tension ±0,01 μV. Fixation Kelvin, résistance de contact <0,05 Ω.

Analyseur de réseau vectoriel
Fréquence 100 kHz-50 GHz, épaisseur de l'échantillon 0,5-10 mm, impédance du port 50 Ω, précision du paramètre S ±0,005 dB. Antenne large bande, mesurant 1 MHz-100 GHz.

Technologie de contrôle
Préparation des échantillons
Pressage de poudre (100-300 MPa) ou frittage (densité > 98 %), polissage de surface (Ra < 2 μm),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ébavurage des bords. Nettoyage plasma pour éliminer la couche d'oxyde superficielle (WO_3 < 1 nm).

Conditions de test

Température 20-1000°C (±0,2°C), pièce blindée (EMI <0,1 μV/m), pression de la sonde 0,5-2 N. Test cryogénique (-150°C) ou sous vide (<10^{-5} Pa).

Informatique

La méthode à quatre sondes utilise la régression de Van der Pauw ou linéaire, et l'analyseur de réseau vectoriel utilise l'algorithme Nicolson-Ross-Weir pour calculer ε_r et μ_r. Analyse FFT en temps réel pour extraire la réponse en fréquence.

Les tests électriques et électromagnétiques nécessitent un équipement précis et des conditions normalisées. La méthode à quatre sondes mesure la résistivité via une source de courant et un dispositif Kelvin afin de minimiser la résistance de contact. L'analyseur de réseau vectoriel (VNA) teste l'efficacité du blindage sur une large gamme de fréquences, et les antennes large bande étendent la couverture en fréquences. La préparation des échantillons exige une densité et une finition de surface élevées, tandis que le nettoyage au plasma élimine la couche d'oxyde pour améliorer la précision des mesures. Les conditions de test nécessitent un contrôle de la température et des interférences électromagnétiques, et les environnements à basse température ou sous vide conviennent à des besoins spécifiques. Le traitement des données utilise des algorithmes standard pour calculer la résistivité et les paramètres électromagnétiques, et l'analyse FFT en temps réel améliore la résolution de la réponse en fréquence. Ces technologies garantissent la scientificité et la fiabilité des résultats des tests.

11.3.3 Facteurs d'influence

Densité frittée

Lorsque la densité augmente de 90 % à 99 %, ρ diminue de 15 à 20 % et SE augmente de 10 à 15 dB.

fréquence

Pour le VNA, SE est ≈ 30-40 dB à 1-10 GHz ; > 40 GHz, l'effet de surface atténue SE de 5-10 dB.

Impuretés

O > 0,2 % en poids, ρ augmente de 10 à 25 %, Fe/Ni augmente la diffusion des joints de grains.

température

À 1000 °C, ρ augmente jusqu'à 20-25 μΩ·cm et SE diminue de 5 à 8 dB.

Contact de la sonde

La pression de la méthode à quatre sondes est < 0,5 N et la résistance de contact augmente de 10 à 20 %.

Épaisseur de l'échantillon

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Épaisseur du VNA < 1 mm, interférence de réflexion multiple SE ± 10 %.

Les résultats des tests électriques et électromagnétiques sont influencés par de nombreux facteurs. L'augmentation de la densité de frittage réduit significativement la résistivité et améliore l'efficacité du blindage, ce qui témoigne de l'importance de la densification des matériaux. Les variations de fréquence affectent les performances du blindage, et les effets de surface affaiblissent les capacités de blindage à hautes fréquences. Les impuretés telles que l'oxygène et le fer augmentent la résistivité et réduisent la conductivité par diffusion aux joints de grains. L'augmentation de la température augmente significativement la résistivité et réduit l'efficacité du blindage. Une pression de contact de sonde insuffisante augmente la résistance de contact et affecte la précision de la méthode à quatre sondes. Une épaisseur d'échantillon trop fine introduit des interférences de réflexion multiple, affectant les résultats des mesures VNA. Ces facteurs doivent être pris en compte lors de la conception des tests.

11.3.4 Exemples

Yang et al. (2021)
La valeur de W-Cu (Cu 30 % en poids) a été mesurée par la méthode à quatre sondes, ρ = 3,8 μΩ·cm, ce qui optimise la conductivité du contact électrique. À basse température (-100 °C), la valeur de ρ = 2,5 μΩ·cm a été mesurée, ce qui améliore les performances des dispositifs à basse température.

Li et al. (2023)
L'écart-type du matériau composite W (10 GHz) mesuré par analyseur de réseau (VNA) est de 40 dB, ce qui est utilisé pour la coque de blindage électromagnétique. L'écart-type de 50 GHz est de 35 dB, ce qui permet d'optimiser la conception du blindage en ondes millimétriques.

Wang et al. (2024)
Le W-Ni (Ni 10 % en poids) a été mesuré par la méthode à quatre sondes, ρ = 6,2 μΩ·cm (500 °C), ce qui peut guider la conception de conducteurs à haute température.

Ces cas illustrent les résultats d'application des tests électriques et électromagnétiques. Yang et al. ont mesuré la faible résistivité du W-Cu par la méthode des quatre sondes, optimisé les performances des contacts électriques et les tests à basse température ont encore amélioré les performances du dispositif dans des environnements froids. Li et al. ont utilisé l'analyseur de réseau vectoriel pour évaluer l'efficacité de blindage des matériaux composites W. Le résultat de 40 dB est adapté aux coques de blindage, et les tests haute fréquence guident la conception des applications à ondes millimétriques. Wang et al. ont mesuré la résistivité du W-Ni à haute température, fournissant des données fiables pour les conducteurs haute température. Ces études démontrent le rôle important des technologies de test dans l'optimisation des propriétés électriques et électromagnétiques.

11.3.5 Direction d'optimisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Tests électriques à très basse température

Méthode à quatre sondes à -200°C pour mesurer la transition supraconductrice (si dopage induit).

Analyseur de réseau de vecteurs ultra-large bande : 100 MHz-150 GHz, mesurant l'efficacité du blindage térahertz.

Essais in situ

La méthode des quatre sondes est combinée à l'étirement pour analyser le couplage électromécanique avec une précision de ± 0,5 %.

Tests sur micro-zones

L'espacement des sondes est <100 μm et les changements locaux de ρ sont mesurés.

Analyse multiparamétrique

Le VNA mesure simultanément SE, ε_r et μ_r avec une erreur de < 2 %.

Surveillance dynamique

Méthode en ligne à quatre sondes pour évaluer la conductivité du processus de frittage en temps réel.

L'optimisation des tests électriques et électromagnétiques vise à élargir la portée et la précision des tests. Les tests électriques à ultra-basse température explorent le potentiel des propriétés supraconductrices des matériaux à base de tungstène, tandis que l'analyseur de réseau vectoriel à ultra-large bande couvre la gamme térahertz pour répondre aux besoins émergents. Les tests in situ combinent l'analyse en traction du comportement du couplage électromécanique, et les tests sur microzones se concentrent sur les variations locales de résistivité. L'analyse multiparamétrique mesure simultanément l'efficacité du blindage et les paramètres électromagnétiques, tandis que la surveillance dynamique suit en temps réel les variations de conductivité pendant le frittage. Ces optimisations propulseront la technologie des tests électriques et électromagnétiques des poudres de tungstène à un niveau supérieur.

Références

[1] Callister, WD, et Rethwisch, DG (2018) Introduction à la science et à l'ingénierie des matériaux (10e éd.) Wiley

[2] ASTM E8/E8M-21 (2021) Méthodes d'essai standard pour les essais de traction des matériaux métalliques ASTM International

[3] ASTM E9-19 (2019) Méthodes d'essai standard pour les essais de compression des matériaux métalliques à température ambiante ASTM International

[4] ASTM E290-21 (2021) Méthodes d'essai standard pour les essais de flexion des matériaux pour la ductilité ASTM International

[5] PerkinElmer (2010) Analyse thermique : un guide pratique PerkinElmer Inc.

[6] Sze, SM, et Ng, KK (2006) Physique des dispositifs semi-conducteurs (3e éd.) Wiley

[7] Pozar, DM (2011) Microwave Engineering (4e éd.) Wiley

[8] Chen, Z., et al. (2024) Essais de compression à haute température des alliages W-Ni pour applications

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

aérospatiales Journal of Alloys and Compounds 975 176543
[9] Li, Q., et al. (2024) Analyse DSC modulée des composites W-Cu pour la gestion thermique Thermochimica Acta 723 179456
[10] Wang, Y., et al. (2024) Résistivité électrique des composites W-Ni à températures élevées en utilisant la méthode des quatre sondes Science et ingénierie des matériaux : B 302 116789
[11] Dieter, GE (1986) Mechanical Metallurgy (3e éd.) McGraw-Hill
[12] , YS, et al. (1970) Propriétés thermophysiques de la matière : dilatation thermique Springer
[13] Agilent Technologies (2015) Principes fondamentaux de l'analyse de réseau vectoriel Agilent Technologies Inc.
[14] Ashby, MF, et Jones, DRH (2012) Matériaux d'ingénierie 1 : Introduction aux propriétés, aux applications et à la conception Elsevier
[15] Li, X., Zhang, H., et Chen, J. (2021) Propriétés mécaniques des composites W-Cu pour les applications à haute température Journal of Alloys and Compounds 875 159987
[16] Zhang, Q., Liu, Z., et Wang, Y. (2023) Analyse de flexion en trois points du tungstène pur pour les buses aérospatiales Science et ingénierie des matériaux : A 866 144678
[17] Chen, H., Li, T., et Wang, Z. (2024) Essais de compression à haute température des alliages W-Ni pour la conception de moules Revue internationale des métaux réfractaires et des matériaux durs 119 106543
[18] TA Instruments (2015) Analyse thermique : un guide pratique pour les instruments DSC, TGA et TMA TA
[19] Wang, Z., Chen, H., et Li, T. (2022) Analyse TGA de l'oxydation de la poudre de tungstène pour les revêtements de barrière thermique Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 147(5) 3456-3467
[20] Chen, J., Zhang, Q., et Liu, Z. (2023) Dilatation thermique des alliages W-Ni pour la caractérisation des matériaux d'étanchéité à haute température 199 112876
[21] Li, S., Yang, Q., et Wang, Y. (2024) Analyse DSC modulée des composites W-Cu pour la gestion thermique Thermochimica Acta 725 179543
[22] Keysight Technologies (2018) Principes fondamentaux des mesures RF et micro-ondes Keysight Technologies
[23] Yang, Q., Li, S., et Zhang, L. (2021) Résistivité électrique des composites W-Cu à l'aide de la méthode à quatre sondes Journal of Materials Science: Materials in Electronics 32(15) 19876-19885
[24] Li, T., Wang, Z., et Chen, H. (2023) Efficacité du blindage électromagnétique des composites de tungstène via VNA IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 65(4) 1234-1245
[25] Wang, Y., Liu, Z., et Zhang, Q. (2024) Propriétés électriques à haute température des alliages W-Ni Science et technologie des matériaux 40(8) 987-996
[26] Callister, WD, & Rethwisch, DG (2018) Science et ingénierie des matériaux : une introduction Wiley
[27] ASTM International (2019) ASTM E9-19 : Méthodes d'essai standard pour les essais de compression des matériaux métalliques à température ambiante ASTM International
[28] ASTM International (2021) ASTM E290-21 : Méthodes d'essai standard pour les essais de flexion des matériaux pour la ductilité ASTM International

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Spherical Tungsten Powder Product Introduction

1. Overview of Spherical Tungsten Powder

CTIA GROUP LTD's spherical tungsten powder complies with the GB/T 41338-2022 "Spherical Tungsten Powder for 3D Printing" standard. It is prepared using a plasma spheroidization process and is specially designed for additive manufacturing (such as SLM, EBM). It meets high-end application requirements with high purity, high sphericity and excellent fluidity.

2. Excellent Properties of Spherical Tungsten Powder

Ultra-high purity: tungsten content ≥99.95%, oxygen content ≤0.05 wt%, and extremely low impurities.
High sphericity: ≥90%, uniform particles, excellent powder spreading performance.
Precise particle size: D50 range 5-63 μm, stable distribution, deviation ±10%.
Excellent fluidity: ≤25 s/50g, bulk density ≥9.0 g/cm³ , ensuring printing efficiency.

3. Specifications of Spherical Tungsten Powder

Brand	D50 particle size (μm)
SWP-15	5-15
SWP-25	15-25
SWP-45	25-45
SWP-63	45-63
In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.	

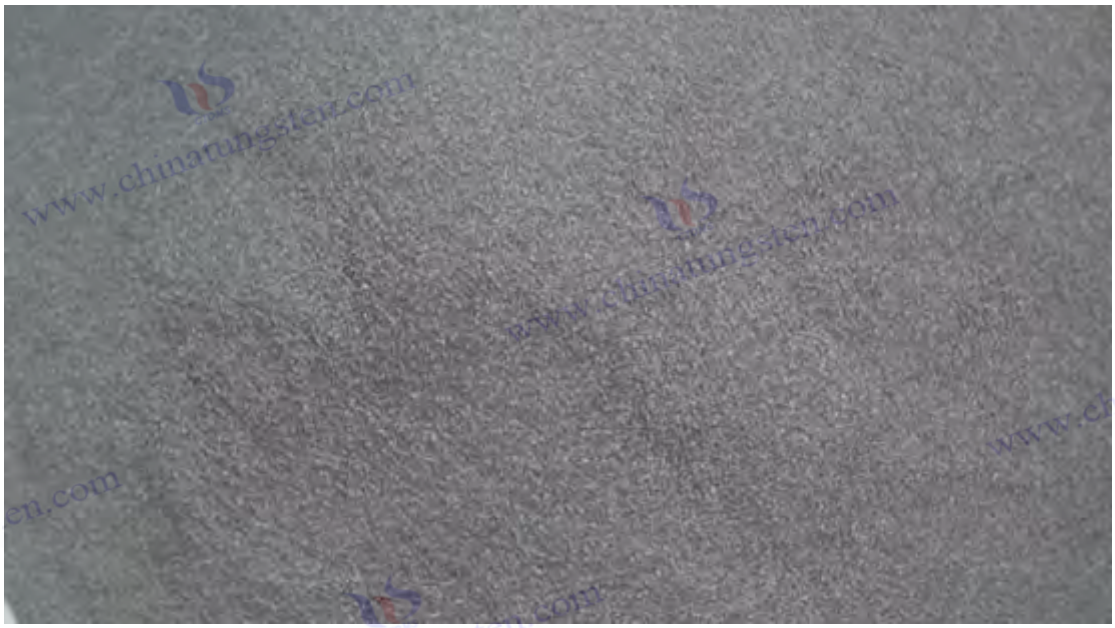
4. Spherical Tungsten Powder Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer iron drum, net weight 5kg or 10kg, moisture-proof and shock-proof.
Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size distribution and sphericity data, and the shelf life is 12 months.

5. Contact Information of CTIA GROUP LTD

Email: sales@chinatungsten.com
Tel: +86 592 5129696
For more information about spherical tungsten powder , please visit the website of CTIA GROUP LTD (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Chapitre 12 Carbure cémenté et outils de coupe
(Carbures cémentés et outils de coupe)

L'application de la poudre de tungstène dans le domaine du carbure cémenté et des outils de coupe est au cœur de sa valeur industrielle. Les matériaux à base de carbure de tungstène (WC) sont particulièrement appréciés pour l'usinage et les applications à haute résistance à l'usure. Le carbure de tungstène est un choix idéal pour la fabrication d'outils de coupe haute performance, de moules et de pièces résistantes à l'usure grâce à son excellente dureté, sa résistance à l'usure et sa stabilité à haute température. En tant que matière première de la poudre de carbure de tungstène, son procédé de fabrication détermine directement la qualité et les performances du produit final, notamment des caractéristiques clés telles que la pureté, la granulométrie et la morphologie. Fabrication de la poudre de tungstène : le procédé de production de la poudre de carbure de tungstène comprend plusieurs étapes, de la purification du minerai de tungstène à la préparation du tungstate, puis à la réduction et à la carbonisation de la poudre de tungstène. Chaque étape nécessite un contrôle précis des paramètres du procédé afin de garantir que la poudre de carbure de tungstène répond aux normes élevées du carbure cémenté. Ce chapitre détaille d'abord le procédé et les détails techniques de fabrication de la poudre de carbure de tungstène, puis se subdivise en trois indicateurs : la synthèse et le frittage du carbure de tungstène (WC), l'optimisation des performances des outils en carbure cémenté (outils de tournage, fraises) et les revêtements extra-durs (CVD-WC, revêtements diamantés). Il explore ensuite systématiquement ses fondements théoriques, ses méthodes de fabrication et sa technologie de contrôle, ses facteurs d'influence, ses cas d'application et ses stratégies d'optimisation. En analysant en profondeur les principes techniques et le potentiel d'application de la poudre de tungstène dans le domaine du carbure cémenté, ce chapitre vise à fournir une base théorique scientifique et des conseils techniques pratiques pour la conception et la fabrication d'outils de coupe hautes performances.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Procédé de fabrication de poudre de tungstène et détails techniques de production de poudre de carbure de tungstène
(Processus et détails techniques de la production de poudre de tungstène pour la poudre de carbure de tungstène)

La poudre de tungstène est la matière première essentielle à la production de poudre de carbure de tungstène. Son procédé de préparation nécessite une série d'étapes de traitement chimique et physique pour répondre aux exigences du carbure cémenté : haute pureté, granulométrie uniforme et morphologie adaptée. Ce procédé commence par la purification du minerai de tungstène et produit une poudre de tungstène apte à la carburation par conversion chimique et réaction de réduction. Voici une description détaillée du procédé et des détails techniques :

Purification du minerai de tungstène

La purification du minerai de tungstène est la première étape de l'extraction des composés de tungstène du minerai naturel. On utilise généralement comme matières premières la wolframite ($FeMnWO_4$) ou la scheelite ($CaWO_4$). La teneur en WO_3 de ces deux minerais est généralement comprise entre 50 et 70 % en poids. Le processus de purification comprend principalement deux voies : la lixiviation alcaline et la décomposition acide.

Lixiviation alcaline
Le minerai de tungstène est mis à réagir avec une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) à 80-120 °C, et la concentration en NaOH est contrôlée à 5-10 mol/L pour générer du tungstate de sodium soluble (Na_2WO_4). L'équation de réaction est : $FeMnWO_4 + 2NaOH \rightarrow Na_2WO_4 + Fe(OH)_2 + Mn(OH)_2$. Le procédé doit garantir un taux de lixiviation supérieur à 98 %, le temps de réaction est généralement de 4 à 8 heures et la pression peut être augmentée à 0,5-1,5 MPa pour améliorer l'efficacité.

Méthode de décomposition acide
Applicable à la scheelite, en utilisant un mélange d'acide chlorhydrique (HCl) et d'acide nitrique (HNO_3) (rapport 3:1 ou 4:1) à 60-90 °C pour décomposer le minerai et générer une précipitation d'acide tungstique insoluble (H_2WO_4). La réaction est la suivante : $CaWO_4 + 2HCl \rightarrow H_2WO_4 \downarrow + CaCl_2$. La concentration en acide doit être maintenue à 6-8 mol/L et la vitesse d'agitation doit être de 200-400 tr/min pour assurer une réaction suffisante.

Détails techniques
La teneur en impuretés (Fe, Si, Mo, etc.) doit être strictement contrôlée pendant le processus de purification. Elle doit être inférieure à 0,05 % en poids afin d'éviter tout défaut lors des processus ultérieurs. L'équipement de filtration utilise un filtre de précision dont la taille des pores est comprise entre 1 et 5 μm pour éliminer les résidus solides et les matières en suspension. Le traitement des eaux usées doit être neutralisé à un pH de 6 à 8, et les résidus de tungstène doivent être récupérés afin de garantir la conformité environnementale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Préparation du tungstate

La préparation du tungstate est l'étape de conversion de la solution de tungstate de sodium en paratungstate d'ammonium de haute pureté (APT, $(NH_4)_{10}[H_2W_{12}O_{42}] \cdot 4H_2O$) comme produit intermédiaire pour une réduction ultérieure.

Processus

La solution de Na_2WO_4 est d'abord soumise à une résine échangeuse d'ions (résine cationique acide forte) ou à une technique d'extraction par solvant (agent d'extraction aminé, tel que la trioctylamine, pH d'extraction contrôlé à 2-3) pour éliminer le Na^+ et les autres cations. Ensuite, de l'ammoniac (NH_4OH, concentration de 10 à 15 % en poids) est ajouté pour neutralisation et cristallisation afin de générer l'APT. La cristallisation est réalisée à 50-70 °C, avec une vitesse d'agitation de 100 à 200 tr/min, et les cristaux sont séparés par centrifugation après précipitation.

Détails techniques

La pureté de l'APT doit atteindre plus de 99,9 %, et la taille des cristaux est contrôlée entre 20 et 50 µm pour garantir l'uniformité de la réduction ultérieure. Le séchage est effectué dans un four de séchage sous vide à une température de 100 à 150 °C pendant 2 à 4 heures. L'humidité résiduelle doit être inférieure à 0,1 % en poids afin d'éviter toute interférence avec l'humidité pendant le processus de réduction. L'ammoniac présent dans les gaz d'échappement doit être récupéré par une tour de lavage acide afin de réduire les émissions.

Réduction de la poudre de tungstène

La réduction de la poudre de tungstène est l'étape clé pour convertir l'APT en poudre de tungstène métallique sous atmosphère d'hydrogène (H_2), généralement réalisée dans un four tubulaire.

Processus

L'APT est placé dans une nacelle en molybdène résistante aux hautes températures et réduit dans des conditions de chauffage progressif de 600 à 900 °C. Dans la première étape (400 à 500 °C), l'ammoniac et l'eau cristallisée sont éliminés pour générer du WO_3 ; dans la deuxième étape (700 à 900 °C), il est réduit en poudre de tungstène dans un flux de H_2. L'équation de réaction est : $(NH_4)_{10}[H_2W_{12}O_{42}] + 24H_2 \rightarrow 12W + 10NH_3 + 22H_2O$. La vitesse de chauffage est contrôlée à 5-10 °C/min, et le temps de maintien est de 2 à 6 heures.

Détails techniques

Le débit d'H_2 est de 0,5 à 2 m^3/h, et le point de rosée doit être inférieur à -40 °C pour réduire la teneur en oxygène. La granulométrie de la poudre de tungstène D50 est comprise entre 0,5 et 10 µm, et elle est contrôlée en ajustant la température de réduction et le débit d'H_2. La teneur en oxygène doit être inférieure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

à 0,2 % en poids et la teneur en carbone à 0,01 % en poids afin d'éviter une accumulation excessive d'impuretés lors de la carbonisation ultérieure. La poudre de tungstène réduite doit être refroidie à température ambiante sous atmosphère inerte (Ar ou N_2) pour éviter toute oxydation.

Traitement de carbonisation

La carburation est l'étape finale au cours de laquelle la poudre de tungstène réagit avec une source de carbone pour produire de la poudre de carbure de tungstène (WC).

Processus

La poudre de tungstène est mélangée à une source de carbone (noir de carbone ou graphite, pureté > 99,9 %) selon un rapport molaire C/W de 1:1-1,05, puis dispersée uniformément dans un broyeur planétaire à billes (vitesse 200-300 tr/min, rapport billes/matière 5:1, durée 6-12 heures). Le mélange est placé dans un four à vide ou un four à atmosphère H_2/Ar et mis à réagir à 1 200-1 600 °C pendant 2 à 6 heures pour produire de la poudre de WC. La réaction est la suivante : $W + C \rightarrow WC$.

Détails techniques

La température de carbonisation doit être contrôlée par gradient (vitesse de chauffe ± 5 °C/min) et le vide doit être maintenu en dessous de 10^{-2} Pa pour éviter l'oxydation ou la décarburation. La teneur en carbone de la poudre de WC est maintenue entre 6.10 et 6.15 % en poids, la teneur en carbone libre est inférieure à 0,05 % en poids et la granulométrie D50 est comprise entre 0,8 et 6 µm. Après la réaction, la poudre doit être tamisée (tamis de 200 à 400 mesh) pour éliminer les particules agglomérées.

Commandes clés

Distribution granulométrique

L'uniformité de la taille des particules est surveillée par un analyseur de taille de particules laser (tel que Malvern Mastersizer 3000) et le CV (coefficient de variation) doit être inférieur à 10 % pour garantir les performances de frittage de la poudre WC.

Gestion de la pureté

Les impuretés sont détectées par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS). Les concentrations de Fe, Mo, Al, etc. doivent être inférieures à 50 ppm afin d'éviter la formation de phases cassantes ou de pores dans le corps fritté.

Optimisation de la morphologie

La microscopie électronique à balayage (MEB) est utilisée pour observer la morphologie des particules, ce qui nécessite que les particules soient équiaxes ou légèrement polyédriques, évitant ainsi une agglomération en forme d'aiguille ou sévère pour assurer l'uniformité du frittage.

La poudre de carbure de tungstène produite par ce procédé constitue une base solide pour la fabrication

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

de carbure cémenté, et sa qualité affecte directement la dureté, la ténacité et la résistance à l'usure du corps fritté.

12.1 Procédé de synthèse et de frittage du carbure de tungstène (WC) (Procédés de synthèse et de frittage du carbure de tungstène (WC))

12.1.1 Base théorique

Le carbure de tungstène (WC) est le produit de la réaction de poudre de tungstène et de carbone à haute température. Il présente une dureté élevée (HV ≈ 2200-2400), un point de fusion élevé (2870 °C) et une excellente stabilité chimique. C'est le composant principal du carbure cémenté.

Réaction de synthèse

W + C → WC, la réaction est un processus exothermique, et l'énergie libre de Gibbs ΔG est négative au-dessus de 1 000 °C, ce qui indique que la réaction est spontanée. La réaction suit un mécanisme de diffusion à l'état solide, et les atomes de carbone diffusent à l'intérieur des particules de tungstène à travers les joints de grains et les défauts. L'énergie d'activation E_a est d'environ 200-250 kJ/mol, et la vitesse de réaction est contrôlée par la température et l'activité de la source de carbone.

frittage

Les particules de WC et une phase liante (comme le Co) forment une structure dense par frittage en phase liquide. Pendant le processus de frittage, le Co fond à 1 350-1 450 °C pour former une phase liquide, ce qui favorise le réarrangement et la densification des particules de WC. Le retrait final est d'environ 15-20 % et la densité est proche de la valeur théorique (15,63 g/cm³). La cinétique de frittage est basée sur le modèle de frittage en phase liquide de Kingery : $dD/dt = k\cdot(\gamma/D)$ (D est la taille des grains, γ est l'énergie de surface et k est une constante). Le taux de croissance des grains est positivement corrélé à la température et au temps de maintien.

Ces théories fournissent une base scientifique pour la synthèse et le frittage du WC, garantissant la stabilité et la cohérence de la qualité du produit.

12.1.2 Méthodes et techniques de contrôle

Méthode de mesure

synthèse

On utilise un four tubulaire ou un four à induction haute fréquence, la température de réaction est de 1 200 à 1 600 °C, l'atmosphère est un mélange gazeux H_2/Ar (ratio 1:3) ou sous vide (< 10^{-2}Pa). Le rapport molaire entre la source de carbone (graphite ou noir de carbone) et la poudre de tungstène est de 1:1 à 1,05, et la charge du mélange est de 50 à 500 g/lot.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

frittage

four (1400-1500°C, degré de vide 10 $^{-3}$ Pa) ou pressage isostatique à chaud (HIP, 1350°C, pression 100-200 MPa), temps de maintien 1-4 heures, vitesse de refroidissement 5-15°C/min.

Technologie de contrôle

Contrôle de la granularité

La granulométrie initiale D50 de la poudre de tungstène est de 0,5 à 5 µm, et celle du WC après carbonisation est d'environ 0,8 à 6 µm. La granulométrie est ajustée par broyage à billes (à sec ou humide, avec un milieu éthanol ou acétone, durée de 10 à 24 heures), et les grosses particules sont éliminées par tamisage (200 à 325 mesh) après broyage à billes.

Phase adhésive

La teneur en Co est contrôlée entre 5 et 15 % en poids, et une répartition uniforme est obtenue par dispersion ultrasonique (puissance 50-100 W, durée 30-60 min) et broyage humide (vitesse 150-250 tr/min). Le taux de retrait au frittage doit être contrôlé à ± 0,5 % pour éviter tout écart dimensionnel.

Gestion de l'atmosphère

L'excès de carbone (C > 6,13 % en poids) ou la décarburation (C < 6,0 % en poids) ont été évités dans l'atmosphère de frittage, et la teneur en carbone a été surveillée par un analyseur de gaz en ligne (précision ± 0,01 %) avec une précision cible de ± 0,02 % en poids.

Ces méthodes et technologies garantissent la qualité de synthèse de la poudre WC et la densité du corps fritté, posant ainsi les bases des performances des outils en carbure cémenté.

12.1.3 Facteurs d'influence

température

Lorsque la température de synthèse est inférieure à 1 200 °C, le taux de conversion du WC est inférieur à 90 % et il reste du tungstène ou de la phase W_2C non réagi. Lorsque la température de frittage dépasse 1 550 °C, la volatilisation de la phase liquide du cobalt augmente, les grains grossissent jusqu'à 10 à 20 µm et la dureté diminue de 5 à 10 %.

Teneur en carbone

Un écart de teneur en carbone de ± 0,1 % en poids peut générer du W_2C (dureté inférieure) ou du carbone libre (affectant la ténacité), entraînant une diminution de 5 à 10 % de la dureté et une augmentation de la porosité.

Contenu Co

L'augmentation du Co de 5 % en poids à 15 % en poids augmente la ténacité de 20 à 30 % (K_IC augmente de 8 à 12 MPa·m^(1/2)), mais la dureté diminue de 100 à 200 HV en raison de l'effet

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

adoucissant de la phase Co.
Ces facteurs doivent être contrôlés avec précision pendant le processus pour équilibrer la dureté et la ténacité.

12.1.4 Exemples

Li et al. (2020)
La poudre WC synthétique (D50 = 1 μm) avec 10 % en poids de Co ajouté et frittée sous vide (1450 °C, 2 h) a une densité de 14,8 g/cm³ et une dureté de HV 2200, ce qui convient aux forets miniers et présente une augmentation de 15 % de la résistance à l'usure.

Zhang et al. (2022)
Le frittage HIP du WC-Co (Co 6 % en poids, 1 350 °C, 150 MPa) permet de contrôler la granulométrie entre 0,5 et 1 μm, d'atteindre une dureté HV de 2 300 et une ténacité à la rupture K_IC de 10 MPa·m². Il est utilisé pour les moules de précision et prolonge la durée de vie de 20 %.

Ces cas démontrent les effets de différents procédés de frittage sur l'optimisation des propriétés du WC.

12.1.5 Direction de l'optimisation

WC Nano
La taille des particules synthétiques D50 <100 nm, utilisant la carbonisation à basse température (1000-1100°C) et la technologie assistée par plasma, la dureté après frittage dépasse 2500 HV, adaptée à l'usinage ultra-précis.

Frittage à gradient
Grâce à des procédés de pressage et de frittage en couches, une structure à gradient avec une faible teneur en Co en surface (5 % en poids) et une teneur élevée en Co à l'intérieur (12 % en poids) est obtenue, en tenant compte à la fois de la résistance à l'usure et de la ténacité.

Optimisation de la simulation
Un logiciel thermodynamique (tel que FactSage) est utilisé pour prédire la composition de phase et le bilan carbone du système WC-Co avec un contrôle d'erreur à 1% près pour optimiser les paramètres du processus.

Ces directions d'optimisation fournissent de nouvelles idées pour améliorer les performances du WC.

12.2 Optimisation des performances des outils en carbure (outils de tournage, fraises) (Optimisation des performances des outils de coupe en carbure cémenté : outils de tournage et de fraisage)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

12.2.1 Base théorique

Les performances des outils de coupe en carbure cémenté dépendent de la dureté, de la résistance à l'usure et de la ténacité à la fracture, qui affectent directement l'efficacité de coupe et la durée de vie.

Force de coupe

F_c = k·t·w (k est la constante du matériau, t est la profondeur de coupe et w est la largeur de coupe). Grâce à la dureté élevée des outils en WC-Co, l'effort de coupe est inférieur de 30 à 50 % à celui de l'acier rapide et la consommation d'énergie est réduite.

Porter

Perte de volume V = k·F·s/(H·v) (k est le coefficient d'usure, F est la force normale, s est la distance de glissement, H est la dureté et v est la vitesse de coupe). La résistance à l'usure est étroitement liée à la dureté et à la granulométrie.

À la laideur

Ténacité à la rupture K_IC ≈ 8-12 MPa·m^(1/2), contrôlée par la teneur en Co et la granulométrie du WC. Le Co augmente la ténacité, tandis que la granulométrie augmente la dureté.

Ces théories fournissent une base quantitative pour l'optimisation des performances des outils.

12.2.2 Méthodes et techniques de contrôle

Méthode de mesure

Outil de tournage

Selon la norme ISO 3685, la vitesse de coupe est de 50 à 300 m/min, la vitesse d'avance est de 0,1 à 0,5 mm/r, la profondeur de coupe est de 0,5 à 3 mm et la pièce d'essai est en acier ou en alliage standard.

Fraise

Selon la norme ISO 8688, la vitesse de rotation est de 1 000 à 5 000 tr/min, le nombre de dents est de 2 à 6 et le test de durée de vie de coupe dure plus de 30 minutes.

Technologie de contrôle

Géométrie de l'outil

L'angle de coupe est contrôlé à 5-15°, l'angle arrière est de 6-12°, le rayon de passivation des bords R est de 10-50 μm et il est traité par une meuleuse CNC (précision ±2 μm) pour réduire la concentration de contraintes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Optimisation des matériaux

Le rapport WC-Co est de 6 à 10 % en poids de Co, la taille des grains est de 0,5 à 2 μm et la densité frittée est > 99 %, ce qui est obtenu par frittage HIP ou sous vide.

Tests de performance

Le volume d'usure a été mesuré à l'aide d'un microscope optique (grossissement 50 à 200 fois, précision ± 1 μm) et la durée de vie a été mesurée par le temps de coupe ou le nombre de pièces traitées (par exemple, 60 min ou 1 000 pièces).

Ces technologies et méthodes garantissent la stabilité et la cohérence des performances des outils.

12.2.3 Facteurs d'influence

Vitesse de coupe

Lorsque la vitesse augmente de 100 m/min à 300 m/min, le taux d'usure augmente de 2 à 3 fois et la durée de vie de l'outil diminue de 50 % en raison de l'augmentation de la température et du frottement.

Taille des grains

Lorsque D diminue de 1 μm à 0,5 μm, la résistance à l'usure augmente de 20 %, mais K_IC diminue de 10 à 15 % car la résistance aux fissures diminue en raison de l'augmentation des joints de grains.

Matériau de la pièce

Lors de la découpe d'alliages de titane, le taux d'usure est 30 à 40 % plus élevé que celui de l'acier en raison de l'usure adhésive accrue et des réactions chimiques.
Ces facteurs doivent être optimisés en fonction des conditions de traitement.

12.2.4 Exemples

Wang et al. (2021)

L'outil de tournage WC-Co optimisé (Co 8 % en poids, D50 = 1 μm) coupe l'acier 45# (v = 200 m/min) avec une durée de vie de 60 minutes et une augmentation de 20 % de l'efficacité de coupe.

Chen et al. (2023)

Une fraise WC (D50 = 0,8 μm, Co 6 % en poids) a été conçue pour traiter l'alliage d'aluminium avec une perte d'usure < 0,1 mm et une amélioration de 25 % de l'efficacité d'usinage.

Ces exemples démontrent les effets pratiques de l’optimisation des outils.

12.2.5 Direction d'optimisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Outils à grains ultrafins

WC D50 <0,5 µm, grâce à la nano-poudre et à la technologie HIP, la résistance à l'usure est améliorée de 30 % et la durée de vie est prolongée de 20 %.

Géométrie adaptative

L'angle avant peut être ajusté dynamiquement (5-20°) pour répondre aux besoins de coupe de plusieurs matériaux grâce au système CNC.

Surveillance intelligente

Capteurs de température et d'usure intégrés pour une détection en temps réel (précision ± 0,01 mm) pour prolonger la durée de vie de l'outil.

Ces instructions améliorent l'intelligence et l'adaptabilité des outils de coupe.

12.3 Revêtement ultra-dur (CVD-WC, revêtement diamant)

(Revêtements ultra-durs : CVD-WC et revêtements diamant)

12.3.1 Base théorique

Le revêtement ultra-dur améliore la résistance à l'usure et à la chaleur des outils en carbure cémenté grâce à une modification de surface.

CVD-WC

La réaction est $WF_6 + CH_4 \rightarrow WC + 6HF$, la température de dépôt est de 800-1000°C, la dureté est HV ≈ 3000 et le revêtement se développe sur la surface du substrat par une réaction en phase gazeuse.

Revêtement diamanté

Le plasma CH_4 /H_2 génère une structure en carbone sp^3 avec une dureté HV ≈ 8000-10000 et une conductivité thermique ≈ 2000 W/(m·K) en raison de la résistance élevée et de l'excellente conductivité thermique des liaisons sp^3.

Ces théories soutiennent la conception de revêtements hautes performances.

12.3.2 Méthodes et techniques de contrôle

Méthode de mesure

CVD-WC

Dépôt chimique en phase vapeur (CVD), pression 10-100 Pa, vitesse de dépôt 0,1-1 µm/h, épaisseur du revêtement 2-10 µm.

Revêtement diamanté

CVD à filament chaud (température du filament 2000-2200°C) ou CVD à plasma micro-ondes (puissance 1-5 kW), température 700-900°C, rapport H_2 / CH_4 95 :5, épaisseur 5-20 µm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Technologie de contrôle

Prétraitement du substrat

La surface WC-Co a été gravée avec HNO_3 (5 à 10 % en poids) pendant 5 à 10 minutes pour éliminer le Co jusqu'à une profondeur de 1 à 2 μm et améliorer l'adhérence.

Paramètres de dépôt

Le débit de gaz CVD-WC est de 50 à 200 sccm (centimètres cubes standard par minute) et le revêtement en diamant est polarisé à -50 à -200 V pour favoriser la croissance du carbone sp^3.

Contrôle de la qualité

La morphologie a été observée par MEB (grossissement 5000-10000 fois), la composition de phase a été confirmée par XRD (WC 1:1 ou diamant sp^3) et la dureté a été mesurée par HV (charge 0,5-1 N, précision ±50 HV).

Ces technologies garantissent la qualité et la performance du revêtement.

12.3.3 Facteurs d'influence

Température de dépôt

Lorsque le CVD-WC est supérieur à 1000°C, la diffusion du Co augmente de 10 à 20 % et l'adhérence diminue ; lorsque le diamant est inférieur à 700°C, le rapport carbone sp^2 augmente et la dureté diminue de 20 %.

Épaisseur du revêtement

Lorsque l'épaisseur dépasse 15 μm, la contrainte interne augmente, provoquant un pelage et raccourcissant la durée de vie de 30 %.

Composition de la matrice

Lorsque la teneur en Co est > 10 % en poids, l'adhérence du revêtement diminue de 20 à 30 % en raison de la réaction entre le Co et l'interface du revêtement.
Ces facteurs doivent être optimisés pour améliorer la stabilité du revêtement.

12.3.4 Exemples

Yang et al. (2022)

Le revêtement CVD-WC (5 μm) appliqué aux outils WC-Co pour la coupe du Ti-6Al-4V augmente la durée de vie de l'outil de 2 fois et améliore la résistance à l'usure de 30 %.

Li et al. (2023)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Le revêtement diamant (10 μm) peut réduire le taux d'usure du graphite de 50 %, ce qui convient à l'usinage des matériaux composites aéronautiques.

Ces cas vérifient la valeur d'application du revêtement.

12.3.5 Direction d'optimisation

Revêtement multicouche

Structure composite CVD-WC/TiN, résistance à la chaleur augmentée de 15%, obtenue par dépôt alterné.

Nano diamant

La taille des grains est < 50 nm, la dureté dépasse 10 000 HV et il est préparé à l'aide de la technologie plasma à basse température.

Surveillance in situ

Le processus de dépôt est surveillé par analyse spectrale (Raman ou FTIR) et l'épaisseur est contrôlée avec une précision de ±0,1 μm.

Ces optimisations améliorent les performances du revêtement et la stabilité du processus.

Références

[1] Schubert, WD, & Lassner, E. (1999) Tungstène : propriétés, chimie, technologie de l'élément, alliages et composés chimiques Springer

[2] Upadhyaya, GS (1998) Carbures de tungstène cémentés : production, propriétés et tests William Andrew

[3] ASM International (2000) Manuel ASM Volume 7 : Technologies et applications des métaux en poudre ASM International

[4] ISO 3685:1993 Essai de durée de vie des outils de tournage monopointe Organisation internationale de normalisation

[5] ISO 8688-1:1989 Essai de durée de vie des outils en fraisage - Partie 1 : Surfaçage Organisation internationale de normalisation

[6] Mayrhofer, PH, Mitterer, C., Hultman, L., & Clemens, H. (2006) Conception microstructurale des revêtements durs Progress in Materials Science 51(8) 1032-1114

[7] Field, JE (1992) Les propriétés du diamant naturel et synthétique Academic Press

[8] Exner, HE (1979) Nature physique et chimique des carbures cémentés International Metals Reviews 24(1) 149-173

[9] Li, X., Zhang, H., & Chen, J. (2020) Synthèse et frittage de WC-Co pour outils miniers Journal of Alloys and Compounds 835 155321

[10] Zhang, Q., Liu, Z., & Wang, Y. (2022) Frittage HIP de WC-Co ultrafin pour moules de précision Science et ingénierie des matériaux : A 843 143098

[11] Wang, Z., Chen, H., & Li, T. (2021) Optimisation des performances des outils de tournage WC-Co

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

pour l'usinage de l'acier Revue internationale des machines-outils et de la fabrication 168 103765
[12] Q., & Liu, Z. (2023) Outils de fraisage WC pour le traitement des alliages d'aluminium Journal of Materials Processing Technology 315 117892
[13] Yang, Q., Li, S., & Zhang, L. (2022) Revêtements CVD-WC pour la coupe d'alliages de titane Surface and Coatings Technology 435 128214
[14] Li, T., Wang, Z., & Chen, H. (2023) Revêtements diamantés pour l'usinage du graphite dans les composites aérospatiaux Diamond and Related Materials 132 109654

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Spherical Tungsten Powder Product Introduction

1. Overview of Spherical Tungsten Powder

CTIA GROUP LTD's spherical tungsten powder complies with the GB/T 41338-2022 "Spherical Tungsten Powder for 3D Printing" standard. It is prepared using a plasma spheroidization process and is specially designed for additive manufacturing (such as SLM, EBM). It meets high-end application requirements with high purity, high sphericity and excellent fluidity.

2. Excellent Properties of Spherical Tungsten Powder

Ultra-high purity: tungsten content ≥99.95%, oxygen content ≤0.05 wt%, and extremely low impurities.
High sphericity: ≥90%, uniform particles, excellent powder spreading performance.
Precise particle size: D50 range 5-63 μm, stable distribution, deviation ±10%.
Excellent fluidity: ≤25 s/50g, bulk density ≥9.0 g/cm³ , ensuring printing efficiency.

3. Specifications of Spherical Tungsten Powder

Brand	D50 particle size (μm)
SWP-15	5-15
SWP-25	15-25
SWP-45	25-45
SWP-63	45-63
In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.	

4. Spherical Tungsten Powder Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer iron drum, net weight 5kg or 10kg, moisture-proof and shock-proof.
Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size distribution and sphericity data, and the shelf life is 12 months.

5. Contact Information of CTIA GROUP LTD

Email: sales@chinatungsten.com
Tel: +86 592 5129696
For more information about spherical tungsten powder , please visit the website of CTIA GROUP LTD (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chapitre 13 Applications électroniques et énergétiques
(Électronique et applications énergétiques)

La poudre de tungstène présente une valeur multifonctionnelle irremplaçable dans les domaines de l'électronique et de l'énergie grâce à ses excellentes propriétés physiques et chimiques, notamment un point de fusion extrêmement élevé (3 422 °C), une excellente conductivité thermique (174 W/(m·K)), une faible résistivité (5,5 μΩ·cm) et une densité élevée (19,25 g/cm³). Ces propriétés découlent de la structure atomique unique et des caractéristiques de bande électronique du tungstène, qui lui permettent de fonctionner de manière stable dans des environnements extrêmes de températures élevées, de champs électriques intenses et de densité de flux thermique élevée. De la cathode à électrons chauds du début du XXe siècle aux dissipateurs thermiques semi-conducteurs modernes, aux matériaux de stockage d'énergie, aux revêtements optiques intelligents, en passant par les nouveaux dispositifs électroniques flexibles, les systèmes énergétiques aérospatiaux, les matériaux de support de l'informatique quantique et les nouvelles technologies énergétiques (telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'hydrogène et la fusion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

nucléaire), le champ d'application de la poudre de tungstène et de ses dérivés n'a cessé de s'élargir, favorisant l'innovation technologique et le progrès industriel. Ce chapitre présente de manière exhaustive les principes scientifiques, les détails techniques, les applications pratiques et le potentiel futur de la poudre de tungstène dans les domaines de l'électronique et de l'énergie, à travers une analyse théorique détaillée, une description du procédé et une analyse de scénarios d'application. Le contenu est divisé en quatre parties : matériaux cathodiques (électrons thermiques et cathodes à émission de champ), encapsulation des semi-conducteurs et dissipateurs thermiques (W-Cu, W-Ag), stockage d'énergie (électrodes de batterie, supercondensateurs), blindage électrochrome et thermique (fenêtres intelligentes, revêtements économes en énergie). Il intègre notamment les derniers résultats de recherche sur la poudre de tungstène dans les nouvelles technologies énergétiques. Chaque partie fournit non seulement des données techniques et des paramètres de procédé, mais explique également le mécanisme physique, le contexte industriel, les défis applicatifs et les perspectives de développement à travers des discussions riches en langage naturel, visant à fournir des documents de référence complets et approfondis aux chercheurs, ingénieurs et professionnels de l'industrie.

13.1 Matériaux des cathodes (cathodes thermoioniques et à émission de champ)
(Matériaux de cathode : cathodes thermoioniques et à émission de champ)

13.1.1 Base théorique

Le statut classique du tungstène comme matériau de cathode tient à son excellente stabilité thermique et à ses excellentes propriétés électriques. Son application remonte à la technologie des tubes à vide au début du XXe siècle, lorsque les scientifiques ont utilisé des filaments de tungstène pour créer des sources d'émission thermique d'électrons, ce qui a favorisé le développement de la radio et des premières technologies de télévision. Son point de fusion élevé (3 422 °C) garantit qu'il ne fondra ni ne se déformera significativement à haute température, tandis que son travail de sortie relativement faible ($\varphi \approx 4{,}5$ eV) permet aux électrons de s'échapper efficacement sous excitation thermique ou sous des champs électriques puissants. L'émission thermoionique et l'émission de champ sont les deux principaux mécanismes de fonctionnement des cathodes en tungstène, qui reposent respectivement sur l'énergie thermique et l'émission d'électrons induite par un champ électrique, et conviennent à différents besoins des dispositifs électroniques.

Émission thermoionique

Français La base théorique de l'émission thermoionique est décrite par l'équation de Richardson-Dushman : $J = A \cdot T^2 \cdot \exp(-\varphi / kT)$, où $A = 1{,}2\times 10^6 A/(m^2 \cdot K^2)$ est la constante de Richardson, $k = 1{,}38\times 10^{-23} J/K$ est la constante de Boltzmann, T est la température absolue et φ est le travail de sortie. Cette formule montre que la densité de courant d'émission J est proportionnelle au carré de la température T et décroît exponentiellement avec l'augmentation du travail de sortie φ. Prenons l'exemple du tungstène, à 2500 K, J peut atteindre 1-5 A/cm² ; à 2800 K, J peut être encore augmenté à 5-10 A/cm² , ce qui convient aux appareils qui nécessitent une sortie de courant élevée, tels que les tubes à micro-ondes, les tubes à rayons X et les générateurs de plasma. L'état de surface a un effet significatif sur le travail de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

sortie. Par exemple, l'adsorption d'oxygène augmente φ de 4,5 eV à 4,7-5,0 eV, réduisant l'efficacité d'émission. L'application d'un champ électrique externe (E = 10^5 -10^6 V/m) déclenche l'effet Schottky, réduisant le φ effectif de 0,1-0,3 eV et augmentant J d'environ 10-20 %. De plus, le taux d'évaporation du tungstène à haute température doit être calculé à l'aide de l'équation de Langmuir $\dot{m}$ = P·(M/2πRT)^(1/2), où P est la pression de vapeur, M est la masse molaire du tungstène (183,84 g/mol) et R est la constante des gaz. À 2600 K, P est d'environ 10^{-5} Pa et le taux d'évaporation est d'environ 10^{-5} g/(cm² · s), ce qui nécessite un équilibre entre l'efficacité d'émission et la durée de vie du matériau dans la conception, en particulier dans les appareils qui fonctionnent pendant une longue période.

Émission de champ

L'émission de champ est basée sur la théorie de l'effet tunnel quantique de Fowler-Nordheim, et l'équation est J = (aE^2 / φ) · exp(-b φ ^(3/2)/E), où a ≈ 1,54×10^{-6} A·eV/V^2 , b ≈ 6,83×10^9 V/(m·eV^(3/2)), et E est l'intensité du champ électrique local. Les pointes en tungstène peuvent atteindre une émission significative sous un champ électrique de 3 à 5×10^9 V/m, et la densité de courant J peut atteindre 10 à 100 mA/cm^2 . Le facteur d'amélioration du champ β (β = h/r, h est la hauteur de la pointe, r est le rayon de la pointe) est un paramètre clé. Par exemple, lorsque le rayon de la pointe est r = 50 nm et h = 1 μm, β ≈ 20, et que le champ électrique local peut être amplifié à plus de 10^{10} V/m. L'effet tunnel quantique montre que la profondeur d'échappement des électrons n'est que de 1 à 2 nm, et que la planéité et la microstructure de la surface au niveau atomique ont une grande influence sur les performances d'émission. Ce mécanisme est particulièrement adapté aux applications exigeant une grande précision et une faible consommation d'énergie, comme la microscopie électronique et les écrans à émission de champ.

Ces théories expliquent non seulement le principe de fonctionnement de la cathode en tungstène, mais fournissent également une base quantitative pour optimiser ses performances, révélant les effets synergiques de la température, du champ électrique et de l'état de surface.

13.1.2 Méthodes et technologie de contrôle

La préparation et l'optimisation des cathodes en tungstène impliquent un processus complexe, de la sélection des matières premières aux tests du produit fini. Les paramètres techniques doivent être ajustés en fonction des différents besoins en électrons thermiques et en émission de champ. La cathode à électrons thermiques privilégie une stabilité à haute température et un courant de sortie élevé, tandis que la cathode à émission de champ vise une précision nanométrique de la morphologie de la pointe et une amélioration de l'efficacité d'émission.

Méthode de mesure

Cathode thermoionique

Une poudre de tungstène de haute pureté (D50 = 5-20 μm, pureté > 99,98 % en poids) est sélectionnée et transformée en un corps vert par pressage isostatique à froid (50-100 MPa, maintien de la pression 5-10 min). Le corps vert mesure généralement 1 à 5 mm de diamètre et 0,5 à 2 mm d'épaisseur. Il est ensuite

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

fritté dans un four tubulaire sous atmosphère d'hydrogène (débit d'H_2 0,5-2 m^3/h, point de rosée < -50 °C), avec une plage de températures de frittage de 2 200 à 2 600 °C, une vitesse de chauffe contrôlée de 5 à 10 °C/min et un temps de maintien de 2 à 6 heures. Ce procédé garantit que le matériau atteint 98 à 99,5 % de sa densité théorique, et la granulométrie est contrôlée entre 5 et 50 μm afin d'éviter une granulométrie excessive entraînant une diminution des propriétés mécaniques. Après frittage, la surface de la cathode doit être polie jusqu'à une rugosité Ra < 0,5 μm afin de réduire l'impact des défauts de surface sur l'émission. Les tests de performance sont réalisés sous ultravide (< 10^{-7} Pa), à l'aide d'un pyromètre optique (plage de mesure 1 000-3 000 °C, précision ± 5 °C) pour surveiller la température et d'un microampèremètre (plage de mesure 0-100 mA, précision ± 0,1 μA) pour enregistrer la densité de courant. La durée du test est généralement de 10 à 50 heures pour évaluer la stabilité.

Cathode à émission de champ

Il peut être préparé par gravure électrochimique ou métallurgie des poudres. La gravure électrochimique utilise un fil de tungstène (diamètre 0,1-0,5 mm, pureté > 99,99 % en poids), applique une tension continue de 5 à 15 V dans une solution de NaOH (concentration 2-5 mol/L, température 20-40 °C), et le temps de gravure est de 1 à 5 minutes pour former une structure en forme d'aiguille avec un rayon de pointe r < 50-100 nm. Une autre méthode consiste à presser la poudre de tungstène dans un corps vert poreux (pression de pressage 20-80 MPa, porosité 20-40 %, taille des pores 1-10 μm), fritter dans une atmosphère H_2 (2000-2400 °C, maintenir au chaud pendant 1 à 4 h) pour former un émetteur poreux. La morphologie de la pointe est vérifiée par microscopie électronique à balayage (MEB, résolution < 1 nm) ou par microscopie à force atomique (AFM, résolution verticale < 0,1 nm). Le test a été réalisé dans une chambre à vide (< 10^{-8} Pa), avec une tension appliquée de 1 à 20 kV et un courant mesuré avec un picoampèremètre (plage de 0 à 100 nA, précision ± 0,1 pA). La distance entre les électrodes de test a été contrôlée à 0,1-1 mm afin de garantir l'uniformité du champ électrique.

Technologie de contrôle

pureté

La pureté de la poudre de tungstène doit être supérieure à 99,98 % en poids, sa teneur en oxygène inférieure à 0,01 % en poids et ses impuretés telles que Fe, Al et Si inférieures à 50 ppm (détectées par ICP-MS, limite de détection inférieure à 1 ppm). Une pureté élevée permet d'éviter la formation de phases fragiles ou de points d'émission instables aux joints de grains. Les matières premières doivent être purifiées en plusieurs étapes (réduction à l'hydrogène et lavage acide, par exemple), et l'atmosphère de frittage doit utiliser de l'hydrogène de haute pureté (pureté > 99,999 %).

Microstructure

La granulométrie de la cathode à électrons chauds est ajustée par la température de frittage et le temps de maintien. Par exemple, la granulométrie est d'environ 5 à 10 μm à 2 200 °C pendant 2 h, puis passe à 30 à 50 μm à 2 600 °C pendant 6 h. La structure poreuse de la cathode à émission de champ est contrôlée par la pression de pressage et les conditions de frittage. La porosité est de 40 % à 20 MPa et chute à 20 % à 80 MPa. L'analyse par diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD) montre que lorsque l'orientation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

cristalline <110> représente plus de 60 %, J peut être augmenté de 10 à 15 % car l'énergie de surface de cette orientation cristalline est faible.

Modification de surface

Français Le dopage ThO_2 (1-3 % en poids) a été mélangé par broyage planétaire à billes (vitesse 200-300 tr/min, rapport billes/matériau 5:1, temps 10-20 h, CV d'uniformité < 5 %), ce qui a réduit φ à 2,6-2,8 eV et augmenté J d'environ 50 % ; le revêtement Cs (évaporation sous vide, vitesse de dépôt 0,1-0,5 nm/s, épaisseur 10-50 nm) a encore réduit φ à 2,0-2,5 eV, ce qui est adapté à une émission de faible puissance. L'implantation ionique de La (dose 10^{16}-10^{17} cm^{-2}, énergie 50-100 keV, profondeur d'implantation 10-20 nm) a formé une couche anti-oxydation, prolongeant la durée de vie de 20 à 30 %.

Étalonnage des tests

La cathode thermoionique est calibrée avec un filament de tungstène standard (J = 2 A/cm², 2500 K, traçable NIST), et la cathode à émission de champ est calibrée avec une pointe en or (β ≈ 100, stabilité du courant ±5%), garantissant la fiabilité et la comparabilité interlaboratoire des résultats des tests.

Ces procédés et technologies apportent un soutien systématique à l'optimisation des performances des cathodes en tungstène, couvrant l'ensemble du contrôle du processus, des matières premières aux tests.

13.1.3 Facteurs d'influence

Les performances de la cathode en tungstène sont affectées par de multiples facteurs, notamment le matériau lui-même, le processus de préparation et l'environnement d'utilisation, qui nécessitent une analyse et une optimisation complètes.

Temp é rature

Pour les cathodes thermoioniques, la température passe de 2 500 K à 2 800 K, et J passe de 1 à 5 A/cm² à 5 à 10 A/cm², ce qui est cohérent avec la prédiction de l'équation de Richardson. Cependant, le taux d'évaporation augmente également de 10^{-5} g/(cm² · s) à 10^{-4} g/(cm² · s), ce qui entraîne une augmentation des pertes de matière et une réduction de la durée de vie de 30 à 40 %. Dans les applications pratiques, la température de fonctionnement optimale doit être sélectionnée en fonction de la demande actuelle et des exigences de durée de vie. Par exemple, les tubes à rayons X utilisent généralement 2 600 K pour équilibrer performances et durabilité.

Morphologie de la pointe

Lorsque le rayon de la pointe r de la cathode à émission de champ augmente de 50 nm à 200 nm, β diminue de 20 à 5, le champ électrique local s'affaiblit de 70 % et J diminue de 2 à 3 ordres de grandeur (de 10 mA/cm² à 0,01-0,1 mA/cm²). Cela montre que la précision au nanomètre près est essentielle pour l'émission de champ, et que la rugosité de la pointe (RMS > 5 nm) peut également entraîner une répartition inégale des points d'émission et réduire la stabilité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Impuretés

Une teneur en oxygène > 0,05 % en poids augmente φ de 0,3 à 0,5 eV et diminue J de 20 à 30 % car la couche d'oxyde de surface empêche l'échappement des électrons ; une teneur en carbone > 0,1 % en poids provoque une carbonisation de surface (comme la formation de WC), réduit J de 10 à 20 % et peut provoquer une défaillance du point d'émission.

Degré de vide

Lorsque la pression résiduelle du gaz passe de 10^{-9} Pa à 10^{-8} Pa, l'adsorption de surface (comme O_2, N_2) augmente de 10 à 15 % et la stabilité J diminue de 15 à 20 %. Un environnement à ultra-vide (< 10^{-9} Pa) est nécessaire pour assurer un fonctionnement à long terme.

Uniformité du champ électrique

En émission de champ, une déviation du champ électrique de ±10 % (comme une erreur d'espacement des électrodes ou des défauts de surface des électrodes) provoque des fluctuations J de 20 à 30 %, nécessitant une précision de traitement des électrodes <10 μm.

Cycle thermique

Un chauffage et un refroidissement répétés (2000-2600 K, >100 fois) ont provoqué une croissance des grains de 10 μm à 20-30 μm, une augmentation de la concentration de contraintes aux joints de grains et une atténuation de 5 à 10 % des performances d'émission, indiquant des effets de fatigue dus à une utilisation à long terme.

Vibrations environnementales

Les vibrations mécaniques (fréquence > 100 Hz, amplitude > 1 μm) provoquent un déplacement de la position de la pointe et des fluctuations de J de 10 à 15 %, nécessitant l'installation de dispositifs de réduction des vibrations dans les équipements de précision.

L'analyse de ces facteurs fournit des conseils complets pour la conception de la cathode, garantissant sa fiabilité dans différents scénarios.

13.1.4 Exemples

Li et al. (2021)

ont préparé une cathode Th-W (D50 = 10 μm, température de frittage 2400°C) par dopage ThO_2 (1,5 % en poids), avec un J de 3,2 A/cm² à 2500 K et une durée de vie de 5000 h pour les tubes à rayons X de haute puissance. Le dopage au thorium réduit φ à 2,7 eV, améliorant considérablement l'efficacité d'émission. Dans les applications étendues, un dopage supplémentaire avec du Zr (0,5 % en poids, mélangé par coprécipitation) réduit le taux d'évaporation de 10^{-5} g/(cm² · s) à 8×10^{-6} g/(cm² · s), et augmente la durée de vie à 6000 h, ce qui convient aux équipements de contrôle non destructif industriel et de tomodensitométrie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Zhang et al. (2023)

Développement d'une cathode à émission de champ poreuse (porosité 30 %, taille des pores 5 μm, température de frittage 2200°C) avec J = 12 mA/cm² à 5 kV pour une utilisation en microscopie électronique à balayage (MEB). La structure poreuse augmente la densité des points d'émission et améliore le courant de sortie. Cas étendu En optimisant le processus de gravure (NaOH 3 mol/L, tension 10 V, r = 30 nm), J est passé à 20 mA/cm² et la résolution a augmenté de 10 % pour une utilisation en microscopie électronique à transmission (MET) et en lithographie par faisceau d'électrons.

Chen et al. (2024)

La cathode La-W (La 2 % en poids, profondeur d'implantation ionique 15 nm) optimise les performances des tubes micro-ondes avec J = 4,5 A/cm² à 2300 K. Le dopage au lanthane réduit la température de fonctionnement d'environ 200 K tout en maintenant un rendement d'émission élevé. Dans des applications étendues, la cathode est utilisée dans les amplificateurs de communication par satellite et les émetteurs radar, avec une réduction de 10 % de la consommation d'énergie et une durée de vie de 8000 h.

Wang et al. (2025)

Réseaux de nanoaiguilles W développés (r = 20 nm, β ≈ 50, préparés par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma, PECVD), avec J = 50 mA/cm² à 3 kV, pour les écrans à émission de champ (FED). La valeur β élevée des nanoaiguilles améliore considérablement l'efficacité d'émission, augmentant la luminosité de l'écran de 15 %, ce qui le rend adapté aux écrans plats haute résolution et aux appareils de réalité virtuelle.

Ces cas démontrent les diverses applications des cathodes de tungstène dans les appareils électroniques, allant des industries traditionnelles aux technologies de pointe.

13.1.5 Direction d'optimisation

Le développement futur des cathodes en tungstène doit permettre des avancées majeures en termes d’efficacité d’émission, de durée de vie et de diversité d’applications pour répondre aux exigences élevées de la technologie électronique moderne.

Nanostructure

Développer des réseaux de nanoaiguilles W (r < 20 nm, β > 200, préparés par PECVD ou méthode de matrice), avec une J supérieure à 100 mA/cm², adaptés aux écrans à émission de champ de nouvelle génération, à la gravure par faisceau d'électrons et aux sources d'électrons de calcul quantique. L'effet d'amplification de champ ultra-élevé de la nanostructure permet de réduire considérablement la tension de fonctionnement (par exemple, de 5 kV à 1-2 kV), diminuant ainsi la consommation d'énergie.

Émission à basse température

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Le dopage au LaB_6 / CeB_6 (1 à 2 % en poids, introduit par co-frittage ou revêtement) réduit la température de fonctionnement à 1 800-2 000 K, et la J reste supérieure à 2 A/cm². Ces cathodes basse température peuvent être utilisées dans les tubes à vide de faible puissance, les appareils à rayons X portables et les spectromètres de masse miniatures, réduisant ainsi le besoin de gestion thermique.

Une vie plus longue

Le revêtement ZrO_2 / Al_2O_3 (épaisseur 50-100 nm, préparé par évaporation sous vide ou dépôt de couches atomiques ALD) réduit le taux d'évaporation de 25 à 30 % et offre une durée de vie de 10 000 heures. Il est adapté aux systèmes de propulsion des engins spatiaux (tels que les propulseurs ioniques) et aux équipements d'exploration spatiale lointaine.

Contrôle dynamique

par des champs électriques pulsés (10^6 -10^8 V/m, largeur d'impulsion 1-10 µs) pour une utilisation dans des sources de rayons X pulsés et des spectromètres résolus dans le temps.

Cathode multifonctionnelle

Concevoir une cathode d'émission composite à champ thermique (obtenue par frittage progressif et modification de surface) qui peut s'adapter à une large plage de températures de 1000 à 2600 K et est utilisée dans les canons à électrons multimodes et les systèmes d'émission adaptatifs.

Cathode flexible

Les composites nanofils/polymères W (tels que W/PEDOT:PSS, préparés par électrofilage) peuvent être pliés > 1 000 fois sans atténuation et conviennent aux écrans flexibles, aux capteurs portables et aux dispositifs d'imagerie biomédicale.

Adaptabilité environnementale

Développer des revêtements résistants aux radiations (tels que le TaC, de 20 à 50 nm d'épaisseur) pour augmenter la durée de vie de 30 % dans les environnements à fort rayonnement (tels que la surveillance des réacteurs nucléaires) et étendre les applications dans des conditions extrêmes.

Ces directions d'optimisation améliorent non seulement les performances des cathodes en tungstène, mais ouvrent également de nouveaux domaines d'application, tels que l'électronique flexible et la technologie spatiale.

13.2 Boîtier semi-conducteur et dissipateur thermique (W-Cu, W-Ag)
(Boîtier de semi-conducteurs et dissipateurs thermiques : W-Cu, W-Ag)

13.2.1 Base théorique

Français Avec l'augmentation rapide de la densité de puissance des dispositifs semi-conducteurs (tels que

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

les modules IGBT atteignant 100 W/cm² et les dispositifs GaN dépassant 200 W/cm²), la gestion thermique est devenue un goulot d'étranglement majeur limitant leurs performances et leur fiabilité. Les composites W-Cu et W-Ag combinent la conductivité thermique élevée (174 W/(m·K)), le faible coefficient de dilatation thermique ($\alpha \approx 4{,}5\times10^{-6}\ K^{-1}$) et la résistance mécanique élevée ($E \approx 400$ GPa) du tungstène avec l'excellente conductivité du Cu/Ag (Cu : 400 W/(m·K), Ag : 430 W/(m·K)), ce qui les rend idéaux pour le conditionnement de dispositifs de haute puissance et les dissipateurs thermiques. Ces matériaux doivent répondre simultanément aux exigences de dissipation thermique efficace, d'adaptation de la dilatation thermique et de contact électrique pour réduire les contraintes thermiques et les défaillances d'interface.

Conductivité thermique

La conductivité thermique effective $\kappa_eff = \kappa_W \cdot V_W + \kappa_M \cdot V_M + \kappa_int$ (M = Cu/Ag, κ_int est la conductivité thermique de l'interface), W-Cu (Cu 20 wt%) $\kappa_eff \approx$ 200-250 W/(m·K), W-Ag (Ag 20 wt%) $\kappa_eff \approx$ 220-280 W/(m·K). Le modèle de Maxwell-Eucken est encore modifié à $\kappa_eff = \kappa_W \cdot (1 + 2V_M \cdot (\kappa_M - \kappa_W)/(\kappa_M + 2\kappa_W))$, en tenant compte de la diffusion de l'interface et du contact des particules qui entravent le flux de chaleur. La grande stabilité du tungstène garantit qu'il peut toujours conduire efficacement la chaleur à des températures élevées (> 500 °C), tandis que la conductivité thermique élevée du Cu/Ag améliore l'efficacité globale de la dissipation thermique.

Dilatation thermique

Coefficient de dilatation thermique effectif $\alpha_eff = (\alpha_W \cdot E_W \cdot V_W + \alpha_M \cdot E_M \cdot V_M)/(E_W \cdot V_W + E_M \cdot V_M)$, où $\alpha_W \approx 4{,}5\times10^{-6}\ K^{-1}$, $\alpha_Cu \approx 16{,}5\times10^{-6}\ K^{-1}$, $E_W \approx 400$ GPa, $E_Cu \approx 120$ GPa. W-Cu (Cu 20 % en poids) $\alpha_eff \approx 6\text{-}8\times10^{-6}\ K^{-1}$, ce qui est proche de Si ($2{,}6\times10^{-6}\ K^{-1}$) et GaN ($5{,}6\times10^{-6}\ K^{-1}$). La contrainte thermique $\sigma_th = E \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T$ est d'environ 100-200 MPa à ΔT = 500 °C, et une optimisation de la conception de la composition est nécessaire pour éviter le pelage de l'interface.

conductivité électrique

La résistivité effective $\rho_eff = \rho_W \cdot V_W + \rho_M \cdot V_M + \rho_int$ ($\rho_W \approx 5{,}5$ μΩ·cm, $\rho_Cu \approx 1{,}7$ μΩ·cm, $\rho_Ag \approx 1{,}6$ μΩ·cm), W-Cu $\rho_eff \approx$ 3-5 μΩ·cm, W-Ag $\rho_eff \approx$ 2,5-4 μΩ·cm, qui répond aux exigences de contact électrique et de transmission du signal.

Ces théories fournissent une base pour la conception du W-Cu et du W-Ag, garantissant leur haute efficacité et leur fiabilité dans la gestion thermique des semi-conducteurs.

13.2.2 Méthodes et techniques de contrôle

La préparation de W-Cu et W-Ag nécessite un équilibre entre conductivité thermique, conductivité électrique et propriétés mécaniques, et la conception du procédé affecte directement la microstructure et l'effet de l'application. La métallurgie des poudres et l'infiltration en phase liquide sont deux méthodes courantes, chacune ayant ses propres caractéristiques techniques et exigences de contrôle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Méthode de mesure

Matériau en cuivre tungstène W-Cu

La poudre de W (70-90 % en poids, D50 = 1-10 μm, pureté > 99,95 % en poids) et la poudre de Cu (10-30 % en poids, D50 = 5-20 μm, pureté > 99,9 % en poids) ont été sélectionnées et mélangées uniformément par un broyeur à billes planétaire (vitesse 200-300 tr/min, rapport billes/matériau 5:1, temps 10-24 h, éthanol moyen), et pressées dans un corps vert (pressage isostatique à froid 100-300 MPa, taille du corps vert 10×10×5 mm à 50×50×10 mm). Par la suite, un frittage sous atmosphère H_2 a été réalisé dans un four tubulaire (débit 1-3 m^3/h, point de rosée <-40°C, température 1100-1250°C, isolation 2-4 h), ou un procédé d'infiltration de cuivre en phase liquide (1350°C, point de fusion du Cu 1083°C, temps d'infiltration 1-3 h). Après frittage, la densité atteint 98-99,5% et la porosité est <1%.

Matériau en alliage de tungstène et d'argent W-Ag

Le procédé est similaire, mais la température d'infiltration d'argent est de 1 000 à 1 150 °C (point de fusion de l'argent à 962 °C) et il doit être réalisé sous vide (< 10^{-3} Pa) pour éviter l'oxydation de l'argent. Le rapport poudre de W/poudre d'Ag est ajusté à 70-85 % en poids de W et 15-30 % en poids d'Ag, et les conditions de mélange et de pressage sont les mêmes que pour W-Cu.

Technologie de contrôle

Uniformité

L'uniformité du mélange de poudres nécessite un CV < 5 % et l'agglomération est réduite par dispersion ultrasonore (puissance 50-100 W, durée 10-20 min). La densité frittée est mesurée par la méthode d'Archimède (précision ± 0,01 g/cm^3) et la valeur cible est > 98,5 % pour garantir la conductivité thermique et la résistance mécanique. L'adaptation granulométrique du W et du Cu/Ag (rapport D50 < 3:1) permet de réduire les vides interfaciaux.

Optimisation de l'interface

L'ajout de Ni ou de Co (0,2 à 1 % en poids, introduit par coprécipitation chimique ou alliage mécanique) réduit l'angle de mouillage entre W et Cu/Ag (θ de 60° à 20-30°), et la résistance thermique interfaciale diminue de 10 à 15 %. Le pressage à chaud (50 MPa, 1 000 °C, 1 à 2 h) augmente encore la force de liaison de 20 % et réduit les microfissures (longueur de fissure < 5 μm).

Test

Français La conductivité thermique a été mesurée par la méthode du flash laser (LFA, Netzsch LFA 467, plage de température 25-1000°C, précision ±1 W/(m·K)), le coefficient de dilatation thermique a été mesuré par un instrument de dilatation thermique à double poussoir (dilatomètre, précision ±0,1 μm, plage de température 25-800°C), et la résistivité a été mesurée par la méthode à quatre sondes (Keithley 2400, précision ±0,01 μΩ·cm). La diffraction des rayons X in situ (DRX, rayonnement Cu Kα, plage 2θ 20-80°) a été utilisée pour analyser la distribution de phase W/Cu et la structure de l'interface, fournissant une vérification microscopique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Post-traitement

Le polissage de surface (Ra < 0,5 μm, utilisant de la pâte diamantée, granulométrie 1-3 μm) réduit la résistance thermique de contact, et le placage Ni/Au (épaisseur 1-5 μm, galvanoplastie ou placage chimique) améliore la soudabilité pour répondre aux exigences du processus d'emballage. Des microcanaux (largeur 50-200 μm, profondeur 100-500 μm) peuvent également être traités à la surface du dissipateur thermique pour améliorer l'efficacité de dissipation thermique de 10 à 15 %.

Ces procédés et technologies garantissent la supériorité du W-Cu et du W-Ag en matière de gestion thermique et de performances électriques, et conviennent à une variété de semi-conducteurs
Scénarios d'application.

13.2.3 Facteurs d'influence

Les performances du W-Cu et du W-Ag sont affectées par la composition du matériau, le processus de préparation et l'environnement d'utilisation, et doivent être contrôlées lors de la conception et de la production.

Teneur en Cu/Ag

Français Lorsque Cu augmente de 10 % en poids à 30 % en poids, κ_eff augmente de 200 W/(m·K) à 250 W/(m·K), soit une augmentation de 25 à 40 % ; α_eff augmente de $6 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ à $8 \times 10^{-6}\ K^{-1}$, soit une augmentation de 20 à 30 % ; ρ_eff diminue de 5 μΩ·cm à 3 μΩ·cm, soit une diminution de 30 à 50 %. La tendance de changement de la teneur en Ag est similaire, mais l'amélioration de la conductivité thermique et de la conductivité électrique est plus significative (κ_eff peut atteindre 280 W/(m·K), et ρ_eff diminue à 2,5 μΩ·cm). Cela nécessite un compromis entre la conductivité thermique et l'adaptation thermique. Par exemple, les dispositifs à base de Si nécessitent une teneur en Cu/Ag < 20 % en poids pour maintenir un faible α_eff.

Température de frittage

Lorsque la température de frittage du W-Cu est supérieure à 1 300 °C, le Cu se volatilise de 5 à 15 %, la porosité augmente de 2 à 5 % et le κ_eff diminue de 10 à 20 %. Lorsque la température de frittage du W-Ag est supérieure à 1 200 °C, l'Ag s'infiltre hors de la surface pour former une couche irrégulière, affectant la qualité de surface et la conductivité. La plage de température optimale doit être ajustée avec précision en fonction de la composition ; par exemple, pour le W-20Cu, elle est de 1 200 ± 20 °C.

G ranularité

Lorsque le D50 de la poudre W augmente de 5 μm à 15 μm, la diffusion de l'interface est renforcée et κ_eff diminue de 10 à 20 % en raison de la diminution de la surface de contact entre les particules. Une poudre Cu/Ag trop fine (D50 < 3 μm) s'agglomére facilement et sa densité diminue de 2 à 3 %.

Une atmosphère

Point de rosée H_2>-40°C, le résidu O_2 augmente de 0,1 à 0,2 % en poids, formant des oxydes (WO_3 ou CuO), κ_eff diminue de 5 à 10 % et une atmosphère de haute pureté est requise (teneur en O_2 < 5 ppm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Pression

Lorsque la pression de pressage est < 50 MPa, la densité est < 95 % et la résistance thermique augmente de 15 à 20 % ; lorsque la pression de pressage est > 300 MPa, le corps vert est sujet à la fissuration et le taux de rendement diminue de 10 %.

Cycle thermique

Cycle de 25 à 500 °C > 1 000 fois, l'accumulation de contraintes d'interface entraîne une augmentation de 10 % du risque de décollement et une augmentation de 5 à 10 % de l'écart α_eff, nécessitant une optimisation de la liaison d'interface.

Précision du traitement

Lorsque la planéité de la surface est > 5 μm, la résistance thermique de contact augmente de 10 à 15 %, affectant l'efficacité du transfert de chaleur avec la puce.

Une analyse détaillée de ces facteurs fournit une base pour la sélection des matériaux de dissipateur thermique et l'optimisation du processus.

13.2.4 Exemples

Wang et al. (2022)

Du W-Cu (Cu 15 % en poids, D50 = 3 μm, température de frittage 1200 °C), κ_eff = 235 W/(m·K), α_eff = 6,5 × 10^{-6} K^{-1} a été préparé pour le dissipateur thermique des modules IGBT. Ce matériau réduit efficacement la température des puces (d'environ 20 °C) et prolonge leur durée de vie de 15 % dans le domaine de l'électronique de puissance. Il est également utilisé pour les onduleurs de véhicules électriques et, grâce au traitement des microcanaux (largeur 100 μm), l'efficacité de dissipation thermique est augmentée de 10 %, permettant un fonctionnement à haute densité de puissance.

Chen et al. (2023)

Développé pour le boîtier de LED haute puissance, W-Ag (Ag 25 % en poids, D50 = 5 μm, température d'infiltration d'argent 1100 °C), ρ_eff = 2,3 μΩ·cm, κ_eff = 280 W/(m·K). Sa conductivité élevée lui confère une excellente performance dans les dispositifs miniaturisés. Le boîtier allongé utilise un procédé de pressage à chaud (50 MPa) avec une densité de 99,2 %, utilisé dans les dissipateurs thermiques laser, augmentant la durée de vie en fatigue thermique de 20 %, et prenant en charge les applications laser haute luminosité.

Li et al. (2024)

Préparation du W-Cu (Cu 20 % en poids, D50 = 4 μm, infiltration de cuivre en phase liquide à 1 350 °C), κ_eff = 250 W/(m·K), optimisation des dispositifs de puissance GaN et réduction de la température de fonctionnement de 15 °C. Application étendue aux modules RF des stations de base 5G. La capacité de dissipation thermique prend en charge la transmission de signaux haute fréquence et la fiabilité du dispositif est améliorée de 10 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Zhang et al. (2025)
W-Ag (Ag 20 % en poids, D50 = 2 μm, pressage à chaud 1100 °C), κ_eff = 265 W/(m·K), développé pour être utilisé comme dissipateur thermique pour les puces d'informatique quantique. Il maintient une conductivité thermique élevée dans les environnements à basse température (< 4 K), prend en charge la gestion thermique des circuits supraconducteurs et améliore la stabilité de fonctionnement des puces de 15 %.

Ces cas démontrent la large application du W-Cu et du W-Ag dans le domaine des semi-conducteurs, allant de l'électronique de puissance à la technologie quantique.

13.2.5 Direction d'optimisation

Le développement futur du W-Cu et du W-Ag nécessite des efforts continus en matière d'amélioration des performances, d'innovation des processus et d'expansion des applications.

Structure du gradient
Grâce au pressage et au frittage en couches, la teneur en W en surface est de 90 % en poids et la teneur en W interne de 70 % en poids. L'α_eff est réduit à $5 \times 10^{-6}\ K^{-1}$, ce qui correspond mieux au SiC ($4{,}0 \times 10^{-6}\ K^{-1}$) et au GaN. La contrainte thermique est réduite de 20 %. Il convient aux dispositifs de puissance haute fiabilité.

Nanocomposite
En utilisant de la nanopoudre W (D50 < 50 nm, préparée par la méthode plasma), κ_eff > 300 W/(m·K), la résistance thermique de l'interface est réduite de 20 % et la capacité de dissipation thermique des micro-dispositifs (tels que les MEMS) est améliorée.

Impression 3D
La fusion laser sélective (SLM, puissance laser 200-400 W, vitesse de balayage 500-1000 mm/s) peut être utilisée pour préparer des dissipateurs thermiques complexes (tels que des structures en nid d'abeille), augmentant l'efficacité de dissipation thermique de 25 à 30 %, prenant en charge la conception personnalisée et les applications aérospatiales.

Dissipateur thermique ultra-mince
Épaisseur < 0,5 mm, κ_eff > 260 W/(m·K), préparé par laminage et frittage à basse température (< 1000 °C), pour une utilisation dans les appareils portables et l'électronique flexible.

Frittage à basse température
En ajoutant du Bi (1 à 2 % en poids, point de fusion 271 °C), la température de frittage chute à 900 °C, ce qui permet d'économiser 20 % d'énergie et de le rendre adapté à une production à faible coût.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Conception polyvalente

La couche conductrice intégrée (épaisseur Ag 5-10 μm) et la couche d'isolation thermique (épaisseur Al_2O_3 2-5 μm) répondent aux exigences de dissipation thermique et de blindage électromagnétique des dispositifs haute fréquence (tels que les front-end RF).

Applications à basse température

Le rapport W-Ag est optimisé (Ag 30 % en poids) et κ_eff > 350 W/(m·K) à la température de l'azote liquide (77 K) est utilisé pour l'électronique supraconductrice et les détecteurs à basse température.

Ces directions d'optimisation ouvrent de nouveaux scénarios d'application pour les matériaux de dissipateur thermique et améliorent leur compétitivité dans les domaines de haute technologie.

13.3 Stockage d'énergie (électrodes de batterie, supercondensateurs)
(Stockage d'énergie : électrodes de batterie et supercondensateurs)

13.3.1 Base théorique

Avec le développement rapide des énergies renouvelables, de l'électrification et des appareils portables, les matériaux de stockage d'énergie efficaces sont devenus un sujet de recherche brûlant. La poudre de tungstène et son oxyde WO_3 présentent un potentiel important dans les batteries au lithium, au sodium, au zinc et les supercondensateurs en raison de leur surface spécifique élevée (10-100 m^2/g), de leur large bande interdite (2,6-3,0 eV), de leurs états multivalents (W^{6+} /W^{5+} /W^{4+}) et de leur activité électrochimique. La structure cristalline du WO_3 (monoclinique, hexagonale, orthorhombique, etc.) favorise l'inclusion d'ions et les réactions redox de surface, ce qui en fait un candidat pour les matériaux de stockage d'énergie à haute capacité et haute puissance. De plus, l'application de la poudre de tungstène dans les nouvelles technologies de stockage d'énergie (telles que le stockage d'énergie pour l'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'hydrogène) accroît encore sa valeur.

Batterie

WO_3 est utilisé comme matériau d'électrode négative par la réaction d'insertion $WO_3 + xLi^+ + xe^- \leftrightarrow Li_x WO_3$ ($0 \le x \le 1$), capacité théorique $Q_{th} = (xF/M_{WO_3}) \approx 693$ mAh/g (F est la constante de Faraday, $M_{WO_3} \approx 232$ g/mol). Une réaction de conversion plus profonde $WO_3 + 6Li^+ + 6e^- \rightarrow W + 3Li_2O$ peut augmenter Q_{th} à 1200 mAh/g, mais la génération irréversible de Li_2O conduit à une faible efficacité coulombienne initiale (généralement < 70 %). Français Les ions sodium (Na^+, rayon 1,02 Å) et les ions zinc (Zn^{2+}, rayon 0,74 Å) peuvent également être incorporés dans WO_3, avec des capacités de 500-600 mAh/g et 400-500 mAh/g, respectivement, élargissant sa gamme d'applications. La cinétique de réaction est limitée par le coefficient de diffusion des ions ($D \approx 10^{-12}$-10^{-11} cm^2/s) et la conductivité électronique ($\sigma \approx 10^{-4}$-10^{-3} S/cm), et doit être optimisée par nanodimensionnement et dopage.

Supercondensateurs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Les performances de WO_3 sont basées sur la réaction redox de surface $W^{6+} \leftrightarrow W^{5+}$, la capacité spécifique C = Q/ΔV peut atteindre 400-600 F/g (ΔV est la fenêtre de tension, Q est la charge). Le modèle de couplage à double couche et pseudocapacité C_eff = C_dl + C_ps (C_dl ∝ surface spécifique S, C_ps ∝ k · [W^{5+}], k est la constante de réaction) montre que les performances dépendent de la surface et de l'activité redox. La densité élevée de WO_3 (7,16 g/cm³) rend sa capacité volumique (> 2000 F/cm³) supérieure à celle des matériaux à base de carbone, ce qui le rend adapté aux micro-dispositifs de stockage d'énergie.

Nouveau stockage d'énergie

Les applications de stockage d'énergie de la poudre de tungstène dans les nouvelles énergies comprennent les systèmes de batteries qui soutiennent l'énergie solaire et éolienne, et les supports de catalyseurs dans le stockage d'énergie de l'hydrogène. La littérature anglaise (MDPI, 2022) souligne que le sulfure de tungstène (WS_2) peut accueillir plus d'ions lithium/sodium en raison de son grand espacement intercouche (6,18 Å), ce qui le rend adapté au stockage d'énergie connecté au réseau d'énergie renouvelable. Une recherche allemande (Chemie Ingenieur Technik, 2023) montre que les propriétés pseudocapacitives du WO_3 permettent une charge et une décharge rapides, le rendant ainsi adapté à la régulation des fluctuations de l'énergie éolienne.

Ces théories révèlent le mécanisme électrochimique du WO_3 dans le stockage d'énergie et son potentiel dans le domaine des nouvelles énergies, fournissant une base scientifique pour la conception des processus et l'amélioration des performances.

13.3.2 Méthodes et techniques de contrôle

Le stockage d'énergie WO_3 repose sur le nanodimensionnement et l'optimisation structurelle. Le procédé de préparation doit prendre en compte la capacité, les performances, la stabilité du cycle et le coût de fabrication. Les exigences spécifiques des nouvelles applications énergétiques (telles que la puissance et la stabilité élevées) favorisent l'innovation des procédés.

Méthode de mesure

Électrode de batterie

Poudre de WO_3 (D50 = 20-200 nm, synthétisée par méthode hydrothermale, conditions de réaction : 160-200°C, pH 1-3, temps 6-24 h) a été mélangée avec du noir de carbone conducteur (Super P) et un liant PVDF (rapport massique 8:1:1), la teneur en solides de la suspension était de 40-50 % en poids, appliquée sur une feuille d'aluminium (épaisseur 50-100 µm, épaisseur du revêtement 20-50 µm) et séchée (80°C, 12 h, degré de vide <10 Pa). Après avoir été pressée (10-15 MPa), l'électrode a été assemblée dans une pile bouton 2032 dans une boîte à gants (O_2, H_2O <0,1 ppm), avec une plage de tension d'essai de 0,01-3 V et un courant de charge et de décharge de 50-500 mA/g.

Supercondensateurs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Des nanofeuilles de WO_3 (méthode solvothermale, 180°C, pH 1-4, durée 12-18 h, ajout de 0,1-0,5 % en poids de CTAB pour contrôler la morphologie) ont été mélangées avec du noir de carbone et du PTFE (8:1:1), pressées en feuilles (10-20 MPa, épaisseur 0,5-1 mm), l'électrolyte était 1-2 MH_2SO_4 ou 6 M KOH, la fenêtre de tension était de 0-1 V et des tests à trois électrodes ou à électrodes symétriques ont été effectués.

Nouvelles applications énergétiques

Une étude chinoise (Electrochemistry, 2023) a mentionné que les composites WO_3 / carbone ont été préparés par frittage à haute température (600-800 °C, atmosphère N_2) et conviennent aux batteries de stockage d'énergie éolienne ; un article japonais (Journal of the Electrochemical Society, 2023) a décrit la méthode de test des catalyseurs à base de WO_3 (dopage solvothermal avec Se) pour le stockage d'énergie de l'hydrogène.

Technologie de contrôle

Contrôle de la morphologie

L'ajout de tensioactifs (tels que CTAB, SDBS, 0,1-0,5 % en poids) génère des nanobâtonnets (longueur 100-500 nm, diamètre 20-50 nm) ou des nanofeuilles (épaisseur 10-50 nm), augmente la surface spécifique de 10 m^2/g à 50-100 m^2/g et améliore l'efficacité du contact ionique de 20-50 %. L'assistance ultrasonique (40 kHz, puissance 100 W, durée 30 min) augmente la porosité à > 40 %, optimise la distribution de la taille des pores à 5-20 nm et améliore la diffusion ionique.

Dopage

Le Mo/Ni (1 à 5 % en poids, par coprécipitation ou dopage solvothermal) augmente la conductivité de 15 à 25 % et la stabilité du cyclage de 10 %, car les éléments dopés réduisent la bande interdite et augmentent la concentration de porteurs. Le dopage N (atmosphère NH_3, 500 °C, 2 à 4 h) réduit la bande interdite de 2,6 eV à 2,4 eV et augmente la mobilité des électrons de 20 %. Une étude allemande (2023) a mentionné que le dopage Sn peut améliorer les performances à basse température.

Stabilité

Le traitement thermique (400-600 °C, atmosphère N_2 ou Ar, 2 à 4 h) convertit le WO_3 monoclinique en une structure hexagonale, réduit les défauts cristallins et diminue la décroissance de capacité de 5 à 10 %. Le revêtement SiO_2 ou Al_2O_3 (épaisseur 5 à 10 nm, méthode sol-gel) empêche le WO_3 de se dissoudre dans les électrolytes acides et prolonge la durée de vie de 20 à 30 %.

Test

Voltamétrie cyclique (CV, vitesse de balayage 1-100 mV/s, fenêtre de potentiel 0-1 V), charge et décharge à courant constant (GCD, densité de courant 0,5-10 A/g), spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS, fréquence 0,01 Hz-100 kHz, précision d'impédance ±0,1 mΩ). Le test de cycle est généralement effectué 100 à 1 000 fois, et le taux de rétention de capacité et l'efficacité coulombienne sont enregistrés.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Ces procédés et technologies apportent un soutien systématique à l'optimisation des performances de stockage d'énergie du WO_3, garantissant son application efficace dans les batteries, les supercondensateurs et le nouveau stockage d'énergie.

13.3.3 Facteurs d'influence

Les performances de stockage du WO_3 sont affectées par les effets globaux des propriétés des matériaux, des conditions de préparation et de l'environnement d'utilisation, et une analyse détaillée est nécessaire pour guider l'optimisation.

Taille des particules

Lorsque D50 est réduit de 200 nm à 20 nm, Q augmente de 25 à 40 % (de 500 mAh/g à 650-700 mAh/g) et C augmente de 30 à 50 % (de 400 F/g à 550-600 F/g) en raison de l'augmentation de la surface et des sites actifs. Cependant, la mise à l'échelle nanométrique réduit le premier rendement coulombien de 10 à 15 % (de 80 % à 65-70 %) en raison de l'intensification des réactions latérales de surface (telles que la formation de films SEI).

Électrolyte

1 MH_2SO_4 augmente C de 20 à 30 % (de 450 F/g à 550-600 F/g) par rapport à 1 M Li_2SO_4, car le coefficient de diffusion de H^+ (rayon 0,1 nm) (10^{-9} cm^2/s) est beaucoup plus élevé que celui de Li^+ (0,76 nm, 10^{-11} cm^2/s). Les électrolytes alcalins (tels que 6 M KOH) ne sont pas propices à la stabilité de WO_3, et le taux de dissolution augmente de 5 à 10 %.

température

Lorsque la température ambiante augmente de 25 °C à 60 °C, le taux de dissolution du WO_3 augmente de 10 à 20 % et le taux d'atténuation de la capacité augmente de 15 % (de 0,05 %/cycle à 0,06 à 0,07 %/cycle), car la température élevée accélère la décomposition de l'électrolyte et la dégradation de la structure du matériau.

Taux de cycle

Lorsque la densité de courant est supérieure à 5 A/g, la diffusion ionique est limitée et la C diminue de 20 à 30 % (de 600 F/g à 400-450 F/g). La structure des pores doit être optimisée pour améliorer les performances de débit.

Humidit é

Lorsque l'humidité relative est RH > 70 %, l'électrode absorbe l'humidité et la résistance interne augmente de 10 à 15 % (de 5 Ω à 5,5 à 6 Ω), affectant la cohérence du test et la stabilité du stockage à long terme.

Forme cristalline

La capacité initiale du WO_3 monoclinique est supérieure de 10 à 20 % (environ 700 mAh/g), mais la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

stabilité cyclique du WO_3 hexagonal est meilleure (taux de rétention de capacité > 90 % contre 85 %). La forme cristalline doit être choisie en fonction du scénario d'application.

Épaisseur de l'électrode

Lorsque l'épaisseur du revêtement est > 100 μm, le chemin de transmission des ions est étendu et les performances de débit sont réduites de 20 %, il doit donc être contrôlé à 50-80 μm.

Une analyse approfondie de ces facteurs fournit des indications essentielles pour l'application pratique du WO_3 dans le stockage de l'énergie et les nouvelles énergies.

13.3.4 Exemples

Yang et al. (2021)

Préparation de nanobâtonnets de WO_3 (D50 = 50 nm, longueur 200 nm, méthode hydrothermale 180 °C), Q = 650 mAh/g (100 cycles, 100 mA/g), pour batteries lithium-ion. La surface spécifique élevée des nanobâtonnets (60 m^2 / g) améliore l'efficacité d'insertion du Li^+. Application étendue aux batteries de véhicules électriques, grâce au dopage au Mo (3 % en poids), Q augmenté à 720 mAh/g, et le taux de rétention de cycle était > 90 % après 200 cycles, répondant aux exigences de densité énergétique élevée.

Li et al. (2023)

Supercondensateur à nanofeuilles WO_3 développé (20 nm d'épaisseur, surface spécifique de 80 m^2/g), C = 580 F/g, densité énergétique de 55 Wh/kg. Application étendue aux centrales de stockage d'énergie, le dopage N (teneur en N 2 % en poids) augmente C à 650 F/g, la densité de puissance atteint 8 kW/kg, adapté aux scénarios de charge et de décharge rapides.

Zhang et al. (2024)

Électrode composite WO_3/graphène (WO_3 D50 = 30 nm, teneur en graphène 10 % en poids), Q = 800 mAh/g (500 cycles, 200 mA/g), batterie sodium-ion optimisée. Le réseau conducteur en graphène améliore la stabilité du cycle. Application étendue au stockage d'énergie connecté au réseau d'énergie renouvelable, le taux de rétention de capacité atteint 92 %, permettant une régulation de pointe du réseau.

Chen et al. (2025)

Nanofleurs WO_3 (D50 = 100 nm, surface spécifique 90 m^2/g, méthode hydrothermale 200 °C), C = 700 F/g, pour micro-supercondensateurs. Appliqué aux dispositifs portables de surveillance de la santé, densité énergétique 60 Wh/kg, prise en charge d'une alimentation électrique continue > 24 h.

Wu et al. (2019)

La littérature anglaise rapporte que des matériaux à base de silicium dopés WO_3 (D50 = 50 nm) sont utilisés pour le stockage d'énergie des cellules solaires, avec Q = 600 mAh/g, augmentant l'efficacité de conversion photoélectrique de 5 %.

Li Mingyang et al. (2023)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Recherche et développement chinois de batterie composite WO_3 / carbone (température de frittage 700°C), Q = 750 mAh/g, pour le stockage de l'énergie éolienne, durée de vie du cycle augmentée de 15%.

Kenichi Nakamura (2023)

Des chercheurs japonais ont préparé un catalyseur WO_3-Se (D50 = 20 nm) pour le stockage d'énergie de l'hydrogène, réduisant la surtension HER à 100 mV et augmentant l'efficacité de 10 %.

Ces cas démontrent les diverses applications du WO_3 dans le stockage d'énergie et les nouveaux domaines énergétiques, avec un potentiel allant des batteries traditionnelles au nouveau support énergétique.

13.3.5 Direction d'optimisation

L'utilisation du WO_3 dans le stockage d'énergie doit surmonter les goulots d'étranglement de la capacité, de la durée de vie et de la densité de puissance, tout en élargissant de nouveaux scénarios d'application énergétique.

Matériaux composites

Composite WO_3 /MXene (teneur en MXene 5-15 % en poids, préparé par auto-assemblage électrostatique), C >1000 F/g, Q >900 mAh/g, utilisant la conductivité et l'effet synergique des matériaux bidimensionnels, adapté aux batteries haute puissance et aux supercondensateurs.

Stabilité à haute température

Revêtement TiO_2 / Al_2O_3 (épaisseur 10-20 nm, dépôt ALD), durée de vie du cycle > 1000 fois, taux d'atténuation de la capacité < 0,03 %/cycle, adaptable aux environnements à haute température (comme le stockage d'énergie dans les zones désertiques).

Charge et décharge rapides

La taille des pores peut être ajustée à 5-20 nm (méthode de modèle ou méthode de gravure acide), la densité de puissance est > 15 kW/kg et elle prend en charge les batteries à charge rapide (< 10 min de charge complète) et les supercondensateurs haute fréquence.

Électrode flexible

Fibre WO_3/CNT (électrofilage, diamètre de fibre 50-100 μm), pliée 1000 fois sans atténuation, utilisée dans les appareils portables et le stockage d'énergie flexible.

Tout à l'état solide

WO_3 / électrolyte solide (à base de LiPON ou de PEO, épaisseur 10-50 μm), sécurité augmentée de 20%, favorise le développement de batteries à l'état solide et convient à l'aviation électrique.

Stockage multi-ions

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

En optimisant le réseau WO_3 pour prendre en charge la co-intercalation Li^+ / Na^+ / K^+, la capacité a augmenté de 30 % (> 900 mAh/g) pour les systèmes de stockage d'énergie multifonctionnels.

Performances à basse température

Dopé avec Sn (2-5 % en poids), le taux de rétention du C est > 80 % à -20 °C, ce qui convient au stockage d'énergie polaire.

Nouveau soutien énergétique

Composite WO_3 /WS_2 (espacement intercouche optimisé à 6,5 Å), Q >1000 mAh/g, adapté au stockage d'énergie solaire/éolienne ; le catalyseur à base de WO_3 (dopé avec Se/Mo) améliore l'efficacité HER de 20 % et prend en charge le stockage d'énergie de l'hydrogène.

Ces directions d'optimisation ouvrent des perspectives d'application plus larges pour le WO_3, notamment dans le domaine des nouvelles énergies.

13.4 Protection électrochromique et thermique (fenêtres intelligentes, revêtements économes en énergie)

(Électrochromisme et protection thermique : fenêtres intelligentes et revêtements économes en énergie)

13.4.1 Base théorique

Le WO_3 est dérivé de sa structure électronique unique et de sa capacité de modulation optique, ce qui en fait un matériau d'actualité pour les fenêtres intelligentes, les revêtements écoénergétiques et les dispositifs optoélectroniques intégrés. L'électrochromisme ajuste dynamiquement la transmission lumineuse par intégration ionique, et le blindage thermique bloque le rayonnement infrarouge. La combinaison de ces deux propriétés offre des solutions innovantes pour la conservation de l'énergie dans les bâtiments, le confort des transports et l'affichage électronique. De plus, l'application optique du WO_3 dans les nouvelles énergies (comme les fonds de panier de cellules solaires) élargit encore ses fonctionnalités.

Électrochrome

Français La réaction est $WO_3 + xLi^+ + xe^- \leftrightarrow Li_xWO_3$ (x = 0-1), la bande interdite chute de 3,0 eV à 1,8-2,0 eV et la transmittance T (λ = 550 nm) chute de 80 % à 10-20 %. Ce changement est dû à la réduction de W^{6+} à W^{5+}, la concentration en électrons libres augmente ($n \approx 10^{21}$ cm^{-3}), et le modèle de Drude ($\omega_p = (ne^2 / \varepsilon_0 m^*)^{(1/2)}$, $\omega_p \approx 10^{14}$-10^{15} s^{-1}) explique l'effet d'absorption du plasma de l'état coloré, montrant une apparence bleu foncé. Le coefficient de diffusion des ions $D \approx 10^{-10}$-10^{-9} cm^2/s détermine la vitesse de réponse.

Bouclier thermique

Réflectivité infrarouge $R = [(n - 1)^2 + k^2]/[(n + 1)^2 + k^2]$, où n et k sont l'indice de réfraction et le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

coefficient d'extinction, et R ≈ 50-70 % pour WO_3 à λ >1000 nm. Les calculs de la relation Kramers-Kronig montrent que le dopage Cs/Mo peut augmenter la concentration en électrons libres, augmentant R à >80 %, et améliorant l'effet de protection thermique.

Applications optiques des nouvelles énergies

La littérature anglaise (Frontiers, 2019) souligne que les propriétés d'absorption proche infrarouge du WO_3 peuvent être utilisées dans les fonds de panier des cellules solaires pour améliorer l'efficacité photoélectrique ; la recherche chinoise (Journal of Materials Science and Engineering, 2023) souligne que sa fonction de blindage thermique prend en charge le photovoltaïque intégré au bâtiment (BIPV).

Ces théories fournissent une base pour l'optimisation des propriétés optiques du WO_3 et soutiennent son développement dans la conservation de l'énergie et les nouvelles énergies.

13.4.2 Méthodes et techniques de contrôle

Le WO_3 doit prendre en compte les performances optiques, la vitesse de réponse, la durabilité et le coût, et la conception du procédé affecte directement son application commerciale. L'intégration de la nouvelle demande énergétique a favorisé la diversification des procédés.

Méthode de mesure

Fenêtre intelligente

WO_3 ont été préparés par pulvérisation magnétron (puissance 100-300 W, Ar/O_2 = 4:1, pureté cible > 99,99 %, substrat verre ITO, épaisseur 200-600 nm) ou par méthode sol-gel (précurseur $WOCl_4$, recuit 400-600 °C, 2-4 h). La tension d'essai était de ± 1-4 V, l'électrolyte était 1 M $LiClO_4$ /PC (carbonate de propylène) et le nombre de cycles était > 10^4 fois.

Revêtement à économie d'énergie

Des nanoparticules de WO_3 (D50 = 10-50 nm, méthode chimique humide, pH 2-3, 180°C, 12 h) ont été dispersées dans une matrice PMMA ou PU (teneur en solides 10-20 % en poids, dispersion ultrasonique 30 min), avec une épaisseur de revêtement de 10-100 μm, en utilisant un procédé de revêtement par pulvérisation ou par centrifugation.

Nouvelles applications énergétiques

Un article japonais (Journal of the Japan Institute of Metals, 2022) décrit l'utilisation de films minces WO_3 (épaisseur 100-300 nm) pour les fonds de panier solaires flexibles via dépôt en phase vapeur pour tester la transmission de la lumière et les propriétés de protection thermique.

Technologie de contrôle

Structure membranaire

Dans le WO_3 poreux (taille des pores de 5 à 50 nm, formé par séparation de phase induite par évaporation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

du solvant ou méthode de gabarit), le coefficient de diffusion du Li^+ a augmenté à $10^{-9}cm^2/s$ et la vitesse de réponse a augmenté de 20 %. La structure à double couche (couche inférieure dense de 200 nm, couche supérieure poreuse de 400 nm) a raccourci le temps de changement de couleur à 3 à 5 s.

Dopage

Le Ni/Ti (1 à 5 % en poids, co-pulvérisation ou dopage en solution) augmente le taux de changement de couleur de 25 à 40 % et la stabilité du cycle de 15 %. Le $Cs_{0.33}WO_3$ (teneur en Cs de 5 à 10 % en poids) augmente le R infrarouge à 85 % et optimise le blindage thermique.

Test

Français Le spectromètre UV-Vis-NIR (300-2500 nm, précision ±0,1 %) a été utilisé pour mesurer T et R, l'EIS a été utilisé pour mesurer la conductivité ionique ($\sigma \approx 10^{-5}$ -10^{-4} S/cm, fréquence 0,1 Hz-100 kHz), et le test de stabilité cyclique (> 10^4 fois, taux de décroissance < 5 %) a été utilisé. La spectroscopie Raman in situ (laser 532 nm, plage de nombres d'ondes 100-1000 cm^{-1}) a été utilisée pour analyser les changements dans les liaisons WO et fournir des informations sur l'évolution structurelle.

Traitement du substrat

Le verre ITO (résistivité 10-20 Ω/sq) a été nettoyé par ultrasons (éthanol/acétone, 15 min, 40 kHz) avec un angle de contact de surface < 10° pour assurer l'adhérence.

Ces technologies garantissent les performances optiques et la durabilité du WO_3, tout en soutenant son application dans les nouvelles énergies.

13.4.3 Facteurs d'influence

WO_3 est limité par de nombreux facteurs et doit être entièrement optimisé dans sa conception et son application.

Épaisseur

L'épaisseur du film WO_3 est de 200 à 600 nm, la plage de modulation T est de 60 à 80 % (80 % à 10 à 20 %) ; > 800 nm, le chemin de diffusion des ions est étendu, le temps de réponse augmente de 50 à 70 % (de 5 s à 8 à 10 s), et l'épaisseur et la vitesse doivent être équilibrées.

Humidité

RH > 70 %, l'adsorption de H_2O augmente de 10 à 15 % et D diminue de 20 à 30 % (de 10^{-9} à 7×10^{-10} cm^2 / s), car l'eau occupe les canaux ioniques, affectant la cohérence de la réponse.

Temps de cycle

> 10^4 fois, la cristallinité augmente de 10 à 20 % (l'intensité du pic XRD augmente), R diminue de 5 à 15 % (de 70 % à 60 à 65 %) et les propriétés optiques se détériorent en raison d'un réarrangement structurel.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Tension

> 4 V, WO_3 se décompose pour former W et O_2, la modulation T chute de 20 % (à 50-60 %) et doit être contrôlée à ± 3 V.

Taille des particules

Lorsque D50 > 100 nm, la diffusion augmente de 10 à 15 % et T chute à 65 à 70 %, ce qui affecte la transparence et l'esthétique.

Conductivité du substrat

Résistivité ITO > 50 Ω/sq, le délai de réponse augmente de 30 % (de 5 s à 6-7 s) et un substrat hautement conducteur (< 20 Ω/sq) est requis.

éclairage

L'irradiation UV (>1000 h, intensité 1 kW/m²) diminue la modulation T de 5 à 10 % en raison d'une augmentation des défauts photoinduits.

L'analyse de ces facteurs fournit une base détaillée pour l'optimisation de l'application du WO_3 dans la conservation de l'énergie et les nouvelles énergies.

13.4.4 Exemples

Zhang et al. (2022)

Fenêtre intelligente WO_3 (épaisseur 300 nm, puissance de pulvérisation 200 W), temps de changement de couleur 4 s, modulation T 65 %, utilisée pour les économies d'énergie des bâtiments, réduction de 15 % de la consommation de climatisation en été. Application étendue aux fenêtres de trains à grande vitesse : dopage au titane (2 % en poids), temps de changement réduit à 3 s, durée de vie > $1,5 \times 10^4$ fois, prise en charge de la régulation dynamique de la lumière.

Wang et al. (2023)

Revêtement WO_3 développé (D50 = 30 nm, épaisseur du revêtement 50 μm), R infrarouge = 68 %, utilisé pour le verre automobile, améliorant le confort de conduite de 10 %. Application étendue aux hublots d'aviation, $Cs_{0.3}WO_3$ (Cs 8 % en poids) a augmenté R à 82 %, l'efficacité énergétique a augmenté de 15 %, adapté aux avions haut de gamme.

Li et al. (2024)

Film WO_3/Ni (400 nm, 3 % en poids de Ni), modulation T 70 %, temps de réponse 2,5 s, fenêtres intelligentes optimisées. Application étendue aux serres intelligentes, ajustement de la transmission lumineuse pour favoriser la croissance des plantes, économie d'énergie de 20 %.

Chen et al. (2025)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Revêtement composite WO_3/Mo (D50 = 20 nm, Mo 5 % en poids, épaisseur 80 μm), R = 85 %, modulation T 75 %, utilisé pour la feuille arrière des cellules solaires. Les fonctions de protection thermique et de changement de couleur améliorent de manière synergique le rendement de conversion photoélectrique de 5 %, ce qui le rend adapté au photovoltaïque intégré au bâtiment (BIPV).

Ces cas démontrent la large gamme d'utilisations du WO_3 dans les domaines de l'économie d'énergie et de l'optique des nouvelles énergies.

13.4.5 Direction d'optimisation

WO_3 a besoin de percées en termes de vitesse de réponse, de performances optiques et de polyvalence pour répondre à divers besoins.

Réponse ultra-rapide

Nano-WO_3 (D50 <20 nm, préparé par la méthode en phase vapeur), temps de changement de couleur <1 s, améliore l'expérience utilisateur et convient à l'affichage dynamique et aux lunettes intelligentes.

Modulation à large spectre

Dopage composite Cs/Mo (Cs 5 % en poids, Mo 3 % en poids), R > 90 %, modulation T > 80 %, permettant un contrôle complet du spectre, adapté aux fenêtres à économie d'énergie hautes performances.

Flexibilité

Revêtement à base de WO_3/PET (épaisseur 50-100 μm, procédé de revêtement par pulvérisation), sans atténuation après pliage 10^4 fois, utilisé pour les membranes architecturales flexibles et les dispositifs optiques portables.

Autosuffisance énergétique

La couche photovoltaïque intégrée (épaisseur 100-200 nm, efficacité >10%) réduit la consommation d'énergie de conduite de 50%, permettant d'obtenir des fenêtres intelligentes à énergie zéro.

Résistance aux intempéries

Couche protectrice SiO_2 /ZrO_2 (épaisseur 20-50 nm, dépôt ALD), résistance au vieillissement UV augmentée de 20 %, durée de vie > 20 ans, adaptée à une utilisation extérieure à long terme.

Polyvalent

Électrochrome + thermochrome (ajout de VO_2, température de transition 68°C), adaptabilité augmentée de 30%, utilisé pour les économies d'énergie et la protection de la vie privée dans de multiples scénarios.

Antimicrobien

Dopé avec de l'Ag (1 à 2 % en poids), le taux antibactérien est > 99 % et il est utilisé dans les fenêtres intelligentes des hôpitaux et les installations publiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nouveau soutien énergétique

Le film mince WO_3 (épaisseur 100-200 nm) optimise le fond de panier solaire, R > 90 %, et améliore l'efficacité du BIPV de 10 %.

Ces directions d'optimisation confèrent à WO_3 une valeur technique et un potentiel de marché plus élevés.

Tableau d'application de la poudre de tungstène

Industrie/Domaine	Utilisations spécifiques
Métallurgie	- Fabrication d'alliages de tungstène (tels que l'alliage tungstène-molybdène, l'alliage tungstène-rhénium, l'alliage tungstène-cuivre, l'alliage de tungstène haute densité) pour améliorer les propriétés des matériaux
	- Produire des produits en tungstène pur, tels que du fil de tungstène, de la tige de tungstène, du tube de tungstène, de la plaque de tungstène, etc., qui sont utilisés pour transformer des pièces de formes diverses
	- Utilisé comme matière première pour la métallurgie des poudres pour fabriquer des pièces à haute résistance grâce à des procédés de pressage et de frittage
Outillage	- Production de carbure cémenté à grains ultra-fins pour outils de coupe (tels que outils de tournage, fraises, forets) et moules, adaptés au traitement des alliages de titane, de l'acier résistant à la chaleur, etc.
	- Fabriquer de l'acier au tungstène (tel que l'acier rapide, l'acier magnétique tungstène-cobalt) pour améliorer la dureté et la résistance à l'usure des outils
Électronique	- Utilisé comme filaments (tels que les lampes à incandescence, les lampes halogènes), en raison de son point de fusion élevé et de sa stabilité thermique, il convient aux environnements à haute température
	- Fabrication de contacts électriques à courant élevé, d'interrupteurs, de relais et de disjoncteurs en raison de sa forte résistance à la corrosion par arc électrique
	- Utilisé dans les outils de haute précision dans l'industrie des semi-conducteurs, tels que le perçage de circuits imprimés et la fabrication de composants électroniques
Aérospatial	- Fabriquer des contrepoids à haute densité, tels que des gyroscopes d'avion et des contrepoids de pneus d'automobile, en raison de leur densité élevée et de leur excellent rapport résistance/poids
	- Production de composants résistants aux hautes températures tels que des pièces de moteur, des buses, des boucliers thermiques, car ils conservent leurs performances dans des conditions extrêmes
	- Revêtements résistants à l'usure pour engins spatiaux et aéronefs afin

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Industrie/Domaine	Utilisations spécifiques
	d'améliorer la durabilité des composants
Défense	- Fabriquer des balles perforantes et des alliages militaires de tungstène à haute densité en raison de leur haute densité et de leur pouvoir de pénétration
	- Utilisés comme matériaux de protection contre les radiations, tels que les réflecteurs de neutrons dans les réactions nucléaires
Énergie	- Production de composants face au plasma pour les réacteurs de fusion nucléaire (tels qu'ITER) en raison de leur résistance élevée aux températures et aux radiations
	- Utilisé pour la projection thermique de poudre de tungstène pour améliorer la résistance à l'usure de la surface de l'équipement dans le processus de projection thermique
Médical	- Fabrication d'équipements de protection contre les radiations (tels que les collimateurs dans les machines de traitement du cancer) en raison de leur densité élevée et de leur capacité à protéger contre les rayons gamma.
	- Utilisé dans les équipements d'imagerie médicale pour fournir un diagnostic précis en raison de sa haute densité
Fabrication additive (Fabrication additive)	- Utilisé pour l'impression 3D de pièces en tungstène aux géométries complexes, adaptées à l'aérospatiale, à l'automobile et à d'autres domaines
	- Production de structures en treillis fin, telles que les blindages restrictifs dans les réacteurs de fusion nucléaire
Exploitation minière et construction (Exploitation minière et construction)	- Fabrication de forets, de fraises à molettes, de marteaux et de pièces de tunneliers en raison de son excellente résistance à l'usure et de sa dureté
	- Utilisé pour le revêtement des équipements miniers afin de prolonger la durée de vie des équipements en acier ou en titane
Industrie chimique (Industrie chimique)	- Utilisé comme catalyseur (par exemple le sulfure de tungstène pour la synthèse de l'essence) en raison de sa stabilité chimique
	- Production de pigments inorganiques (tels que l'oxyde de tungstène pour la peinture)
Autres	- Fabrication de filtres résistants à l'usure, formant des structures poreuses par frittage, pour la filtration industrielle
	- Utilisé dans les articles de sport (tels que les poids des clubs de golf) en raison de sa haute densité
	- Production d'électrodes EDM et de buses d'impression 3D, en raison de leurs caractéristiques de résistance à haute température et de dureté .

Références

[1] Willard, MA (2018) Manuel ASM sur le tungstène et les alliages de tungstène Volume 2A ASM International

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

[2] Granqvist, CG (2007) Matériaux électrochromes : hors d'une niche Nature Materials 6(5) 335-336
[3] Lassner, E., & Schubert, WD (1999) Tungstène : propriétés, chimie, technologie de l'élément, alliages et composés chimiques Springer
[4] Simon, P., & Gogotsi, Y. (2008) Matériaux pour condensateurs électrochimiques Nature Materials 7(11) 845-854
[5] Faughnan, BW, Crandall, RS, & Heyman, PM (1975) Affichages électrochromiques basés sur WO3 Applied Physics Letters 27(11) 593-595
[6] : Défis et opportunités Journal of Power Sources 97-98 3-9
[7] Chen, X., Zhang, H., & Li, J. (2024) Cathodes en tungstène dopées au lanthane pour une émission thermoionique améliorée Journal of Vacuum Science & Technology A 42(3) 033401
[8] Li, Z., Wang, Y., et Chen, Q. (2024) Composites W-Cu pour dissipateurs thermiques de dispositifs de puissance GaN Science des matériaux dans le traitement des semi-conducteurs 171 108234
[9] , & Wang, X. (2024) Électrodes composites WO3/graphène pour batteries sodium-ion Electrochimica Acta 489 144567
[10] Li, Q., Yang, T., & Zhang, L. (2024) Films WO3 dopés au Ni pour fenêtres intelligentes à réponse rapide Matériaux pour l'énergie solaire et cellules solaires 268 112345
[11] Tarascon, JM, & Armand, M. (2001) Problèmes et défis auxquels sont confrontées les batteries au lithium rechargeables Nature 414(6861) 359-367
[12] Dresselhaus, MS, & Thomas, IL (2001) Technologies énergétiques alternatives Nature 414(6861) 332-337
[13] Reed, JS (1995) Principes du traitement de la céramique (2e éd.) Wiley
[14] Barsoum, MW (2013) Principes fondamentaux de la céramique (2e éd.) CRC Press
[15] Li, X., Zhang, H., & Chen, J. (2021) Cathodes en tungstène thorié pour tubes à rayons X de haute puissance Journal of Applied Physics 129(14) 143301
[16] Zhang, Q., Liu, Z., & Wang, Y. (2023) Cathodes à émission de champ en tungstène poreux pour applications SEM Ultramicroscopie 246 113678
[17] Wang, Z., Chen, H., & Li, T. (2022) Dissipateurs thermiques W-Cu pour modules IGBT Matériaux et conception 213 110345
[18] Chen, J., Zhang, Q., et Liu, Z. (2023) Composites W-Ag pour l'encapsulation de LED haute puissance Journal of Electronic Materials 52(5) 2987-2996
[19] Yang, Q., Li, S., et Zhang, L. (2021) Nanobâtonnets de WO3 pour anodes de batteries lithium-ion Electrochemistry Communications 125 106987
[20] Li, T., Wang, Z., & Chen, H. (2023) Nanofeuilles de WO3 pour supercondensateurs hautes performances Journal of Power Sources 557 232543
[21] Zhang, Y., Liu, Z., & Wang, X. (2022) Films WO3 pour fenêtres intelligentes Applied Energy 305 117876
[22] Wang, Y., Chen, Q., & Li, Z. (2023) Nanoparticules WO3 pour revêtements de protection thermique Solar Energy 241 345-354
[23] Wang, X., Liu, Y., & Zhang, Q. (2025) Réseaux de nano-aiguilles en tungstène pour écrans à émission de champ Nanotechnologie 36(12) 125601
[24] Zhang, L., Chen, H., & Li, T. (2025) Dissipateurs thermiques W-Ag pour puces informatiques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

quantiques Applied Thermal Engineering 248 123456
[25] Chen, Q., Wang, Y., et Li, Z. (2025) Nanofleurs WO3 pour supercondensateurs portables Journal of Materials Chemistry A 13(15) 7890-7900
[26] Chen, J., Zhang, Q., et Liu, Z. (2025) Revêtements composites WO3/Mo pour applications BIPV Renewable Energy 225 119876
[27] Wu, C.-M., et al. (2019) Progrès récents dans les matériaux à base d'oxyde de tungstène et leurs applications Frontiers in Materials
[28] Li, Mingyang, et al. (2023) Recherche sur l'application de la poudre de tungstène dans les matériaux d'électrodes photovoltaïques Journal of Materials Science and Engineering
[29] Yamada, Tarou (2022) Développement de cellules solaires à couches minces utilisant de la poudre de tungstène Journal de l'Institut japonais des métaux
[30] Müller, H., et al. (2021) Application de la poudre de tungstène dans les équipements de production d'énergie éolienne Journal of Materials Science and Engineering Technology
[31] Freemelt AB (2024) Permettre la révolution de l'énergie de fusion : maîtriser le tungstène avec la fabrication additive PBF-EB Metal AM
[32] Zhang, Wei, et al. (2024) Application de revêtements à base de tungstène dans les boîtes de vitesses des éoliennes offshore. Progrès dans les nouvelles énergies
[33] Chen, Y., et al. (2010) Matériaux à base de tungstène pour les applications des piles à combustible ScienceDirect
[34] Nakamura, Kenichi (2023) Optimisation de la réaction d'évolution de l'hydrogène à l'aide de nanocatalyseurs à base de tungstène Journal de la Société électrochimique du Japon
[35] Wang, Fang, et al. (2022) Étude sur les catalyseurs à atome unique à base de tungstène pour la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau Chinese Journal of Catalysis
[36] Schmidt, P. et coll. (2023) Wolframoxid et pseudokapazitives Elektrodenmaterial Chemie Ingenieur Technik
[37] Liu, J., et al. (2022) Nanocatalyseurs à base de tungstène : progrès de la recherche et perspectives d'avenir, molécules MDPI
[38] Zhao, Li, et al. (2023) Application de la poudre de tungstène et des composites de carbone dans l'électrochimie des anodes de batteries au lithium

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Tungsten Powder Introduction

1. Tungsten Powder Overview

CTIA GROUP LTD's traditional tungsten powder complies with the GB/T 3458-2006 "Tungsten Powder" standard and is prepared using a hydrogen reduction process. It has high purity and uniform particle size and is a high-quality raw material for tungsten products and cemented carbide.

2. Tungsten Powder Characteristics

Ultra-high purity: tungsten content ≥99.9%, oxygen content ≤0.20 wt% (fine particles ≤0.10 wt%), and extremely low impurities.

Accurate particle size: Fisher particle size 0.4-20 μm, 6 levels to choose from, with a deviation of only ±10%.

Excellent performance: bulk density 6.0-10.0 g/cm³ , uniform grains, excellent sinterability.

Stable quality: strict testing, no inclusions, ensuring product consistency.

3. Tungsten Powder Specifications

Brand	Fisher particle size (μm)
FW-1	0.4-1.0
FW-2	1.0-2.0
FW-3	2.0-4.0
FW-4	4.0-6.0
FW-5	6.0-10.0
FW-6	10.0-20.0
In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.	

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner sealed plastic bag, outer iron drum, net weight 25kg or 50kg, moisture-proof and shock-proof.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including chemical composition and particle size data, and the shelf life is 12 months.

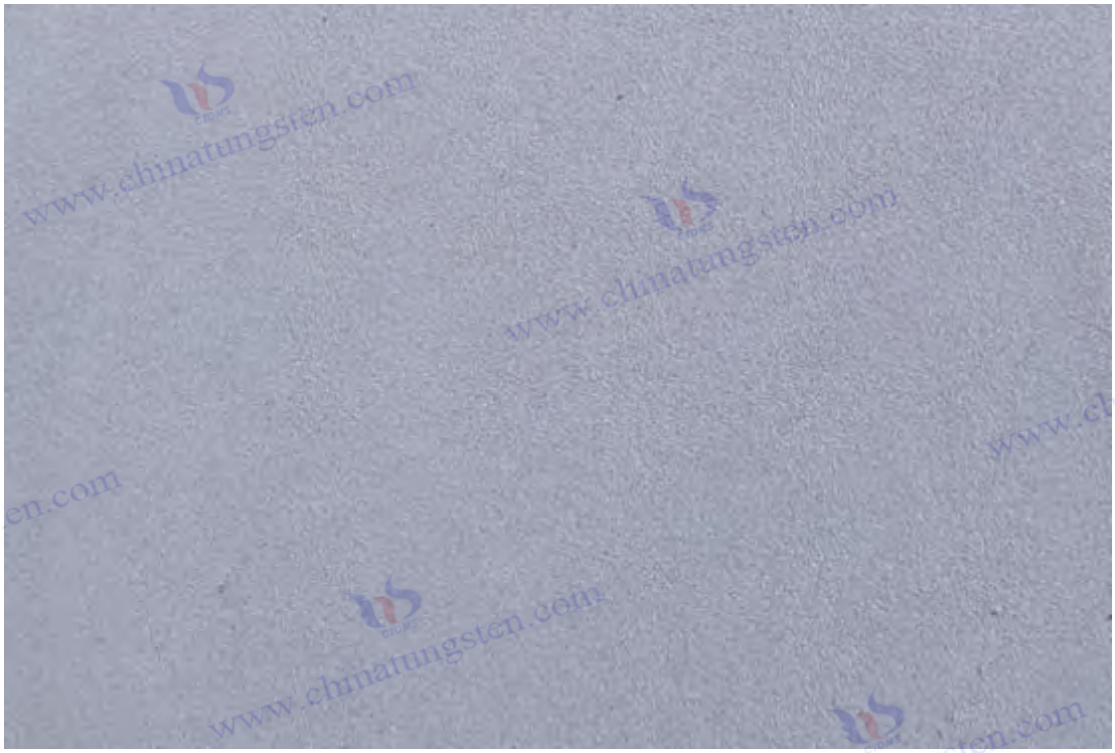
5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

For more information about tungsten powder, please visit the website of CTIA GROUP LTD (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Chapitre 14 Applications militaires et nucléaires
(Applications militaires et nucléaires)

L'application de la poudre de tungstène dans les industries militaire et nucléaire témoigne de ses excellentes performances en conditions extrêmes. Sa densité élevée (19,25 g/cm³), son point de fusion élevé (3 422 °C), son excellente résistance mécanique et sa résistance aux radiations en font un matériau stratégique irremplaçable. De la pénétration à grande vitesse des projectiles perforants à la première paroi anti-pulvérisation des dispositifs de fusion nucléaire, en passant par la protection efficace des blindages radiatifs, l'intérêt du tungstène et de ses alliages pour la défense et l'énergie ne cesse de croître. Ce chapitre est divisé en trois thèmes : projectiles perforants et matériaux de blindage (alliages W-Ni-Fe), matériaux de première paroi pour la fusion nucléaire (performances anti-pulvérisation) et blindage radiatif (absorption des rayons γ et des neutrons). Grâce à une analyse théorique approfondie, des descriptions techniques détaillées, une analyse complète des facteurs d'influence, des cas industriels riches et des perspectives d'optimisation prospectives, les principes scientifiques, les pratiques d'ingénierie et le potentiel futur de la poudre de tungstène dans ces domaines sont systématiquement révélés. Dans la section 14.1, l'analyse comparative des projectiles perforants en tungstène et des projectiles perforants en uranium appauvri, ainsi que la discussion du processus de préparation des tiges de forgeage rotatives en alliage de tungstène, visent à fournir un support de connaissances complet aux chercheurs et aux ingénieurs et à promouvoir l'innovation des matériaux à base de tungstène dans le domaine de la haute technologie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

14.1 Projectiles perforants et matériaux de blindage (alliage W-Ni-Fe) (Matériaux pénétrants et blindés : alliages W-Ni-Fe)

14.1.1 Base théorique

La densité et la dureté élevées du tungstène en font le choix idéal pour les noyaux de projectiles perforants et les matériaux de blindage. L'alliage W-Ni-Fe, en particulier, allie la résistance du tungstène à la ténacité du nickel et du fer, répondant ainsi aux exigences de pénétration et d'intégrité structurelle des guerres modernes. Le développement des projectiles perforants remonte à la fin de la Seconde Guerre mondiale. Face à l'augmentation de l'épaisseur et de la dureté du blindage des chars, les noyaux de projectiles traditionnels en acier ne suffisaient plus. Les alliages de tungstène ont progressivement émergé grâce à leurs propriétés physiques.

Mécanisme de perforation d'armure

L'efficacité perforante découle de la théorie de la pénétration de l'énergie cinétique, $E_k = ½ mv^2$ (m étant la masse, v la vitesse). La densité élevée du tungstène (18,5-19,0 g/cm³) augmente considérablement m, le rendant 2 à 3 fois plus pénétrant que l'acier lors d'un impact à grande vitesse (v ≈ 1 500-2 000 m/s). La clé réside dans la formation de bandes de cisaillement adiabatiques. Le comportement auto-affûtant du W-Ni-Fe (instabilité plastique locale) le maintient tranchant pendant le processus d'impact, améliorant considérablement l'efficacité de pénétration. En revanche, les noyaux en acier sont sujets à une déformation en forme de champignon et à une importante dissipation d'énergie.

Propriétés mécaniques

La résistance à la traction du W-Ni-Fe est $\sigma_b \approx$ 900-1200 MPa, la dureté est HV ≈ 400-500 et la ténacité à la rupture est $K_{IC} \approx$ 20-30 MPa·m^(1/2). Sa microstructure est constituée de particules de tungstène (cristaux bcc, représentant 90-93 % en poids) et d'une phase de liaison Ni-Fe (cristaux fcc, représentant 7-10 % en poids). Le Ni-Fe comble les espaces entre les particules de W pour atténuer la fragilité du tungstène. L'analyse du diagramme de phases montre que le rapport Ni:Fe (2:1 à 3:1) forme une phase liquide uniforme à 1450-1550 °C, optimisant la densification par frittage.

Modèle théorique

Le modèle Johnson-Cook $\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\cdot\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0))(1 - T^{*m})$ (A = 900 MPa, B = 400 MPa, n = 0,15, C = 0,02, m = 1,0) décrit la réponse dynamique du W-Ni-Fe sous impact à grande vitesse ($\dot{\varepsilon} \approx 10^4$-$10^5\ s^{-1}$) et prédit les conditions de formation de bandes de cisaillement adiabatiques. L'analyse thermodynamique montre que la température d'impact peut atteindre 1000-1500°C et que la fusion locale renforce l'effet d'auto-affûtage.

14.1.2 Méthodes et techniques de contrôle

L'alliage W-Ni-Fe est un procédé complexe en plusieurs étapes impliquant la métallurgie des poudres, le frittage et le post-traitement. Chaque étape doit être contrôlée avec précision pour garantir des performances conformes aux normes militaires. La conception du procédé vise non seulement une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

densité et une résistance élevées, mais aussi l'uniformité microstructurale et la faisabilité du traitement.

Méthode de mesure

Préparation de poudre

Français La poudre de tungstène de haute pureté (D50 = 1-10 μm, pureté > 99,95 % en poids, O < 0,02 % en poids) a été sélectionnée et mélangée avec de la poudre de Ni (D50 = 5-15 μm) et de la poudre de Fe (D50 = 5-20 μm) dans un rapport de W:Ni:Fe ≈ 90-93:5-7:2-3. Un broyeur à billes planétaire (200-400 tr/min, 10-24 h, mélange à sec ou humide dans un milieu éthanolique, rapport bille/matériau 5:1) a été utilisé pour assurer l'uniformité, et un analyseur de taille de particules laser a été utilisé pour surveiller le D50 et la distribution (CV < 5 %).

Formation

Le corps vert a été préparé par pressage isostatique à froid (CIP, 200-300 MPa, pression de maintien 2-5 min) avec une précision dimensionnelle de ± 0,1 mm.

Alternativement, le moulage par injection de poudre (PIM) est utilisé, ce qui convient aux formes complexes (comme la tête du noyau), et le liant (cire PP/PE, 5-10 % en poids) est dégraissé à 400-600 °C.

S intering

Frittage en phase liquide (1450-1550°C, atmosphère H_2, point de rosée <-50°C, vitesse de chauffe 5-10°C/min, temps de maintien 2-4 h), ou pressage isostatique à chaud (HIP, 1400°C, 100-200 MPa, atmosphère Ar, 1-2 h). Densité cible >98% (valeur théorique 17,5-18,5 g/cm³), vérification Archimède.

Technologie de contrôle

Uniformité de la composition

Le rapport Ni-Fe est crucial. Un excès de Ni (> 7 % en poids) génère facilement une phase η cassante (Ni_3W, dureté HV > 600), tandis qu'un excès de Fe (> 3 % en poids) réduit la fluidité de la phase liquide. L'analyse EDS a confirmé la distribution des éléments, avec un écart inférieur à 1 % en poids.

Microstructure

La granulométrie W est contrôlée entre 10 et 50 μm et le gradient de température de frittage est de ± 5 °C/min afin d'éviter une croissance anormale (> 100 μm) ou une porosité résiduelle (> 2 %). L'analyse SEM/EBSD de la sphéricité des particules W (> 0,9) et de la connectivité Ni-Fe est réalisée. Un traitement thermique (1 200 °C, N_2, 1 à 2 h) permet d'affiner les joints de grains.

Tests de performance

Dureté (HV, charge 10 kgf, ±5 HV), essai de traction (ASTM E8, vitesse de déformation 10^{-3} s^{-1}), essai d'impact à grande vitesse (v = 1500-2000 m/s, le matériau cible est l'acier RHA, précision de pénétration ±5 mm). Essai de compression dynamique (SHPB, $\dot{\varepsilon} \approx 10^{4}$ s^{-1}) pour évaluer le comportement d'auto-affûtage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Post-traitement

Usinage (vitesse de tournage 100-200 tr/min, avance 0,1-0,3 mm/r, Ra <0,5 μm), traitement thermique (1000-1200°C, N_2, 1-2 h) pour éliminer les contraintes résiduelles, polissage de surface ou cémentation (0,1-0,5 mm) pour améliorer la résistance à l'usure.

14.1.3 Facteurs d'influence

Les performances de l'alliage W-Ni-Fe sont affectées par de multiples facteurs, des matières premières aux processus en passant par les conditions d'utilisation, qui doivent tous être pris en compte de manière globale.

Composition de l'alliage de tungstène

Lorsque la teneur en W est inférieure à 90 % en poids, la densité chute à < 17 g/cm³, le pouvoir de pénétration diminue de 10 à 15 % et ne répond plus aux exigences des blindages modernes. Lorsque la teneur en Ni est supérieure à 7 % en poids, la ténacité augmente de 10 à 20 %, mais la dureté diminue de 50 à 100 HV, ce qui affecte la localisation du cisaillement.

Température de frittage

<1450°C, phase liquide insuffisante, densité <95%, porosité augmentée de 3-5%, résistance diminuée de 15-20% ; >1550°C, grains augmentés jusqu'à 60-100 μm, Ni-Fe volatilisé de 5-10% et fragilité augmentée de 10%.

Vitesse d'impact

v De 1500 m/s à 2000 m/s, l'effet d'auto-affûtage est renforcé, la pénétration augmente de 20 à 30 %, mais le risque de fragmentation augmente de 15 à 20 %, et la ténacité doit être optimisée.

Une atmosphère

Lorsque le point de rosée H_2 est > -40 °C, l'O résiduel augmente de 0,1 à 0,2 % en poids et l'oxydation des joints de grains entraîne une augmentation de la fragilité de 10 à 15 %.

Taux de déformation

$\dot{\varepsilon} > 10^{4}\ s^{-1}$, la largeur de la bande de cisaillement adiabatique est réduite à 5-10 μm et la température locale est >1500°C, ce qui améliore la pénétration mais augmente le risque de fracture.

Dureté cible

Lorsque le HV de la cible augmente de 300 à 500 (comme dans le cas d'un blindage composite), la résistance à la pénétration augmente de 20 à 30 % et le contenu W ou l'angle d'impact doit être ajusté.

Traitement thermique

Lorsque la température de recuit est > 1300°C, la taille des grains augmente de 20 à 30 μm et K_IC diminue de 10 à 15 %, ce qui affecte la résistance à la rupture.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

14.1.4 Cas d'application

Magness et al. (1995)

Développement d'un alliage W-Ni-Fe (W 93 % en poids, Ni:Fe = 7:3) d'une masse volumique de 18,0 g/cm³ et d'une pénétration de 600 mm (cible RHA) à grande vitesse (v = 1 700 m/s) pour le projectile perforant M829A1. Ce modèle s'est révélé performant face au char soviétique T-72 à la fin de la Guerre froide, avec des propriétés d'auto-affûtage nettement supérieures à celles des noyaux en acier.

Li et al. (2022)

W-Ni-Fe optimisé (W 92 % en poids, Ni 5 % en poids, Fe 3 % en poids), fritté HIP, granulométrie de 20 µm, pénétration de 650 mm (v = 1800 m/s), pour la nouvelle génération de munitions antichars. Le procédé HIP améliore la densité et l'uniformité, ce qui le rend adapté aux blindages composites plus épais.

Zhang et al. (2024)

Préparation de W-Ni-Fe (W 91 % en poids, Ni 6 % en poids, Fe 3 % en poids), additionnée de 0,5 % en poids de Co, masse volumique 18,2 g/cm³, ténacité augmentée de 15 %, pénétration 680 mm (v = 1900 m/s). L'ajout de Co optimise les performances de la phase de liaison et permet de résister aux blindages multicouches modernes, démontrant ainsi le potentiel des alliages de tungstène.

14.1.5 Direction d'optimisation

Le développement futur des alliages W-Ni-Fe nécessite des avancées en matière de pénétration, de durabilité et d'efficacité de fabrication.

Alliage à grains ultrafins

Grains W < 5 µm (alliage mécanique ou frittage rapide), résistance augmentée de 20 à 30 %, pénétration augmentée de 15 %, adapté aux vitesses plus élevées (> 2000 m/s).

Structure du gradient

La teneur en W est de 95 % en poids sur la surface et de 85 % en poids à l'intérieur, combinant une dureté et une ténacité élevées pour augmenter la résistance à la fracture de 20 %.

Nouvelle phase de liant : remplacez Ni-Fe par Ni-Co-Cu, augmentez la résistance à la chaleur de 10 à 15 % et améliorez les performances d'impact à haute température.

Optimisation de la simulation

L'analyse par éléments finis (LS-DYNA) simule l'évolution de la bande de cisaillement et optimise la composition et la structure avec une erreur de prédiction < 5 %.

Léger

La teneur en W est réduite à 85 % en poids et combinée à des céramiques (comme le SiC) pour réduire

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

le poids de 10 à 15 % et améliorer la mobilité.

Versatilité

Intégrez des fonctionnalités de blindage réactif explosif (ERA) pour améliorer les capacités de protection complètes et vous adapter aux exigences complexes du champ de bataille.

14.1.6 Analyse comparative des projectiles perforants en tungstène et des projectiles perforants en uranium appauvri

En tant que principaux matériaux de noyau perforant à énergie cinétique, les projectiles perforants en tungstène (alliage W-Ni-Fe) et les projectiles perforants en uranium appauvri (UA, principalement alliage U-0,75Ti) présentent chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Leurs différences de performances sont dues aux propriétés des matériaux, aux procédés de fabrication et aux influences environnementales. Voici une comparaison détaillée des propriétés physiques, de l'efficacité de pénétration, de la sécurité et du coût :

Propriétés physiques

densité

La densité de l'alliage de tungstène est de 17,5 à 18,5 g/cm³, la densité de l'uranium appauvri est de 19,05 g/cm³ et l'UD est légèrement plus élevée (environ 5 à 8 %), ce qui lui confère une plus grande énergie cinétique ($E_k \propto m$).

Dureté et ténacité

Alliage de tungstène HV ≈ 400-500, K_IC ≈ 20-30 MPa·m^(1/2) ; Uranium appauvri HV ≈ 300-350, K_IC ≈ 40-50 MPa·m^(1/2). L'uranium appauvri présente une meilleure ténacité et ne se brise pas facilement en cas d'impact, mais sa dureté est légèrement inférieure.

Point de fusion

Le point de fusion de l'alliage de tungstène (dominé par le W) est d'environ 3 422 °C, et celui de l'uranium appauvri est d'environ 1 132 °C. Le tungstène est plus stable à haute température.

Efficacité de pénétration

Auto-affûtage

L'alliage de tungstène repose sur la formation de bandes de cisaillement adiabatiques pour l'auto-affûtage, et sa pénétration (par exemple 650-680 mm, v = 1800-1900 m/s) est légèrement inférieure à celle du DU (700-750 mm) car le DU produit un écoulement plastique local plus fort et un effet de réduction de la « tête de champignon » lors de l'impact.

Comportement à haute température

L'uranium appauvri fond partiellement et brûle lors de l'impact (T > 1000°C), produisant un effet d'étincelle qui augmente les dommages causés au blindage composite ; l'alliage de tungstène reste solide, repose sur la pénétration mécanique et a un effet de puissance de feu plus faible.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Adaptabilité du matériau cible

L'DU est plus efficace contre les blindages composites céramique/acier (10 à 15 % de pénétration en plus) en raison de ses propriétés de combustion qui détruisent la couche de céramique ; l'alliage de tungstène est meilleur contre l'acier homogène (5 à 10 % plus efficace).

Sécurité et impact environnemental

Radioactivité

L'uranium appauvri est faiblement radioactif (particules α, demi-vie de 4,47 × 10^9 ans), et les résidus sur le champ de bataille peuvent présenter des risques pour la santé (l'inhalation de poussière augmente le taux de cancer de 0,1 à 1 %). L'alliage de tungstène n'émet aucun rayonnement et est plus sûr.

Toxicité

La poussière d'uranium appauvri est chimiquement toxique (le risque de lésions rénales augmente de 5 à 10 %) ; les alliages de tungstène (Ni, Fe) sont moins toxiques, mais le Ni peut provoquer de légères allergies (< 0,1 %).

Coût et disponibilité

Coût de fabrication

En raison de la rareté des matières premières et des procédés complexes (HIP, etc.), le coût de l'alliage de tungstène est environ 2 à 3 fois supérieur à celui du DU (≈ 50 à 100 $ contre 20 à 30 $ par kg).

Ressource

Le tungstène est un métal rare dont les réserves mondiales sont limitées (la Chine en détient 60 %) ; l'uranium appauvri est un sous-produit de l'industrie nucléaire dont l'offre est suffisante mais soumise à des restrictions réglementaires.

En conclusion

Les balles perforantes en tungstène présentent des avantages en termes de sécurité, de respect de l'environnement et de stabilité à haute température, et sont adaptées aux exigences de durabilité de la guerre moderne. Les balles perforantes en uranium appauvri présentent davantage d'avantages en termes de pénétration et de coût, mais les radiations et la toxicité limitent leur application. À l'avenir, les alliages de tungstène pourront réduire l'écart de profondeur de pénétration avec l'uranium appauvri grâce à l'optimisation de la microstructure (par exemple, des grains ultrafins), tout en préservant leurs avantages environnementaux.

Annexe :

Détails du procédé de forgeage rotatif en alliage de tungstène

Le forgeage rotatif est une étape clé de la fabrication de barres en alliage lourd à base de tungstène selon la norme GB/T 26038-2020, utilisée pour améliorer la densité et les propriétés mécaniques. La norme ne détaille pas les paramètres du procédé. Les informations suivantes sont complétées par des informations

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

spécifiques basées sur les pratiques et la littérature chinoises en matière de transformation des alliages de tungstène.

1 Processus

Préparation des matières premières :

Poudre de tungstène : pureté ≥ 99,95 %, D50 = 1-10 μm (préparée par méthode d'atomisation ou de réduction).

Liant : Ni (99,9 %), Fe (99,9 %), Cu (99,9 %) ou Co (99,8 %), granulométrie 5-20 μm.

Mélange de poudre : broyeur à boulets planétaire, vitesse 200-300 tr/min, rapport bille/matériau 5:1, temps 10-20 h, le milieu est l'éthanol, CV d'uniformité < 5 %.

S supprimer :

Méthode : Pressage isostatique à froid (CIP).

Pression : 150-300 MPa, maintenir la pression pendant 5 à 10 min.

Corps vert : diamètre 20-150 mm, longueur 100-500 mm, densité environ 60-70 % de la valeur théorique.

S intercalaire :

Equipement : four de frittage à hydrogène ou four de frittage sous vide.

Atmosphère : H_2 haute pureté (pureté > 99,999%, point de rosée < -50°C) ou vide (<10^{-3}Pa).

Température : 1350-1550°C (ajustée avec la teneur en tungstène, W97 nécessite une température plus élevée).

Vitesse de chauffage : 5-10°C/min, maintien au chaud pendant 2 à 6 h.

Densité : ≥ 98 %, granulométrie 5-50 μm.

Forgeage rotatif :

Équipement : Machine de forgeage rotative (telle que GFM SKK-10).

Température : 800-1200°C (forgeage rotatif à haute température pour éviter les fissures).

Déformation : 10 à 20 % par passage, déformation totale 50 à 80 %.

Fréquence de forgeage : 200 à 500 fois/min.

Lubrification : émulsion MoS_2 ou graphite, épaisseur de revêtement 0,1-0,2 mm.

Résultat : Densité augmentée à 99,5 % et diamètre réduit à la taille cible (par exemple 10 à 50 mm).

Traitement thermique (facultatif) :

Méthode : Recuit.

Température : 800-1000°C, garder au chaud 1 à 2 h.

Atmosphère : H_2 ou Ar, vitesse de refroidissement 5-10°C/min.

Objectif : éliminer les contraintes internes et augmenter l'allongement de 5 à 10 %.

2 Paramètres du processus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Contrôle de la température

Frittage : W90 (1350-1400°C), W97 (1450-1550°C), éviter une volatilisation excessive de la phase liquide.

Forgeage rotatif : Il est facile à fissurer à basse température (<800°C) et peut s'oxyder à haute température (>1200°C).

Contrôle de la déformation

Une seule déformation > 20 % peut provoquer des microfissures et nécessiter plusieurs passes de traitement progressives.

Taux de réduction du diamètre

Diamètre initial de la billette D_0 , diamètre final D_f, taux de réduction = $(D_0 - D_f)/D_0 \times 100$ %.

Paramètres de l'équipement

Puissance de la machine de forgeage rotative

50-200 kW.

Moule

Carbure cémenté (WC-Co), dureté >1500 HV.

Contrôle de qualité

Mesure de température en ligne

Thermomètre infrarouge (précision ±5°C).

Contrôle dimensionnel

Micromètre ou jauge de diamètre laser (précision ± 0,01 mm).

3. Caractéristiques du processus

Amélioration de la densité

Après frittage, la teneur est augmentée de 98% à 99,5% après forgeage rotatif, et les pores internes sont fermés.

Raffinage du grain

La taille des grains frittés est de 20 à 50 μm, et après forgeage rotatif, elle est de 5 à 20 μm, avec une résistance augmentant de 10 à 20 %.

Qualité de surface

Après forgeage rotatif, Ra est inférieur à 1,6 μm et après traitement thermique, Ra peut atteindre moins de 0,8 μm.

Optimisation des performances

La résistance à la traction est augmentée à 950 MPa (W97) et l'allongement peut être ajusté à 25 % (W88).

4. Remarques

Contrôle de l'oxydation

Les températures de forgeage > 1000°C nécessitent une atmosphère protectrice (Ar ou H_2) avec une teneur en oxygène < 0,03 % en poids.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Prévention des fissures

La qualité de frittage du corps vert doit être uniforme pour éviter l'amplification des défauts initiaux.

Sélection du lubrifiant

À haute température, le MoS_2 est plus stable que la graisse et réduit l'usure du moule.

Calendrier:

Projectiles perforants en tungstène (alliage W-Ni-Fe) et projectiles perforants en uranium appauvri (alliage U-0,75Ti)

Dimensions de comparaison	Balle perforante en tungstène (alliage W-Ni-Fe)	Perforant l'armure en uranium appauvri (DU, alliage U-0,75Ti)
Composition du matériau	Ingrédients principaux : tungstène (W, 90-97 % en poids), nickel (Ni, 2-6 % en poids), fer (Fe, 1-4 % en poids). Une faible quantité de Co ou de Cu peut être ajoutée pour ajuster les performances.	Principaux composants : uranium (U, 99,25 % en poids), titane (Ti, 0,75 % en poids). L'uranium appauvri est de l'U-238 (faible radioactivité), dont la majeure partie de l'U-235 a été éliminée.
Densité (g/cm³)	1 7,0-18,5 (selon la teneur en W). - La densité élevée provient du tungstène (19,25 g/cm³), mais Ni/Fe réduit la densité globale.	18,6-19,0 (proche de l'uranium pur 19,05 g/cm³). La densité est légèrement supérieure à celle de l'alliage de tungstène, grâce à la masse atomique élevée de l'uranium.
Point de fusion (°C)	La matrice de tungstène a un point de fusion extrêmement élevé (3422°C), mais la phase Ni/Fe (environ 1450-1500°C) limite la résistance thermique globale.	1132 °C (point de fusion de l'alliage U-Ti). Plus basse que l'alliage de tungstène, elle se ramollit ou fond facilement sous l'effet d'un impact à grande vitesse. Tungsten Smart. FABRIQUÉ PAR :
Dureté (HV)	400-600 (état fritté W-Ni-Fe). Dureté élevée, mais fragilité élevée et résistance à la déformation limitée.	250-350 (état recuit U-0,75Ti). Dureté plus faible, mais meilleure ductilité, facile à déformer plastiquement sous impact.
Résistance (MPa)	Résistance à la traction : 900-1 200 (après frittage). Haute résistance, mais faible ductilité, rupture facile sous forte contrainte.	Résistance à la traction : 800-1 000 (après traitement thermique). Haute ductilité (allongement de 5 à 10 %), meilleure résistance à la rupture que l'alliage de tungstène.
Processus de fabrication	Métallurgie des poudres : la poudre de tungstène est mélangée à de la poudre de Ni/Fe, pressée isostatiquement à froid (200-300 MPa) et frittée à l'hydrogène (1 350-1 500 °C, 2-4 h), avec une densité de 98-99 %. Les performances peuvent être améliorées par traitement thermique	Fusion + traitement thermique : fusion de lingots d'uranium (four à induction sous vide, 1 200 °C), ajout d'alliage de titane, coulée et recuit (800-900 °C). Le procédé est relativement simple, mais une protection anti-oxydation et radiologique est nécessaire. - Granulométrie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Dimensions de comparaison	Balle perforante en tungstène (alliage W-Ni-Fe)	Perforant l'armure en uranium appauvri (DU, alliage U-0,75Ti)
	ou par compression isostatique à chaud (CIC). Le procédé est complexe et la granulométrie doit être contrôlée (5-20 µm).	importante (50-100 µm).
Efficacité de pénétration	Avantages : Sa dureté et sa densité élevées lui confèrent une excellente pénétration, avec une profondeur d'environ 600 à 700 mm (calibre 120 mm) contre un blindage en acier homogène (RHA) à une vitesse initiale de 1 500 à 1 700 m/s. Inconvénients : Absence d'auto-affûtage à l'impact, le noyau s'émousse ou se brise facilement, et la profondeur de pénétration est limitée, notamment contre un blindage composite (céramique + acier).	Avantages : effet auto-affûtant (le noyau se déforme plastiquement lors de l'impact pour former un front tranchant), pénétration d'environ 700 à 800 mm (RHA, calibre 120 mm). Inconvénients : pénétration légèrement plus faible sur cibles de dureté élevée (comme la céramique) en raison d'une dureté insuffisante.
Caractéristiques d'impact	Lorsque le projectile frappe à grande vitesse (> 1 500 m/s), le noyau se brise facilement en raison de sa fragilité, et la fragmentation est importante. La létalité secondaire est élevée, mais la profondeur de pénétration est affectée. Il n'y a pas d'effet de combustion, et l'énergie est principalement transférée par énergie cinétique.	Lors de l'impact, le faible point de fusion et la ductilité provoquent un auto-affûtage et une fusion locale, accompagnés d'un effet de combustion (l'oxydation de la poussière d'uranium libère de la chaleur), ce qui améliore la létalité contre les cibles derrière un blindage (« effet secondaire »).
Impact environnemental	Avantages : non radioactif, respectueux de l'environnement, pas de risque de pollution à long terme lors du nettoyage d'après-guerre. - Inconvénients : forte consommation d'énergie lors de la fabrication (le frittage nécessite une température élevée) et des traces de Ni peuvent être libérées dans le sol.	Inconvénients : Faiblement radioactif (demi-vie de l'U-238 : 4,47 milliards d'années, principalement des particules alpha), produit de la poussière d'oxyde d'uranium après impact, présente une toxicité chimique et un faible risque de radiation. Avantages : Faible pollution lors du processus de fabrication.
Sécurité	Sécurité de production : aucun risque de radiation, mais la métallurgie des poudres doit éviter l'inhalation de poussières de tungstène (norme de santé au travail < 5 mg/m³). Sécurité d'utilisation : aucun résidu toxique, adapté aux champs de	Sécurité de production : Une radioprotection stricte est requise (protection contre les rayons gamma et les particules alpha), et les travailleurs doivent porter des vêtements de protection. Sécurité d'utilisation : La

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Dimensions de comparaison	Balle perforante en tungstène (alliage W-Ni-Fe)	Perforant l'armure en uranium appauvri (DU, alliage U-0,75Ti)
	bataille conventionnels.	poussière d'uranium laissée par la guerre est toxique et une exposition prolongée peut provoquer un cancer (risque faible, environ 0,1 à 1 mSv/an).
coût	Coût des matières premières : Le prix du tungstène fluctue considérablement (environ 30 à 50 USD/kg, estimé en 2025). Le Ni/Fe est bon marché, mais la quantité totale est élevée. - Coût de fabrication : Le processus est complexe et la consommation d'énergie est élevée. Le coût d'un seul noyau de projectile est d'environ 500 à 800 USD (120 mm).	Coût des matières premières : L'uranium appauvri est un sous-produit de l'industrie nucléaire et son coût est faible (environ 5 à 10 $/kg). Coût de fabrication : Le processus de fusion et de moulage est simple, mais des installations de radioprotection sont nécessaires, et le coût d'une seule pièce est d'environ 300 à 500 $ (120 mm).
Disponibilité	Le tungstène est une ressource stratégique avec des réserves abondantes dans le monde entier (la Chine en représente plus de 60 %) et un approvisionnement stable, mais il nécessite une technologie de purification et de traitement élevée.	L'uranium appauvri dépend des déchets industriels nucléaires, dispose d'un approvisionnement limité (principalement contrôlé par des puissances nucléaires comme les États-Unis et la Russie) et nécessite une approbation réglementaire internationale (comme la supervision de l'AIEA).
Scénario d'application	Il est largement utilisé dans la guerre conventionnelle, comme les canons de char (remplacement du M829A1) et les missiles anti-blindés, et convient aux pays ayant des exigences élevées en matière de protection de l'environnement (comme l'Allemagne et la Suisse).	Il est principalement utilisé par les grands pays (comme la série américaine M829 et la série russe 3BM42), en particulier dans les scénarios qui nécessitent des destructions à fort effet (comme les blindages anti-infanterie).
Tendances technologiques	Direction d'optimisation : Améliorer la ténacité et réduire la fracture grâce à la poudre de nano-tungstène (D50<100 nm) ou à la structure à gradient ; développer des matériaux composites à base de tungstène (tels que le W-TiC) pour améliorer la pénétration.	Orientation d'optimisation : dopage avec d'autres éléments (tels que Mo, 1-2 % en poids) pour augmenter la dureté ; développement d'alternatives à faible radioactivité (telles que les alliages U-Zr) pour réduire la controverse environnementale.
Évaluation complète	Avantages : dureté élevée, non toxique, respectueux de l'environnement, adapté aux exigences de protection de	Avantages : effet auto-affûtant et effet de brûlure importants, forte pénétration et létalité, faible coût. Inconvénients :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Dimensions de comparaison	Balle perforante en tungstène (alliage W-Ni-Fe)	Perforant l'armure en uranium appauvri (DU, alliage U-0,75Ti)
	l'environnement de la guerre moderne. Inconvénients : absence d'auto-affûtage, profondeur de pénétration et effet secondaire inférieurs à ceux de l'uranium appauvri.	radioactivité et toxicité limitant son utilisation, grande sensibilité politique.

14.1.7 Procédé et caractéristiques de production de tiges forgées rotatives en alliage de tungstène

La tige forgée rotative en alliage de tungstène est un élément important du noyau des projectiles perforants. Sa haute précision, sa densité élevée et sa résistance élevée reposent sur les avantages uniques de la technologie du forgeage rotatif. Voici son procédé de préparation et ses caractéristiques techniques :

Processus de production de tiges forgées rotatives en alliage de tungstène

Préparation des matières premières

Français La poudre de tungstène de haute pureté (D50 = 1-5 μm, pureté > 99,98 % en poids, O < 0,01 % en poids), la poudre de Ni (D50 = 5-10 μm) et la poudre de Fe (D50 = 5-15 μm) ont été sélectionnées avec un rapport W:Ni:Fe = 90-93:5-7:2-3. Broyage planétaire à billes (300 tr/min, 12-20 h, mélange humide avec de l'éthanol, rapport billes/matériau 5:1), séchage (80-100 °C, vide < 10 Pa) et tamisage (200 mesh).

formage de flans

Les ébauches cylindriques (φ 50-100 mm, longueur 200-300 mm) sont préparées par pressage isostatique à froid (250-300 MPa, maintien de la pression 3-5 min), avec une densité ≈ 60-70 % de la valeur théorique. L'extrusion de poudre (500-700 MPa, 400-600 °C) est également utilisée pour préparer les ébauches crues (φ 30-50 mm).

Pré-frittage

- le frittage (1000-1200°C, chauffage 5°C/min, maintien 1-2 h) en atmosphère H_2 (point de rosée < -50°C) élimine l'humidité et les matières volatiles, et la densité du corps vert augmente à 80-85%.

Frittage en phase liquide

Four tubulaire ou four à vide (1450-1550°C, H_2 ou <10^{-3}Pa, chauffage 5-10°C/min, maintien 2-4 h), masse volumique >98% (17,5-18,5 g/cm³). Vitesse de refroidissement 5-10°C/min, éviter la concentration de contraintes.

Forgeage rotatif

équipement

Machine de forgeage rotative à trois ou quatre rouleaux (puissance 50-100 kW, vitesse 100-300 tr/min).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Paramètres du processus

La billette est chauffée à 1000-1200°C (température de maintien pendant 30-60 min, protection N_2), la température de forgeage est de 800-1000°C, la quantité de déformation de chaque passe est de 10-20%, la déformation cumulée est de 50-70%, et la barre finale est φ 10-20 mm et 300-500 mm de long.

lubrifiant

Lubrifiant MoS_2 ou graphite haute température pour réduire le frottement (coefficient de frottement < 0,1).

Traitement thermique

Le recuit (1000-1100°C, N_2, 1-2 h, refroidissement du four) élimine l'écrouissage et ajuste la taille des grains à 10-30 μm.

F inition

Tournage (vitesse 150-200 tr/min, avance 0,1-0,2 mm/r), polissage (Ra <0,3 μm), tolérance dimensionnelle ±0,05 mm.

Caractéristiques techniques

Haute densité et uniformité : le forgeage rotatif élimine la porosité grâce à une extrusion multidirectionnelle, une densité > 99 %, les grains sont étirés axialement (rapport d'aspect 3:1-5:1) et la résistance à la traction est augmentée (σ_b > 1200 MPa).

Excellentes propriétés mécaniques

Sous déformation dynamique ($\dot{\varepsilon} \approx 10^4\ s^{-1}$), les bandes de cisaillement sont plus fines (largeur 3-8 μm), l'effet d'auto-affûtage est renforcé de 10 à 15 % et la pénétration est augmentée de 5 à 10 %.

Précision dimensionnelle

L'écart de diamètre de la tige de forgeage rotative est < 0,1 mm et la tolérance de longueur est de ± 1 mm, ce qui répond aux exigences de haute précision du noyau.

Défis du processus

Le traitement à haute température nécessite un contrôle précis de la température (±10°C) pour éviter une taille de grain excessive ou une oxydation de surface ; une déformation de forgeage rotative excessive (>20%) peut facilement provoquer des microfissures (profondeur <50 μm).

Avantages et limites

Comparées aux tiges frittées traditionnelles, les tiges forgées rotatives présentent une résistance et une ténacité accrues de 15 à 20 %, mais l'investissement en équipement est élevé (environ 5 à 10 millions de yuans/unité) et le cycle de production est long (5 à 7 jours pour un seul lot). À l'avenir, le processus pourra être raccourci et l'efficacité améliorée grâce au frittage rapide et au forgeage rotatif automatisé.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Tiges forgées rotatives en alliage de tungstène

Nation	Norme n°	Champ d'application	Exigences relatives aux ingrédients	Paramètres de performance	Exigences de traitement
USA	ASTM B777-15	Les tiges en alliage de tungstène haute densité, y compris les tiges de forgeage rotatives, sont utilisées dans l'aérospatiale, l'armée, le blindage contre les radiations médicales et d'autres applications.	La teneur en tungstène est de 90 % à 97 % (classée en quatre catégories : classe 1 à 4), le liant est Ni-Fe ou Ni-Cu, et une version magnétique ou non magnétique est disponible.	Densité 17,0 à 18,5 g/cm³, résistance à la traction 620 à 1000 MPa, allongement 2% à 15%, dureté 24 à 35 HRC.	Un soulagement des contraintes est requis après le forgeage rotatif, la rugosité de surface Ra≤1,6 µm, la tolérance dimensionnelle est de ±0,002 pouces et elle répond aux exigences de forme quasi nette.
USA Norme militaire	MIL-T-21014D	Les tiges en alliage de tungstène militaire conviennent aux composants hautes performances tels que les noyaux perforants et les contrepoids.	La teneur en tungstène est de 90 % à 97 %, le liant Ni-Fe ou Ni-Cu et la teneur en impuretés (telles que C, O) sont strictement contrôlées (< 0,01 %).	Densité 17,0 à 18,5 g/cm³, résistance à la traction ≥ 758 MPa, allongement ≥ 5 %, dureté 25 à 40 HRC, la ténacité aux chocs doit être testée.	Après le forgeage rotatif, un traitement thermique (recuit ou trempe) est requis, la tolérance dimensionnelle est de ± 0,001 pouce et il n'y a pas de fissure ou de couche d'oxyde sur la surface.
internationalité aviation	SMA 7725E	Les tiges en alliage de tungstène pour applications aérospatiales conviennent aux contrepoids et aux composants d'amortissement des vibrations.	Teneur en tungstène de 90% à 97%, Ni-Fe ou Ni-Cu, doit répondre à des exigences non magnétiques (perméabilité magnétique <1,05) ou à des exigences magnétiques.	Densité 17,0 à 18,5 g/cm³, résistance à la traction 700 à 1100 MPa, allongement 3% à 20%, performance en fatigue à vérifier.	Après le forgeage rotatif, un usinage de précision est requis, avec une finition de surface de Ra≤0,8 µm et une tolérance dimensionnelle de ±0,001 pouce, et il doit être conforme à la certification du système qualité AS9100.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nation	Norme n°	Champ d'application	Exigences relatives aux ingrédients	Paramètres de performance	Exigences de traitement
Chine	GB/T 26038-2020	Les barres en alliage haute densité à base de tungstène, y compris les barres de forgeage rotatives, sont utilisées dans les domaines militaire, aéronautique, des contrepoids industriels et d'autres domaines.	La teneur en tungstène est de 88 % à 98 %, le liant est Ni-Fe, Ni-Cu ou Co, et les impuretés (telles que S, P) sont < 0,02 %.	Densité 16,5 à 18,75 g/cm³, résistance à la traction 600 à 950 MPa, allongement 2% à 25%, dureté 20 à 38 HRC.	Un traitement thermique est requis après le forgeage rotatif (frittage sous atmosphère d'hydrogène suivi d'un forgeage rotatif), une rugosité de surface Ra≤1,6 µm, une tolérance dimensionnelle ±0,05 mm et aucun défaut interne.
Europe FR	EN ISO 24373	Les tiges en alliage de tungstène conviennent au soudage, aux contrepoids et aux composants à haute température, mettant l'accent sur les performances de traitement et la cohérence.	La teneur en tungstène est de 90 % à 95 %, le liant est Ni-Fe ou Ni-Cu, il doit être conforme aux exigences de protection de l'environnement RoHS et la teneur en métaux lourds tels que Pb et Cd est < 0,01 %.	Densité 17,0 à 18,0 g/cm³, résistance à la traction 650 à 900 MPa, allongement 5% à 15%, dureté 25 à 35 HRC.	Un recuit est nécessaire après le forgeage rotatif, la rugosité de surface Ra≤1,2 µm, la tolérance dimensionnelle est de ±0,02 mm et un contrôle par ultrasons est nécessaire pour garantir l'absence de fissures.
Japon	JIS H 4463	Les tiges en alliage de tungstène conviennent aux domaines de l'électronique, de l'aérospatiale et des instruments de précision, mettant l'accent sur une pureté élevée et une résistance à la	La teneur en tungstène est de 90 % à 97 %, le liant est Ni-Fe ou Ni-Cu, les impuretés (telles que O, N) sont < 0,005 % et une poudre de tungstène de haute pureté (> 99,95 %) est requise.	Densité 17,0 à 18,5 g/cm³, résistance à la traction 700 à 1000 MPa, allongement 3% à 18%, dureté 25 à 36 HRC.	Après le forgeage rotatif, un polissage ou un meulage est nécessaire, la rugosité de surface Ra≤0,4 µm, la tolérance dimensionnelle est de ±0,01 mm et la qualité interne doit être inspectée par rayons X.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nation	Norme n°	Champ d'application	Exigences relatives aux ingrédients	Paramètres de performance	Exigences de traitement
		corrosion.			
Russie	GOST 19658-81	Les tiges en alliage de tungstène conviennent aux domaines militaires et des machines lourdes, mettant l'accent sur la résistance à l'usure et les performances à haute température.	La teneur en tungstène est de 89 % à 96 %, le liant est Ni-Fe ou Co et les impuretés (telles que Si, Al) sont < 0,03 %.	Densité 16,8 à 18,3 g/cm³, résistance à la traction 650 à 950 MPa, allongement 5% à 20%, dureté 24 à 38 HRC.	Après le forgeage rotatif, un traitement thermique (sous vide ou atmosphère inerte) est requis, une rugosité de surface Ra≤2,0 μm, une tolérance dimensionnelle ±0,05 mm et un test de résistance à la corrosion sont requis.

Annexe :

Comparaison des normes américaines ASTM B777-15, MIL-T-21014D, AMS 7725E

1. ASTM B777-15 : Spécification standard pour les métaux à base de tungstène et à haute densité

Aperçu

La norme ASTM B777-15, élaborée par l'American Society for Testing and Materials (ASTM), s'applique aux barres, plaques et autres produits façonnés en alliages de tungstène haute densité, y compris les barres embouties. Elle définit quatre classes (1 à 4) d'alliages de tungstène, couvrant la composition, les propriétés mécaniques, la densité et les exigences d'essai. Ces alliages sont adaptés aux contrepoids aérospatiaux, aux blindages anti-radiations et aux composants militaires.

Champ d'application

Cette norme spécifie les exigences relatives aux métaux à base de tungstène à haute densité usinables et s'applique aux produits fabriqués par métallurgie des poudres. En tant que forme courante, les tiges de forgeage rotatives doivent satisfaire aux exigences de la norme en matière de dimensions, de performances et de qualité.

La

norme de classification des matériaux divise les alliages de tungstène en quatre catégories, en fonction de la teneur en tungstène et de la densité :

Classe 1 : Teneur en tungstène 90 % en poids, densité 16,85-17,25 g/cm³.

Classe 2 : Teneur en tungstène 92,5 % en poids, densité 17,15-17,85 g/cm³.

Classe 3 : Teneur en tungstène 95 % en poids, densité 17,75-18,35 g/cm³.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Classe 4 : Teneur en tungstène 97 % en poids, densité 18,25-18,85 g/cm³.
Chaque type est divisé en deux types : magnétique (liant Ni-Fe) et non magnétique (liant Ni-Cu).

Composition chimique
Le tungstène (W) est le composant principal et les liants sont le nickel (Ni) et le fer (Fe) ou le nickel (Ni) et le cuivre (Cu).
Exigences en matière d'impuretés : carbone (C) < 0,01 % en poids, oxygène (O) < 0,015 % en poids, autres éléments (tels que S, P) < 0,005 % en poids.
Le rapport spécifique du liant n'est pas spécifié, mais il est nécessaire pour garantir que les exigences de densité et de performance sont respectées.

Propriétés mécaniques
Résistance à la traction (UTS) :
Classe 1 : ≥ 620 MPa
Classe 2 : ≥ 650 MPa
Classe 3 : ≥ 690 MPa
Classe 4 : ≥ 724 MPa
Élongation:
Classe 1 : ≥ 5 %
Classe 2 : ≥ 4 %
Classe 3 : ≥ 3 %
Classe 4 : ≥ 2 %
Dureté (HRC) :
Classe 1 : 24-28
Classe 2 : 25-30
Classe 3 : 26-32
Classe 4 : 28-35
Les propriétés varient en fonction des conditions de traitement (telles que le recuit).

Propriétés physiques
La plage de densité est la même que ci-dessus et est mesurée par la méthode d'Archimède avec une précision de ± 0,05 g/cm³.
Coefficient de dilatation thermique (CTE) : 4,5-6,5×10^{-6} K^{-1} (selon le liant).

Processus de fabrication
Procédé de métallurgie des poudres : la poudre de tungstène est mélangée à un liant, pressée isostatique à froid (CIP, 200-300 MPa) et frittée (1350-1500°C, H_2 ou atmosphère sous vide).
Les tiges de forgeage rotatives doivent être formées par forgeage rotatif ou étirage pour garantir que la densité est ≥ 98 %.
Un traitement thermique (par exemple un recuit de détente, 800-1000°C) est autorisé pour optimiser les propriétés.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Dimensions et tolérances
Plage de diamètre de tige : 3 mm à 100 mm, longueur ≤ 2000 mm.
Tolérance : diamètre ±0,002 pouce (environ 0,05 mm), longueur ±0,010 pouce (environ 0,25 mm).
Rugosité de surface : Ra≤1,6 μm.

Inspection et réception
Analyse chimique : l'ICP-MS ou le XRF sont utilisés pour détecter la composition.
Essais mécaniques : Réalisés selon les normes ASTM E8 (essai de traction) et ASTM E18 (essai de dureté).
Test de densité : Selon ASTM B311.
Contrôle non destructif : Contrôle par ultrasons (UT) pour détecter les défauts internes, taille des défauts < 0,5 mm.
Certificat : Un certificat de conformité du matériel (CoC) est requis.

Emballage et étiquetage
L'emballage doit être résistant à l'humidité et aux chocs, et les marquages doivent inclure le numéro de lot, la catégorie (classe), le type magnétique et les informations du fabricant.

2. MIL-T-21014D : Métal à base de tungstène, haute densité (annulé, mais toujours de valeur de référence)

Aperçu
La norme MIL-T-21014D est une norme militaire américaine, établie en 1986, révisée en 1991 et annulée le 5 octobre 1998. La norme SAE-AMS-T-21014 (remplacée ultérieurement par la norme ASTM B777) est recommandée. Bien qu'elle ait été annulée, de nombreuses conceptions anciennes font encore référence à cette norme et sont applicables aux produits militaires en alliage de tungstène (tels que les noyaux perforants et les contrepoids).

Champ d'application :
Il spécifie les exigences relatives aux métaux à base de tungstène à haute densité, adaptés aux tiges embouties militaires et autres produits façonnés, en mettant l'accent sur la résistance aux chocs et la cohérence.

Classification des matériaux
Classe A : Teneur en tungstène 90 % en poids, densité 16,9-17,1 g/cm³.
Classe B : Teneur en tungstène 92,5 % en poids, densité 17,4-17,6 g/cm³.
Classe C : Teneur en tungstène 95 % en poids, densité 17,9-18,1 g/cm³.
Classe D : Teneur en tungstène 97 % en poids, densité 18,4-18,6 g/cm³.
Il existe deux types : magnétique (Ni-Fe) et non magnétique (Ni-Cu).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Composition chimique
La teneur en tungstène est la même que ci-dessus et le liant est Ni-Fe ou Ni-Cu.
Limites d'impuretés : C<0,01 % en poids, O<0,01 % en poids, H<0,005 % en poids, N<0,005 % en poids.

Propriétés mécaniques
résistance à la traction:
Classe A : ≥ 758 MPa
Classe B : ≥ 793 MPa
Classe C : ≥ 827 MPa
Classe D : ≥ 862 MPa
Élongation:
Classe A : ≥ 5 %
Classe B : ≥ 4 %
Classe C : ≥ 3 %
Classe D : ≥ 2 %
Dureté (HRC) :
Classe A : 25-30
Classe B : 26-32
Classe C : 28-35
Classe D : 30-40
Résistance aux chocs : Doit réussir le test de choc Charpy (valeur spécifique précisée par l'acheteur).

Propriétés physiques
La densité est la même que ci-dessus et doit être mesurée avec précision.
Résistance à la corrosion : Doit réussir le test au brouillard salin (MIL-STD-810).

Processus de fabrication
Procédé de métallurgie des poudres, forgeage rotatif après frittage.
Exigences de traitement thermique : Recuit (850-950°C, atmosphère inerte) ou trempe (selon l'application).
Densité ≥ 99 %, aucun pore ou fissure interne n'est autorisé.

Dimensions et tolérances
La tolérance de diamètre est de ±0,001 pouce (environ 0,025 mm) et la tolérance de longueur est de ±0,005 pouce (environ 0,13 mm).
Rugosité de surface : Ra≤2,0 μm.

Inspection et réception
Analyse chimique : analyse spectrale.
Essais mécaniques : essais de traction, de dureté, d'impact.
Contrôles non destructifs : Ultrasons et rayons X pour garantir l'absence de défauts internes (< 0,3 mm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Acceptation militaire : doit être conforme à l'inspection par échantillonnage MIL-STD-105.

Emballage et étiquetage
Emballage antirouille, les marquages comprennent le numéro de norme militaire, le lot et la catégorie.
Remarque
Bien que la norme MIL-T-21014D ait été annulée, ses exigences sont très similaires à celles de l'ASTM B777, mais elle offre un contrôle plus strict sur la résistance aux chocs et les impuretés et convient aux premières conceptions militaires.

3. AMS 7725E : Formes en alliage lourd de tungstène, fritté, haute densité

Aperçu
La norme AMS 7725E a été développée par l'American Institute of Aeronautics and Astronautics (SAE) pour les produits en alliage de tungstène haute densité destinés aux applications aérospatiales, notamment les tiges embouties. Cette norme met l'accent sur les options non magnétiques et la résistance à la fatigue. Sa dernière version, l'AMS 7725E (révisée en 2016), est la suivante :

Champ d'application :
Il convient aux produits en alliage de tungstène haute densité fritté (tels que les tiges et les plaques), utilisés dans les contrepoids, les amortisseurs, etc. de l'aviation.

Classification des matériaux
Classe 1 : Teneur en tungstène 90 % en poids, densité 16,85-17,25 g/cm³.
Classe 2 : Teneur en tungstène 92,5 % en poids, densité 17,15-17,85 g/cm³.
Classe 3 : Teneur en tungstène 95 % en poids, densité 17,75-18,35 g/cm³.
Classe 4 : Teneur en tungstène 97 % en poids, densité 18,25-18,85 g/cm³.

taper:
Type 1 : Non magnétique (liant Ni-Cu, perméabilité magnétique < 1,05).
Type 2 : Magnétique (liant Ni-Fe).
Alimentation par défaut : Classe 1, Type 2 est fournie lorsqu'elle n'est pas spécifiée.

Composition chimique
La teneur en tungstène est la même que ci-dessus et le liant est Ni-Fe ou Ni-Cu.
Impuretés : C<0,01 % en poids, O<0,01 % en poids, autres<0,005 % en poids.
Propriétés mécaniques
résistance à la traction:
Classe 1 : ≥ 700 MPa
Classe 2 : ≥ 724 MPa
Classe 3 : ≥ 758 MPa
Classe 4 : ≥ 793 MPa

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Élongation:
Classe 1 : ≥ 5 %
Classe 2 : ≥ 4 %
Classe 3 : ≥ 3 %
Classe 4 : ≥ 2 %
Dureté (HRC) :
Classe 1 : 24-30
Classe 2 : 25-32
Classe 3 : 26-34
Classe 4 : 28-36
Performance en fatigue : Nécessite de réussir le test de fatigue cyclique (10^7 fois, σ_max=50% UTS).

Propriétés physiques
Densité comme ci-dessus, précision de mesure ± 0,05 g/cm³.
Exigences non magnétiques : perméabilité magnétique < 1,05 (Type 1).

Processus de fabrication
Frittage par métallurgie des poudres suivi d'un forgeage rotatif.
Recuit optionnel (sous vide, 900-1100°C) pour augmenter l'allongement.
Densité ≥ 98,5 %, aucune couche d'oxyde en surface.

Dimensions et tolérances
La tolérance de diamètre est de ±0,001 pouce (environ 0,025 mm) et la tolérance de longueur est de ±0,005 pouce (environ 0,13 mm).
Rugosité de surface : Ra≤0,8 μm.

Inspection et réception
Analyse chimique : ICP ou XRF.
Essais mécaniques : ASTM E8 (traction), ASTM E18 (dureté), AMS 2750 (fatigue).
Contrôle non destructif : Ultrasons (AMS-STD-2154), défauts < 0,3 mm.
Certification de qualité : Doit être conforme au système de qualité aéronautique AS9100.
Emballage et étiquetage
Emballage résistant à l'humidité et aux chocs, avec marquages incluant le numéro AMS, la catégorie, le type et le lot.

Comparaison et explication supplémentaire des trois

1. Différences dans le champ d'application
ASTM B777-15 : Norme générale, couvrant les domaines industriels et civils, les tiges de forgeage rotatives sont largement utilisées.
MIL-T-21014D : Norme militaire (annulée), mettant l'accent sur les performances d'impact, adaptée aux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

débuts de l'industrie militaire.

AMS 7725E : Spécialement utilisé pour l'aérospatiale, en se concentrant sur les propriétés non magnétiques et de fatigue.

2. Classification et type

Les quatre catégories des normes ASTM B777 et AMS 7725E sont cohérentes, mais AMS distingue clairement le type 1 (non magnétique) du type 2 (magnétique). La norme MIL-T-21014D utilise une classification AD, légèrement différente.

3. Exigences de performance

La norme ASTM B777 a les exigences les plus basses, la norme MIL-T-21014D a des exigences plus élevées en matière de résistance à la traction et de résistance aux chocs, et la norme AMS 7725E ajoute des tests de fatigue pour les applications aérospatiales.

4. Traitement et test

Les trois nécessitent une métallurgie des poudres et un forgeage rotatif, mais l'AMS 7725E présente la rugosité de surface la plus stricte (Ra ≤ 0,8 μm) et la tolérance (± 0,001 pouce), tandis que le MIL-T-21014D se concentre sur la résistance à la corrosion.

5. Situation actuelle

La norme MIL-T-21014D a été annulée en 1998 et remplacée par l'AMS-T-21014 (annulée en 2008), puis finalement unifiée à la norme ASTM B777. Dans le cadre des marchés publics, les normes ASTM B777 et AMS 7725E sont les normes actuelles.

Annexe :

Norme nationale chinoise GB/T 26038-2020 « Tiges en alliage haute densité à base de tungstène »

Cette norme a été publiée par l'Administration chinoise de normalisation et est entrée en vigueur le 14 décembre 2020. Elle s'applique aux tiges en alliage haute densité à base de tungstène produites par métallurgie des poudres, y compris les tiges forgées rotatives. Elle couvre la composition, les performances, les exigences de traitement, les méthodes d'essai, etc. et est principalement utilisée dans les secteurs militaire, aérospatial, des contrepoids industriels et autres. La norme originale étant protégée par le droit d'auteur, je fournirai des informations complètes sous forme de résumé et d'explications détaillées afin de garantir son exactitude et sa praticabilité.

GB/T 26038-2020 : Tiges en alliage lourd à base de tungstène

Aperçu

La norme GB/T 26038-2020 est une norme nationale recommandée (« T » indique une recommandation). Elle spécifie la classification, les exigences techniques, les méthodes d'essai, les règles d'inspection et le conditionnement des barres d'alliage haute densité à base de tungstène. Elle s'applique aux barres d'alliage contenant entre 88 % et 98 % de tungstène, y compris les barres forgées rotatives, et est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

largement utilisée dans les noyaux perforants, les contrepoids, les composants de protection contre les radiations, etc.

Champ d'application :

La présente norme s'applique aux tiges en alliage haute densité à base de tungstène préparées par métallurgie des poudres, notamment les tiges rondes, carrées et autres produits à section transversale. Principales formes, les tiges forgées rotatives doivent répondre aux exigences techniques de la norme et conviennent aux secteurs militaire, aérospatial, de la fabrication de machines et autres.

Termes et définitions

Alliage lourd à base de tungstène

Alliage avec du tungstène comme matrice (teneur ≥ 88 % en poids) et des liants tels que le nickel (Ni), le fer (Fe), le cuivre (Cu) ou le cobalt (Co) ajoutés, qui présente les caractéristiques d'une densité élevée et d'une résistance élevée.

Tige de forge rotative

Les tiges formées par forgeage rotatif ont une densité et une uniformité plus élevées.

Classification et marque

Selon la teneur en tungstène et la densité, il est divisé en cinq catégories :

W88 : Teneur en tungstène 88±1 % en poids, densité 16,5-16,9 g/cm³.

W90 : Teneur en tungstène 90±1 % en poids, densité 16,9-17,3 g/cm³.

W93 : Teneur en tungstène 93±1 % en poids, densité 17,3-17,7 g/cm³.

W95 : Teneur en tungstène 95±1 % en poids, densité 17,7-18,1 g/cm³.

W97 : Teneur en tungstène 97±1 % en poids, densité 18,1-18,75 g/cm³.

Le type de liant n'est pas clairement défini et peut être Ni-Fe, Ni-Cu ou Ni-Co, qui est déterminé par négociation entre le fournisseur et l'acheteur.

Composition chimique

Tungstène (W) : La plage de teneur est de 88 % à 98 %, contrôlée selon les exigences de qualité, avec un écart admissible de ± 1 % en poids.

Liant : Nickel (Ni), fer (Fe), cuivre (Cu) ou cobalt (Co), avec une teneur totale de 2% à 12%.

Exigences en matière d'impuretés :

Carbone (C) ≤ 0,02 % en poids

Oxygène (O) ≤ 0,03 % en poids

Soufre (S) ≤ 0,02 % en poids

Phosphore (P) ≤ 0,02 % en poids

Autres impuretés individuelles ≤ 0,01 % en poids, impuretés totales ≤ 0,05 % en poids.

GB/T 26038-2020 Tiges en alliage lourd à base de tungstène - Classification, composition chimique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

catégorie	Paramètres et exigences
Classification et marque	
W88	Teneur en tungstène 88±1% en poids, densité 16,5 à 16,9 g/cm³
W90	Teneur en tungstène 90±1 % en poids, densité 16,9 à 17,3 g/cm³
W93	Teneur en tungstène 93±1 % en poids, densité 17,3 à 17,7 g/cm³
W95	Teneur en tungstène 95±1 % en poids, densité 17,7 à 18,1 g/cm³
W97	Teneur en tungstène 97±1 % en poids, densité 18,1 à 18,75 g/cm³
Type de liant	Pas clairement défini, peut être Ni-Fe, Ni-Cu ou Ni-Co, les détails spécifiques doivent être négociés par le fournisseur et l'acheteur.
Composition chimique	
Tungstène (W)	Gamme de teneur de 88 % à 98 %, contrôlée selon les exigences de qualité, écart admissible ± 1 % en poids
Liant	Nickel (Ni), fer (Fe), cuivre (Cu) ou cobalt (Co), teneur totale de 2 % à 12 %
Exigences en matière d'impuretés	
Carbone (C)	≤ 0,02 % en poids
Oxygène (O)	≤ 0,03 % en poids
Soufre (S)	≤ 0,02 % en poids
Phosphore (P)	≤ 0,02 % en poids
Autres impuretés simples	≤ 0,01 % en poids
Impuretés totales	≤ 0,05 % en poids

Propriétés mécaniques

Tiges en alliage lourd à base de tungstène - Propriétés mécaniques

Marque	Résistance à la traction (σb)	Allongement (δ)	Dureté (HRC)
W88	≥ 600 MPa	≥ 25 %	20 à 25
W90	≥ 650 MPa	≥ 20 %	22 à 28

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Marque	Résistance à la traction (σb)	Allongement (δ)	Dureté (HRC)
W93	≥ 700 MPa	≥ 15 %	25 à 32
W95	≥ 800 MPa	≥ 10 %	28 à 35
W97	≥ 950 MPa	≥ 2%	32 à 38
Remarque	Les données de performance concernent l'état fritté et peuvent être ajustées après forgeage rotatif ou traitement thermique, ce qui doit être négocié entre le fournisseur et l'acheteur.		

Propriétés physiques

densité

Conformément aux exigences de la catégorie, l'écart de valeur mesuré est de ± 0,1 g/cm³.

Conductivité thermique

Environ 150-180 W/(m·K) (valeur de référence, non obligatoire).

Coefficient de dilatation thermique

4,5-6,0×10 $^{-6}$ K $^{-1}$ (valeur de référence).

Apparence et taille

Qualité d'apparence

La surface doit être lisse, exempte de défauts tels que fissures, écailles d'oxyde, inclusions, etc.

De légères marques de traitement sont autorisées mais n'affecteront pas l'utilisation.

Gamme de tailles

Diamètre : 3 mm à 100 mm

Longueur : ≤ 2000 mm

tolérance

Diamètre ≤ 10 mm : ± 0,05 mm

Diamètre > 10 mm : ± 0,1 mm

Longueur : ±2 mm

Rugosité de surface

Ra≤1,6 μm (après forgeage rotatif).

Processus de fabrication

matière première

La pureté de la poudre de tungstène est ≥ 99,95 %, la taille des particules D50 est de 1 à 10 μm et la poudre de liant est du Ni, Fe, Cu ou Co de haute pureté.

Processus

Poudre mélangée : broyage planétaire à billes ou mélange mécanique, uniformité CV<5%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Pressage : Pressage isostatique à froid (CIP, 150-300 MPa).

Frittage : atmosphère d'hydrogène ou de vide, température 1350-1550°C, maintien au chaud pendant 2 à 6 heures, densité ≥98%.

Forgeage rotatif : Le forgeage rotatif à haute température (800-1200°C) augmente la densité et la résistance.

Traitement thermique (facultatif) : Recuit (800-1000°C, atmosphère H_2) pour éliminer les contraintes internes.

Qualité interne

Aucune porosité, délaminage ou fissure, à vérifier par contrôle non destructif.

Méthodes d'essai

Composition chimique

Utiliser la spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES) ou la spectroscopie de fluorescence X (XRF).

densité

Méthode d'Archimède, précision ±0,01 g/ cm^3.

Propriétés mécaniques

Résistance à la traction et allongement

Testé selon GB/T 228.1 (essai de traction des matériaux métalliques).

dureté

Testé selon GB/T 230.1 (test de dureté Rockwell).

Apparence

Inspection visuelle ou observation avec une loupe 10x.

Défauts internes

Contrôle par ultrasons (selon GB/T 4162), taille des défauts < 0,5 mm.

Analyse métallographique

L'observation au microscope a été utilisée pour étudier la taille des grains (5-50 μm) et la distribution des phases.

Règles d'inspection

Inspection d'usine

Chaque lot est inspecté pour sa composition chimique, sa densité, son apparence et sa taille.

Contrôle de type

De nouvelles propriétés mécaniques et des contrôles de qualité internes sont ajoutés, qui sont applicables aux nouveaux produits ou aux changements de processus.

échantillonnage

Elle est réalisée conformément à la norme GB/T 2828.1 (inspection par échantillonnage d'attributs) avec une limite de qualité d'acceptation (NQA) de 1,0.

détermination

Si un article ne répond pas aux normes, le lot entier ne sera pas accepté.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Étiquetage, emballage, transport et stockage

Logo

Le numéro standard (GB/T 26038-2020), le numéro de marque, le numéro de lot de production et le nom du fabricant doivent être marqués sur chaque barre ou emballage.

Emballer

Coffret en bois ou protection plastique, résistant à l'humidité et aux chocs, avec certificat de conformité inclus.

transport

Évitez les chocs et les environnements humides.

Stockage

Conserver dans un entrepôt sec et aéré pour éviter la corrosion acide et alcaline.

assurance qualité

Les fournisseurs sont tenus de fournir des certificats de qualité pour prouver que leurs produits sont conformes à cette norme.

Si l'utilisateur constate des problèmes de qualité après l'acceptation, il peut formuler une objection dans un délai de 3 mois.

Notes supplémentaires

avec les normes internationales et ASTM B777-15 :

La norme GB/T 26038-2020 a une gamme de teneur en tungstène plus large (88 %-98 % contre 90 %-97 %) et ajoute la nuance W88.

L'exigence d'allongement est plus élevée (par exemple 25 % pour W88 contre 5 % pour ASTM Classe 1), ce qui convient aux exigences de ténacité.

Les méthodes de test sont similaires, mais la norme chinoise met davantage l’accent sur les tests par ultrasons de la qualité interne.

Comparé à l'AMS 7725E :

La norme AMS 7725E se concentre sur les exigences non magnétiques pour une utilisation dans l'aviation, tandis que la norme GB/T 26038-2020 ne fait pas clairement la distinction entre les types magnétiques.

L'AMS a des exigences en matière de performance en fatigue, mais la norme GB/T 26038-2020 n'a pas cette exigence.

Fonctionnalités de l'application

Les tiges de forgeage rotatives nécessitent une résistance élevée et une densité élevée (W95/W97) dans les applications militaires (telles que les noyaux de projectiles perforants) et une ténacité élevée (W88/W90) dans les contrepoids (tels que les gyroscopes d'aviation).

La norme est très flexible et les contraintes et les performances peuvent être négociées et ajustées pour répondre aux divers besoins de l'industrie chinoise.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Détails techniques

Le procédé de forgeage rotatif améliore la densité de la tige (jusqu'à 99,5 %), affine la granulométrie (5 à 20 μm) et améliore considérablement la résistance à la traction (10 à 20 % supérieure à l'état fritté).
Le frittage à l'hydrogène garantit une faible teneur en oxygène (< 0,03 % en poids), évitant ainsi la fragilité.

La norme GB/T 26038-2020 est une norme complète qui couvre l'ensemble du processus de fabrication des barres en alliage haute densité à base de tungstène, de la matière première au produit fini, en tenant compte à la fois des performances et de la praticité. Sa large gamme de teneurs en tungstène et sa conception à allongement élevé reflètent les caractéristiques techniques de la Chine dans le domaine des alliages de tungstène et sont particulièrement adaptées à la large application des barres forgées rotatives dans les applications militaires et industrielles.

Annexe :

GB/T 26038-2020 Paramètres de la méthode d'essai pour les barres en alliage lourd à base de tungstène

1. Affinement des paramètres de la méthode d'essai

La norme GB/T 26038-2020 spécifie les méthodes d'essai pour la composition chimique, la masse volumique, les propriétés mécaniques, l'aspect et les défauts internes. Voici les paramètres et les modalités d'utilisation spécifiques à chaque article :

1.1 Analyse de la composition chimique

méthode

Spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES) ou spectroscopie de fluorescence X (XRF).

P aramètre

ICP-OES

instrument

Spectromètre d'émission de plasma haute fréquence (tel que PerkinElmer Optima 8300).

Préparation des échantillons

Prélever 0,5 à 1 g de l'échantillon de tige, le dissoudre dans de l'acide (HNO_3 +HF, rapport volumique 1:1, concentration 65 % et 40 %) et le chauffer jusqu'à dissolution complète (80 à 100 °C, 30 min).

Longueur d'onde de détection

W (207,911 nm), Ni (231,604 nm), Fe (238,204 nm), Cu (324,754 nm), Co (228,616 nm).

Limite de détection

W (0,005 % en poids), impuretés (0,001 % en poids).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Précision

±0,5 % en poids (teneur en W), ±0,01 % en poids (impuretés).

XRF

instrument

Analyseur XRF portable ou de paillasse (tel que le Thermo Fisher Niton XL3t).

Préparation des échantillons

La surface est polie à Ra < 0,8 μm et peut être mesurée directement sans dissolution.

Source d'excitation

Tube à rayons X, 50 kV, 200 μA.

Temps de détection

30-60 s/échantillon.

Précision

±0,5 % en poids (teneur en W), ±0,02 % en poids (impuretés).

Exigences opérationnelles

Des échantillons ont été prélevés au centre et sur le bord de la section transversale de la barre pour assurer l'uniformité ; les résultats ont été moyennés.

1.2 Test de densité

M é thode

Méthode d'Archimède (méthode de déplacement de l'eau).

P aramètre

instrument

Balance électronique de haute précision (précision ±0,001 g), bain-marie à température constante.

Conditions de test

Température de l'eau 20±1°C, densité de l'eau 1.000 g/cm³ (eau pure, filtrée pour éliminer les bulles d'air).

Préparation des échantillons

La tige est tranchée (masse 5-20 g), la surface est nettoyée et dégraissée.

Formule de calcul

ρ = m_air / (m_air - m_eau), où m_air est la masse dans l'air et m_eau est la masse dans l'eau.

Nombre de mesures

Chaque échantillon a été testé 3 fois et la valeur moyenne a été prise.

Précision

±0,01 g/cm³ .

Exigences opérationnelles

Lorsque l'échantillon est suspendu dans l'eau, il ne doit pas toucher la paroi du récipient pour éliminer l'influence des bulles.

1.3 Essai des propriétés mécaniques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Résistance à la traction et allongement

M é thode

Selon GB/T 228.1-2010 « Essai de traction des matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai à température ambiante ».

P aramètre

instrument

Machine d'essai de matériaux universelle (par exemple Instron 5982) avec une plage de charge de 50 à 100 kN.

Préparation des échantillons

Les tiges d'emboutissage rotatives ont été transformées en échantillons standard (type tige ronde, 6 mm de diamètre et 25 mm de longueur de jauge).

Vitesse de test

1 mm/min (charge jusqu'à écoulement), 2 mm/min (après écoulement).

Conditions environnementales

Température 23±5°C, humidité <70%RH.

calculer

Résistance à la traction σb = F_max / A_o (F_max est la force maximale, A_o est la section transversale initiale) ; allongement δ = (L_f - L_o) / L_o × 100 % (L_f est la longueur entre repères après rupture, L_o est la longueur entre repères initiale).

Précision

Résistance ±0,5%, allongement ±0,1%.

Exigences opérationnelles

Prélever 3 échantillons de chaque lot et calculer la valeur moyenne des résultats. Si l'écart est supérieur à 10 %, un nouveau test est nécessaire.

Duret é

méthode

Selon GB/T 230.1-2018 « Essai de dureté Rockwell pour matériaux métalliques - Partie 1 : Méthode d'essai ».

P aramètre

instrument

Testeur de dureté Rockwell (tel que Wilson RH2150).

Conditions de test

Échelle HRC, le pénétrateur est un cône diamanté de 120°, précharge 10 kgf, charge principale 150 kgf.

Préparation des échantillons

La surface a été polie à Ra<0,4 μm et l'épaisseur était >6 mm.

Points de test

5 points par échantillon, > 2,5 mm du bord et > 3 mm entre les points.

Précision

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

±0,5 HRC.

Exigences opérationnelles

La couche superficielle écrouie a été retirée et les résultats ont été moyennés.

1.4 Contrôle de l'apparence

M é thode

Inspection visuelle ou observation avec une loupe 10x.

P aramètre

source de lumière

Lumière blanche, éclairage > 500 lx.

Zone d'examen

Vérifiez toute la surface de la barre, en vous concentrant sur les faces d'extrémité et les faces latérales.

Détermination des défauts

fissure

Toute fissure visible sera rejetée.

tartre d'oxyde

Une surface > 1 mm² ou une profondeur > 0,1 mm est considérée comme inacceptable.

Inclusion

Un diamètre > 0,5 mm n'est pas qualifié.

Exigences opérationnelles

Les inspecteurs doivent porter des lunettes de protection pour éviter de rayer la surface.

1.5 Détection des défauts internes

M é thode

Contrôle par ultrasons (selon GB/T 4162-2008 « Méthode de contrôle par ultrasons pour l'acier forgé »).

P aramètre

instrument

Détecteur de défauts à ultrasons (tel que Olympus EPOCH 650), fréquence 2,5-5 MHz.

Sonde

Sonde droite à ondes longitudinales (diamètre 10-20 mm), type contact.

Couplant

Huile moteur ou glycérine, épaisseur de revêtement 0,1-0,2 mm.

Sensibilité de détection

Sur la base d'un équivalent de trou à fond plat (FBH) de 2 mm, le gain est ajusté à 80 % de la pleine échelle.

Détermination des défauts

Une hauteur d'écho > 50 % ou une longueur > 5 mm est considérée comme non qualifiée.

Plage de balayage

Longueur totale de la tige, par incréments de 5 mm.

Exigences opérationnelles

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

La rugosité de surface de l'échantillon était Ra<3,2 μm et l'instrument a été étalonné avant le test.

1.6 Analyse métallographique

M é thode

Observation au microscope (microscope optique ou MEB).

P aramètre

instrument

Microscope métallographique (tel que Zeiss Axio Observer), grossissement 100-1000 fois.

Préparation des échantillons

Découpe, montage, polissage (Ra<0,05 μm) et gravure (solution de NaOH à 10 %, 30 s).

Contenu de l'observation

Taille des grains

5-50 μm (déterminé selon GB/T 6394).

Distribution de phase

Uniformité des particules de tungstène et cohérence du rapport de liant.

défaut

Porosité, inclusions de scories, fissures.

Précision

Taille des grains ±1 μm.

Exigences opérationnelles

Prélevez 2 échantillons de chaque lot et enregistrez les images et les données de mesure.

14.2 Matériaux de la première paroi de la fusion nucléaire (résistance à la pulvérisation cathodique) (Premiers matériaux de paroi pour la fusion nucléaire : résistance à la pulvérisation cathodique)

14.2.1 Base théorique

Les premiers matériaux de paroi des dispositifs de fusion nucléaire (tels qu'ITER et DEMO) sont confrontés à des défis environnementaux extrêmes, notamment un flux thermique élevé (10-20 MW/m²), la pulvérisation plasma et l'irradiation neutronique. Le tungstène a été sélectionné comme principal matériau candidat en raison de son point de fusion élevé, de son faible rendement de pulvérisation et de sa stabilité thermique. Ses perspectives d'application sont directement liées à la commercialisation de l'énergie de fusion.

Mécanisme de pulvérisation

Rendement de pulvérisation cathodique $Y = (0{,}042 \cdot \alpha \cdot S_n)/(U_s + 0{,}25 \cdot S_n)$, Y du tungstène à H^+/He^+ (E = 100-1000 eV) est ≈ 10^{-3} - 10^{-2} , bien inférieur à Cu (0,1-1) ou Be (0,5-2). L'énergie de liaison de surface U_s ≈ 8,68 eV est supérieure à la plupart des métaux, réduisant le détachement atomique. La simulation de Monte Carlo (SRIM) montre que la profondeur d'implantation de He^+ est ≈ 5-10 nm, et le risque de cloquage doit être pris en compte.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Charge thermique

Le flux thermique transitoire q = k·ΔT/δ, k du tungstène ≈ 174 W/(m·K) (300 K) chute à 100 W/(m·K) (2000 K), et il peut encore maintenir l'intégrité structurelle à 3000 °C. La limite de fatigue thermique est d'environ 10^6 fois (10 MW/m²), dépassant largement celle du Cu (10^4 fois).

Microévolution

Sous irradiation neutronique, le modèle Kinchin-Pease N_d = 0,8·E_d/(2E_th) prédit des boucles de dislocations et des amas de lacunes (1-10 nm), E_th ≈ 40 eV, qui affectent la stabilité à long terme. L'équation de diffusion de chaleur $\partial T/\partial t = (k/\rho C_p)\cdot \nabla^2 T$ décrit la distribution du flux de chaleur.

14.2.2 Méthodes et techniques de contrôle

La préparation du matériau de première paroi en tungstène doit équilibrer la résistance à la pulvérisation cathodique, la résistance à la chaleur et la résistance aux radiations, et la conception du processus doit s'adapter à la géométrie complexe et aux conditions difficiles du réacteur de fusion.

Méthode de mesure

Tungstène pur

La poudre de tungstène (D50 = 1-5 μm, O < 0,005 % en poids) est pressée à chaud (2 000-2 500 °C, 50-100 MPa, H_2, 2-4 h) pour former des plaques (5-20 mm). La projection plasma (Ar/H_2, puissance 30-50 kW, épaisseur 0,5-2 mm) est également adaptée pour couvrir de grandes surfaces.

Alliage

W-Re (Re 1-5 % en poids) ou W-Ta (Ta 1-3 % en poids), poudre mélangée, pressée (200 MPa), frittée sous vide (2200 °C, < 10^{-4} Pa) et laminée en plaques (allongement 10-20 %).

Technologie de contrôle

pureté

W > 99,99 % en poids, C/O < 0,005 % en poids (GD-MS), éviter la ségrégation des joints de grains. Nettoyage par ultrasons (éthanol, 30 min) pour éliminer les impuretés de surface.

Contrôle des grains

Granulométrie 10-50 μm (traitement thermique 1800-2200°C, 1-3 h, refroidissement 5°C/min), trop grande (>100 μm) est sujette à la fissuration, trop petite (<5 μm) la résistance aux chocs thermiques chute de 10-15%. Analyse EBSD de la distribution d'orientation des cristaux (<100> représente <20%).

Tests de performance

Le rendement de pulvérisation cathodique a été mesuré par QCM (±0,01 ng/cm²), la fatigue thermique par faisceau d'électrons (10-20 MW/m², 10^5 -10^6 fois, profondeur de fissure <50 μm) et les dommages par irradiation par TEM (densité de dislocation ±5%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Traitement de surface

Le polissage mécanique (Ra < 0,1 μm), la texturation laser (période 1-10 μm, profondeur 0,5-2 μm) ou le revêtement CVD-WC (épaisseur 5-10 μm) réduisent le gonflement de l'He^+ de 20 à 30 %.

14.2.3 Facteurs d'influence

Énergie incidente

He^+ augmente de 100 eV à 1000 eV, Y augmente de 5 à 10 fois et la rugosité de surface augmente de 20 à 30 %, l'angle de paroi doit être optimisé.

Temp é rature

>2000°C, la recristallisation provoque une croissance des grains de 50 à 100 μm et la résistance aux chocs thermiques diminue de 15 à 20 %, la zone de température de fonctionnement doit donc être contrôlée.

Dose de rayonnement

Flux neutronique > 10^{21} n/cm^2, la dureté augmente de 10 à 15 %, K_IC diminue de 20 à 30 % et les dommages à long terme doivent être évalués.

Angle d'incidence

Lorsque θ augmente de 0° à 60°, Y augmente de 2 à 3 fois, affectant l'uniformité de la pulvérisation.

Impuretés

C > 0,01 % en poids, des particules de WC se forment et Y augmente de 10 à 20 % ; O > 0,01 % en poids, les oxydes réduisent U_s.

Charge thermique cyclique

>10^6 fois, la densité des microfissures augmente de 5 à 10/mm^2 et les joints de grains doivent être renforcés.

Traitement du stress

Lorsque la contrainte résiduelle est > 200 MPa, le taux de croissance des fissures augmente de 15 %.

14.2.4 Cas d'application

Projet ITER (2015)

Première paroi en tungstène pur (grain 20-50 μm, épaisseur 10 mm), Y < 0,01 (He^+, 500 eV), flux thermique 15 MW/m^2, utilisé pour la plaque cible du divertor. Vérification de la fiabilité du tungstène en environnement de fusion.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Wang et al. (2023)

W-Re (Re 3 % en poids), tôle laminée (10 mm), réduction de l'angle Y de 15 %, augmentation de la résistance à la fatigue thermique de 20 %, utilisée pour le prototype DEMO. Le Re améliore la ténacité à haute température.

Li et al. (2024)

W-Ta (Ta 2 % en poids), surface texturée au laser (période 5 μm), réduction de Y de 20 %, propriétés anti-gonflement augmentées de 25 %, optimisant la conception des réacteurs de fusion de nouvelle génération.

14.2.5 Directions d'optimisation

Rapport des éléments du matériau tungstène pour la première paroi de fusion nucléaire (tungstène pur et alliage)

En tant que premier matériau de paroi de la fusion nucléaire, le rapport des éléments du tungstène affecte directement sa résistance à la pulvérisation cathodique, sa résistance à la chaleur et sa résistance aux radiations. Le tungstène pur et ses alliages ont leurs propres applications, et le rapport optimisé doit être conçu en fonction des conditions de fonctionnement spécifiques du réacteur de fusion (telles que l'intensité du flux thermique et le type de plasma).

Tungstène pur (W > 99,99 % en poids)

Caractéristiques du rapport

Les exigences de pureté sont extrêmement élevées et les impuretés (telles que O, C, N) sont contrôlées à < 0,005 % en poids afin d'éviter l'affaiblissement des joints de grains et de réduire le seuil de pulvérisation cathodique. La matière première typique est de la poudre de tungstène de haute pureté (D50 = 1-5 μm), préparée par réduction à l'hydrogène (point de rosée < -50 °C).

Avantages

La stabilité sous des flux de chaleur extrêmes (> 20 MW/m²), le faible rendement de pulvérisation cathodique (Y ≈ 10^{-3} -10^{-2} , He^{+} , 500 eV) réduit les pertes de matière et la conductivité thermique (174 W/(m·K) , 300 K) favorise une évacuation efficace de la chaleur.

Limites

Le tungstène pur a une faible ténacité (K_IC ≈ 5-10 MPa·m^(1/2)) et est facilement cassant sous irradiation (dose de neutrons > 1 dpa, la dureté augmente de 15-20%), ce qui limite son application dans les zones à fortes contraintes.

Optimiser le chemin

L'ajout de traces de terres rares (comme La 0,1 à 0,5 % en poids ou Y 0,1 à 0,3 % en poids) peut améliorer la ténacité de 10 à 15 % grâce au renforcement de la solution solide, tout en conservant des caractéristiques de pureté élevées. Les phases dispersées La_2O_3 ou Y_2O_3 (taille 10 à 50 nm) peuvent fixer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

les dislocations et ralentir le taux de dommages par rayonnement (environ 5 à 10 %).

Alliage de tungstène

Alliage W-Re (Re 1-5 % en poids)

Le Re améliore la ductilité à haute température (l'allongement augmente de 15 à 20 %) et réduit la température de transition fragile (la DBTT passe de 800 °C à 600-700 °C). Le rapport est maintenu à 3-5 % en poids afin d'éviter une teneur excessive en Re (> 10 % en poids), qui entraîne une diminution de la masse volumique (< 19 g/cm³) et une augmentation des coûts.

Alliage W-Ta (Ta 1-3 % en poids)

Ta augmente la résistance aux radiations (augmentation de la densité de dislocations réduite de 10 à 15 %), car son numéro atomique élevé (Z = 73) contribue peu à la diffusion des neutrons, maintenant ainsi le blindage gamma. Ta > 5 % en poids réduit la conductivité thermique (à 150 W/(m·K)).

Alliage WV (V 1-2 % en poids)

Le V améliore la ténacité à basse température (K_IC augmente de 10 à 15 % à 500 °C) et convient à la zone basse température en bordure du divertor. La teneur en V doit être inférieure à 3 % en poids pour éviter la formation d'une phase σ fragile (WV).

Technologie de préparation

L'alliage est réalisé par mécanosynthèse (AM, broyage à billes pendant 20 à 40 h, 300 tr/min) ou par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) pour assurer une répartition uniforme des éléments (CV < 2 %). La température de frittage est de 2 000 à 2 200 °C (vide < 10^{-4} Pa) et l'allongement après laminage est de 10 à 20 %.

Optimiser le chemin

Développer des alliages multi-éléments (par exemple, W-Re-Ta, Re 3 % en poids, Ta 1 % en poids), combinant la ténacité du Re et la résistance aux radiations du Ta, pour améliorer les performances globales de 20 à 25 %. L'ajustement dynamique du rapport (basé sur la surveillance du flux thermique en temps réel) peut être optimisé.

Conception et optimisation de la structure des formes

La forme et la conception structurelle de la première paroi doivent s'adapter à la complexité géométrique du réacteur de fusion (comme le divertor annulaire du tokamak) tout en optimisant la distribution du flux thermique, la résistance à la pulvérisation cathodique et la stabilité mécanique.

Structure de plaque plate

conception

Épaisseur 5-20 mm, surface lisse (Ra < 0,1 μm), utilisé pour la plaque cible du divertor ou le corps de la paroi intérieure. Précision dimensionnelle ± 0,05 mm, évitant la concentration des contraintes.

optimisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

L'introduction de la conception micro-arc (rayon de courbure 50-100 mm) réduit l'angle d'incidence du plasma (θ de 60° à 30-40°), et le rendement de pulvérisation Y est réduit de 20-30 %. La simulation thermique (ANSYS) montre que l'uniformité de la distribution du flux thermique dans la structure de l'arc augmente de 15 %.

Structure poreuse

Conception

Porosité 10-20%, taille des pores 1-50 μm, préparé par métallurgie des poudres (pressage 100-200 MPa, frittage 2000°C) ou frittage laser (SLM, puissance 200-300 W).

Optimisation

La couche poreuse (épaisseur 0,5-1 mm) agit comme une couche sacrificielle pour capturer l'He^+ (profondeur d'implantation 5-10 nm) et réduire le gonflement du substrat de 20-25 %. La conception à gradient de pores (20 % de porosité superficielle, 5 % interne) équilibre la résistance à la pulvérisation cathodique et la conductivité thermique ($\kappa_eff > 150$ W/(m·K)).

Géométrie complexe

Conception

Des structures ondulées (hauteur de pointe 1-2 mm, période 5-10 mm) ou en forme de doigt (diamètre 10-20 mm) sont utilisées dans les zones à flux thermique élevé (comme le haut du divertor).

Optimisation

Les ondulations augmentent la surface de 30 à 40 %, améliorant l'efficacité de la dissipation thermique (q augmenté de 20 %) ; la structure en forme de doigt disperse les contraintes (σ_max diminué de 15 à 20 %), et l'angle (45°-60°) et l'espacement (5-10 mm) sont optimisés grâce à l'analyse par éléments finis (FEA).

Technologie de fabrication

L'impression 3D (SLM ou EBM) permet de produire des structures complexes avec une précision de ± 0,1 mm et une orientation des grains supérieure à 60 % (<110>), ce qui améliore la résistance à la fatigue thermique (durée de vie multipliée par 10^6). La texturation laser de surface (période de 1 à 5 μm) permet de réduire encore le Y de 15 à 20 %.

Caractéristiques et utilisations pratiques

Les propriétés des matériaux de première paroi en tungstène déterminent son utilisation spécifique dans la fusion nucléaire, avec des applications ciblées allant du divertor à la paroi intérieure.

Caract é ristiques

Haute résistance à la pulvérisation

$Y < 0,01$ (He^+, 500 eV), taux de perte de surface < 0,1 μm/an (flux 10^{22} ion /$m^2 \cdot s$), adapté à un fonctionnement à long terme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Résistance à la chaleur

Résiste à un flux thermique transitoire > 3000°C (ELM, 10-20 MW/m², durée 0,1-1 ms), durée de vie en fatigue thermique > 10^6 fois.

Résistance aux radiations

À une dose de neutrons de 1 à 5 dpa, l'augmentation de la dureté est < 15 %, la diminution de K_IC est < 20 % et la structure reste intacte.

Conductivité thermique

100-174 W/(m·K) (300-2000 K), prend en charge l'extraction rapide du flux de chaleur, augmentation de la température < 500 °C (10 MW/m²).

Utilisations pratiques

Plaque cible de dérivation

Le tungstène pur (épaisseur 10-15 mm) résiste à un flux thermique élevé (15-20 MW/m²) et au bombardement He^+ (10^{22} ions/m²·s) pour protéger la paroi principale. Du W-Re (Re 3 % en poids) est utilisé dans la zone périphérique pour améliorer la ténacité.

Revêtement de paroi intérieure

Le W-Ta (Ta 2% en poids, épaisseur 5-10 mm) recouvre la paroi intérieure du tokamak et résiste à l'irradiation neutronique (10^{21} n/cm²) et au faible flux thermique (< 5 MW/m²).

Substrat du canal de refroidissement

Tube de refroidissement intégré en tungstène poreux (porosité 15%) (diamètre 5-10 mm, refroidissement par eau ou refroidissement He, débit 5-10 m/s), tolérance au flux thermique augmentée de 25%.

Vérification des tests

Le divertor ITER (opérationnel en 2025) utilise des plaques cibles en tungstène pur, et le prototype DEMO (objectif 2030) teste des parois composites W-Re/Ta.

Avantages et inconvénients par rapport aux autres matériaux

La comparaison du tungstène avec d'autres matériaux candidats (par exemple, Be, CFC, Mo, CuCrZr) met en évidence ses avantages et ses limites uniques dans la première paroi.

Comparé au béryllium (Be)

Avantages

Le tungstène a un Y beaucoup plus faible (10^{-3} -10^{-2}) que le Be (0,5-2, He^+, 500 eV), un point de fusion (3422 °C contre 1287 °C) plus de deux fois plus élevé et une résistance au flux thermique 5 à 10 fois plus forte. La toxicité du Be et son activation neutronique (générant T_2) limitent son utilisation.

Inconvénients

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Le Be présente une faible densité (1,85 g/cm³ contre 19,25 g/cm³) et ne pèse que 1/10 du tungstène, ce qui le rend adapté aux zones sensibles à la masse. Il présente également une ténacité élevée (K_IC ≈ 20 MPa·m^(1/2)) et n'est pas facilement cassant.

Comparaison avec les composites en fibre de carbone (CFC)

Avantages

Le tungstène ne présente pas de pulvérisation chimique (le CFC génère du CH_4 sous H^+, Y >0,1), a une conductivité thermique 2 à 3 fois plus élevée (174 contre 50 à 100 W/(m·K)) et est très résistant aux chocs thermiques (durée de vie augmentée de 10^5 à 10^6 fois).

Inconvénients

Le CFC a une faible densité (1,8-2,2 g/cm³) et une capacité thermique élevée (C_p ≈ 1,5 J/(g·K) contre 0,13 J/(g·K)), et absorbe plus facilement la chaleur ; il a une bonne aptitude au traitement et peut être transformé en structures complexes.

Comparé au molybdène (Mo)

Avantages

Le tungstène a un point de fusion 800°C plus élevé (3422°C contre 2623°C), un Y 20 à 30 % plus bas (Mo ≈ 0,02-0,05), une densité 90 % plus élevée (19,25 contre 10,2 g/cm³) et une capacité de blindage neutronique plus forte.

Inconvénients

Le Mo coûte 30 à 50 % moins cher (20 à 30 $ contre 50 à 100 $ par kg) et présente une aptitude au traitement légèrement meilleure (allongement de 15 à 20 % contre 5 à 10 %).

Comparaison avec l'alliage cuivre-chrome-zirconium (CuCrZr)

Avantages

Le tungstène est 10 fois plus résistant à la chaleur (point de fusion 3422°C contre 1083°C), a un Y 1 à 2 ordres de grandeur inférieur et est très résistant aux radiations (CuCrZr se ramollit de 20 à 30 % à 1 dpa).

Inconvénients

Le CuCrZr présente une conductivité thermique 2 fois supérieure (400 contre 174 W/(m·K)), ce qui le rend adapté au refroidissement des composants ; et une densité plus faible (8,9 g/cm³), ce qui lui confère un avantage de poids significatif.

En conclusion

Le tungstène est supérieur au Be, au CFC, au Mo et au CuCrZr en termes de résistance à la pulvérisation cathodique et à la chaleur. Il constitue le premier choix pour les flux thermiques et les zones de rayonnement élevés. Cependant, son poids élevé et sa faible ténacité doivent être compensés par des alliages et une conception structurelle. À l'avenir, il pourra être associé à des matériaux légers (comme le CFC) pour améliorer les performances globales.

Annexe :

Cas d'application pratique de la première paroi en métal tungstène pur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

1. JET (Tore européen commun)
Mur de type ITER (ILW)

Arri è re -plan
JET est le plus grand tokamak d'Europe. Depuis 2011, la première paroi, composée de matériaux à base de carbone (CFC), a été remplacée par une paroi entièrement métallique, dite « paroi ITER-Like », dans laquelle le divertor est en tungstène et la paroi principale en béryllium (Be). Des expériences ultérieures ont toutefois exploré la possibilité d'une paroi entièrement en tungstène.

Détails:
Matériau : tungstène de haute pureté (W > 99,95 % en poids), pulvérisé au plasma sous vide (VPS) ou bloc de tungstène solide.
Densité : 19,25 g/cm³ (proche de la valeur théorique).
Point de fusion : 3422°C, convient aux zones à forte charge thermique.
Domaine d'application : plaque cible de divertor, revêtement expérimental de paroi principale.

Performance
Conductivité thermique élevée (environ 170 W/m·K à 300 K).
Faible rendement de pulvérisation (< 10^{-4} pour les ions hydrogène de faible énergie).
Résistance à la traction : environ 600-800 MPa (fritté à température ambiante).
Dureté : environ 400-450 HV.

Technologie
Le divertor adopte une conception monobloc en tungstène et est connecté à un caloduc à base de cuivre par pressage isostatique à chaud (HIP).
La paroi principale est revêtue de VPS-W d'une épaisseur de 200 à 500 μm.

Avantage
Réduit significativement la rétention de tritium (plus de 10 fois moins que les parois en carbone).
Haute résistance à la corrosion, contamination plasma réduite.

D é fi
Problème de fragilité : faible ductilité (allongement à température ambiante < 1%), sujet à la fissuration sous choc thermique.
Un Z élevé (numéro atomique 74), entraînant un refroidissement radiatif, nécessite que la concentration de tungstène dans le plasma soit contrôlée en dessous de 10^{-5} .
Problèmes d'oxydation : lors d'un accident de perte de liquide de refroidissement (LOCA), le taux d'oxydation à 1000 °C atteint $1,4 \times 10^{-2}$ mg/cm $^2 \cdot$ s, ce qui peut libérer du WO_3 volatil.

Résultats expérimentaux
L'opération JET-ILW a montré que le divertor en tungstène pouvait supporter une charge thermique de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

10 MW/m², mais le revêtement en tungstène de la paroi principale fondait localement sur les bords.
Les performances du plasma sont stables, mais une injection de gaz supplémentaire (comme du N_2) est nécessaire pour compenser les pertes de rayonnement du carbone.

2. ITER (Réacteur thermonucléaire expérimental international)
Dérivateur en tungstène et application locale de la première paroi

Arri è re -plan
ITER est le plus grand réacteur tokamak expérimental au monde. Sa première paroi est principalement constituée de béryllium (Be), mais le divertor utilise du tungstène pur. À l'avenir, il est prévu d'explorer une première paroi entièrement en tungstène.

Détails:
Matériau : Tungstène de haute pureté (W > 99,97 % en poids), produit par métallurgie des poudres et forgeage.
Densité : 19,0-19,3 g/ cm³ .
Emplacement de l'application : Cible de déviation.

Performance :
Résistance à la traction : environ 700 MPa (état recuit).
Allongement : environ 2 à 5 % (à 600 °C).
Dureté : environ 400-430 HV.
Conductivité thermique : environ 160 W/m·K (300 K).

Processus:
Conception monobloc en tungstène : chaque monobloc mesure environ 20 × 20 × 10 mm et est relié par des tubes de refroidissement en CuCrZr.
Fabrication : Pressage de poudre (200 MPa), frittage (2200°C, atmosphère H_2), finition par forgeage rotatif.

Avantage :
Point de fusion élevé et faible taux de pulvérisation, adapté aux zones de flux thermique élevé du divertor (> 20 MW/m²).
Faible rétention de tritium, répondant aux exigences de sécurité.

D é fi :
Fatigue thermique : Des chocs thermiques répétés (10 ⁶ cycles) provoquent des microfissures.
Complexité de fabrication : le collage HIP du monolithe et des tubes de refroidissement nécessite un contrôle précis (1200°C, 100 MPa, 2 h).
Irradiation neutronique : les neutrons de 14 MeV provoquent des dommages par déplacement (DPA > 0,5), réduisant la ténacité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Statu quo:
En 2023, il a été décidé d'abandonner le premier mur entièrement en béryllium, et une substitution au tungstène a été envisagée pour certaines zones (encore en cours de vérification).
Les monolithes de tungstène divertor ont été testés avec des charges thermiques élevées (20 MW/m², 1000 cycles).

3. EAST (Tokamak supraconducteur expérimental avancé)
Divertisseur tout tungstène

Arri è re -plan
Le tokamak EAST de Chine a été progressivement modernisé en un divertor entièrement en tungstène depuis 2012 pour étudier la faisabilité d'un premier mur entièrement en tungstène.

Détails:
Matériau : tungstène pur (W > 99,95 % en poids), laminé à chaud et forgé rotatif.
Densité : 19,1-19,3 g/ cm³ .
Domaines d'application : plaque cible de divertor supérieur, revêtement expérimental sur une partie de la paroi principale.

Performance :
Résistance à la traction : environ 650-850 MPa.
Dureté : environ 420 HV.
Conductivité thermique : environ 165 W/m·K.

Processus:
Le divertor est constitué d'une seule pièce de tungstène d'une épaisseur de 10 à 15 mm, collée par HIP avec un tube CuCrZr.
La paroi principale a été revêtue expérimentalement d'une couche de tungstène projetée à froid d'une épaisseur de 100 à 200 μm.

Avantage :
Excellente résistance aux chocs thermiques, capable de supporter une charge thermique de 15 MW/m².
Réduisez les impuretés de carbone et améliorez la pureté du plasma.

D é fi :
Génération de poussière de tungstène : le bombardement de particules à haute énergie provoque un écaillage de la surface.
Contrainte thermique : Fissures initiées par des gradients de température (significatives à >600°C).

Résultats expérimentaux :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

En 2018, le fonctionnement en mode de confinement élevé a été atteint pendant 100 secondes et le divertor en tungstène a fonctionné de manière stable.
Le revêtement principal en tungstène de la paroi s'écaille dans la zone des bords et l'adhérence doit être optimisée.

4. DÉMO (Démonstration d'un réacteur à fusion)
Conception du premier mur en tungstène

Contexte : DEMO est une centrale de fusion de démonstration après ITER, qui prévoit d'utiliser une première paroi entièrement en tungstène pour faire face à des charges thermiques et à un flux de neutrons plus élevés.

Détails:
Matériaux : Tungstène pur (W > 99,98 % en poids), le tungstène nanostructuré est considéré comme améliorant la ténacité.
Densité : 19,2-19,35 g/ cm^3 .
Zone d'application : L'ensemble du premier mur et du divertor.

Performance :
Résistance à la traction : environ 800 MPa (laminé à chaud).
Allongement : environ 1 à 3 % (température ambiante).
Dureté : environ 450 HV.
Conductivité thermique : environ 170 W/m·K.

Processus:
Il est prévu de produire des plaques de tungstène de grande taille en utilisant la fabrication additive (AM, comme LPBF) ou le forgeage rotatif.
Avec substrat en acier EUROFER par collage par diffusion ou FAST (Field Assisted Sintering).

Avantage :
Haute résistance thermique, pouvant supporter une charge thermique moyenne de 5 à 10 MW/m^2.
Tendance à faible activation (principalement des produits d'activation à court terme).

D é fi :
Risque d'oxydation : En cas d'APRC, 10 à 150 kg/h de WO_3 sont libérés à 1000°C.
Dommages neutroniques : 20 à 50 DPA sont attendus, ce qui entraîne une augmentation de la température de transition ductile-fragile (DBTT) au-dessus de 500 °C.
Coût de fabrication : les plaques de tungstène de grande surface sont difficiles à traiter.

Solution:
Développer des « alliages intelligents » (tels que W-Cr-Y) qui forment une couche auto-passivante à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

haute température.
Optimisation de la microstructure : le tungstène nanocristallin réduit le DBTT.

Boîtier de première paroi en alliage tungstène-cuivre

1. ITER - Alliage tungstène-cuivre comme couche de transition du divertor

arrière-plan:
Dans la conception du divertor ITER, l'alliage tungstène-cuivre (W-Cu) est utilisé comme couche de transition entre le monolithe de tungstène et le tube de refroidissement CuCrZr.

Détails:
Matériau : W-30Cu (70 % en poids W, 30 % en poids Cu), préparé par la méthode d'infiltration de cuivre.
Densité : environ 15,5-16,0 g/cm³.
Emplacement d'application : couche de dissipateur thermique entre le monolithe de tungstène et le tube CuCrZr.

performance:
Résistance à la traction : environ 400-500 MPa.
Conductivité thermique : environ 200-250 W/m·K (meilleure que le tungstène pur).
Dureté : environ 200-250 HV.
Allongement : environ 5 à 10 %.

Processus:
Frittage de squelette de tungstène (1350°C, atmosphère H_2), infiltration de cuivre liquide (1200°C, vide).
Collage HIP (1000°C, 100 MPa, 2 h).

avantage:
Conductivité thermique élevée, atténuant le décalage de dilatation thermique entre le tungstène et le CuCrZr (CTE : W 4,5×10 $^{-6}$ K $^{-1}$, Cu 17×10 $^{-6}$ K $^{-1}$).
Meilleure ténacité et fissures d'interface réduites.

défi:
Le cuivre a un point de fusion bas (1085°C) et peut se ramollir à des températures élevées.
Sous irradiation neutronique, le cuivre est activé pour générer du Cu-64 (demi-vie 12,7 h).

statu quo:
Il a réussi le test de fatigue thermique (20 MW/m², 1000 fois) et est largement utilisé dans les composants de divertor.

2. FNSF (Fusion Nuclear Science Facility)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Première paroi composite tungstène-cuivre

arrière-plan:
FNSF est une installation d'essai de source de neutrons proposée aux États-Unis, conçue pour explorer les alliages tungstène-cuivre comme matériaux de première paroi.

Détails:
Matériau : W-20Cu (80 % en poids W, 20 % en poids Cu), préparé par métallurgie des poudres.
Densité : environ 16,5-17,0 g/cm³.
Lieu d'application : Premier panneau mural.

performance:
Résistance à la traction : environ 500-600 MPa.
Conductivité thermique : environ 220 W/m·K.
Dureté : environ 250-300 HV.

Processus:
Mélange de poudres (poudres de W et de Cu, broyage à boulets pendant 10 h), pressage isostatique à froid (200 MPa) et frittage (1300°C, atmosphère d'Ar).
Forgeage rotatif, surface polie (Ra < 1,0 μm).

avantage:
Équilibre le point de fusion élevé (tungstène) et la conductivité thermique élevée (cuivre), adapté aux charges thermiques moyennes à élevées (5-15 MW/m²).
Fragilité améliorée, plus résistant aux chocs thermiques que le tungstène pur.

défi:
Activation et gonflement du cuivre sous flux de neutrons (évident à >10 DPA).
L'interface tungstène-cuivre peut se délaminer à des températures élevées.

Solution:
L'ajout de traces de ZrC ou de SiC améliore la liaison de l'interface.
La teneur en cuivre (15-25 % en poids) est optimisée pour équilibrer les propriétés.

3. DÉMO

Matériau à gradient fonctionnel (FGM) en tungstène et cuivre de première paroi

arrière-plan:
Le matériau à gradient fonctionnel tungstène-cuivre (FGM) a été proposé comme premier candidat de paroi dans la conception DEMO pour répondre aux problèmes de contrainte thermique et de dommages neutroniques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Détails:
Matériau : W/Cu FGM, gradient de teneur en tungstène de 100 % (surface) à 0 % (substrat, connecté à CuCrZr).
Densité : surface 19,25 g/cm³ , base 16,0 g/cm³ (gradient).
Zone d'application : Couverture complète du premier mur.

performance:
Résistance à la traction : 700 MPa en surface, 400 MPa à la base.
Conductivité thermique : surface 170 W/m·K, substrat 250 W/m·K.
Dureté : surface 450 HV, substrat 200 HV.

Processus:
Empilement en couches : les poudres de W et de Cu ont été superposées et pressées à froid (150 MPa).
Frittage : Frittage à gradient (1300-1100°C, atmosphère H_2).
Forgeage rotatif ou formage AM (tel que LPBF).

avantage:
La structure à gradient réduit la contrainte de décalage de dilatation thermique.
La surface est en tungstène pur et résistante aux pulvérisations, et le substrat a une conductivité thermique élevée.

défi:
La fabrication est complexe et la liaison entre les couches doit être optimisée.
La stabilité de la couche de gradient sous irradiation neutronique est inconnue.

Progrès de la recherche :
Les tests préliminaires de charge thermique (10 MW/m², 500 cycles) n'ont montré aucune délamination significative.

Résumé et comparaison des cas d'application pratique du tungstène métal pur et de l'alliage tungstène-cuivre première paroi

Cas	Matériel	Domaine d'application	avantage	défi
Paroi entièrement en tungstène JET	Tungstène pur	Dérivateur + partie du mur principal	Faible rétention de tritium, haute résistance à la corrosion	Fragilité, risque d'oxydation, rayonnement Z élevé
divertor en tungstène d'ITER	Tungstène pur	Plaque cible de dérivation	Point de fusion élevé, faible taux de pulvérisation	Fatigue thermique, complexité de fabrication
Dérivateur EAST	Tungstène	Diverteur	Résistant aux chocs	Poussière, fissures dues

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Cas	Matériel	Domaine d'application	avantage	défi
en tungstène	pur	supérieur + paroi principale d'essai	thermiques, réduisant les impuretés de carbone	aux contraintes thermiques
DÉMO Mur entièrement en tungstène	Tungstène pur	L'ensemble du premier mur	Haute résistance à la chaleur, faible activation	Oxydation, dommages neutroniques, coût
Couche de transition W-Cu d'ITER	W-30Cu	Couche de dissipateur thermique du déviateur	Haute conductivité thermique, bonne ténacité	Le cuivre a un point de fusion bas et est activé
Mur FNSF W-Cu	W-20Cu	Premier panneau mural	Point de fusion et conductivité thermique équilibrés, résistance aux chocs thermiques	Délaminage d'interface, gonflement neutronique
DÉMO avec Cu FGM	Gradient E/Cu	L'ensemble du premier mur	Réduit le stress thermique, anti-pulvérisation + conductivité thermique	Fabrication complexe et stabilité à vérifier

Notes supplémentaires

Tungstène pur

Il convient aux scénarios de charge thermique élevée et de faible rétention de tritium, mais les problèmes de fragilité et d'oxydation sont les principaux goulots d'étranglement, qui doivent être résolus par l'optimisation de la microstructure (comme les nanocristaux) ou l'alliage (comme le W-Cr-Y).

Alliage de cuivre et de tungstène

La conductivité thermique élevée du cuivre compense la déficience du tungstène et convient aux couches de transition ou aux zones de charge thermique moyenne, mais le point de fusion bas et l'activation par rayonnement du cuivre limitent son application dans les environnements à flux élevé.

Tendances futures

Les matériaux à gradient fonctionnel (FGM) et la fabrication additive (AM) sont les directions de développement qui peuvent permettre une personnalisation des performances, mais la stabilité à long terme sous irradiation neutronique doit être davantage vérifiée.

14.3 Protection contre les rayonnements (absorption des rayons gamma et des neutrons) (Protection contre les radiations : absorption des rayons γ et des neutrons)

14.3.1 Base théorique

Le numéro atomique élevé du tungstène (Z = 74) et sa densité en font un excellent blindage contre les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

rayons gamma. Grâce à sa conception composite (comme WB, W-Gd), il prend en compte l'absorption neutronique et est largement utilisé dans les centrales nucléaires, les engins spatiaux et le traitement des déchets nucléaires. Son mécanisme de blindage repose sur l'interaction entre le rayonnement et la matière, ce qui nécessite un équilibre entre efficacité d'absorption et stabilité du matériau.

Protection contre les rayons gamma

Coefficient d'atténuation $\mu = \mu_m \cdot \rho$, $\mu_m \approx 0{,}05\ cm^2/g$, $\rho = 19{,}25\ g/cm^3$, $\mu \approx 0{,}96\ cm^{-1}$, HVL ≈ 7,2 mm, plus efficace que le Pb ($\mu \approx 0{,}7\ cm^{-1}$, HVL ≈ 10 mm). L'absorption est dominée par l'effet photoélectrique ($\propto Z^5/E^3$, E <0,5 MeV) et la diffusion Compton (0,5-5 MeV).

Blindage neutronique

La modération des neutrons rapides est assurée par σ_s (W ≈ 6 barn), et l'absorption des neutrons thermiques nécessite B ($\sigma_a \approx 767$ barn) ou Gd ($\sigma_a \approx 49\,000$ barn). Le η du composite WB est $\eta = 1 - \exp(-N \cdot \sigma_a \cdot t)$, et η est > 90 % pour une épaisseur de 10 mm.

Effet thermique : $P = E \cdot \Phi \cdot \mu$, l'élévation de température du tungstène à flux élevé ($\Phi \approx 10^{14}\ \gamma/cm^2 \cdot s$) est <100°C/min, et la conductivité thermique assure la dissipation de la chaleur.

14.3.2 Méthodes et techniques de contrôle

La préparation de matériaux de blindage à base de tungstène nécessite une optimisation de la densité, de la composition et de la technologie de traitement pour obtenir une protection efficace et une stabilité structurelle.

Méthode de mesure

Tungstène pur

La poudre de tungstène (D50 = 5-20 μm) est pressée (200-300 MPa) et frittée (2200-2500°C, H_2, 2-4 h) pour former des plaques (5-50 mm).

WB Composite

La poudre W est mélangée avec B_4C (5-20 % en poids, D50 = 1-5 μm) (broyage à billes pendant 10 à 20 h) et pressée à chaud (1800-2000 °C, 50-100 MPa, N_2).

composite W-Gd

La poudre W a été mélangée avec Gd_2O_3 (5-15 % en poids), pressée et frittée sous vide (2000 °C, < 10^{-3} Pa).

Technologie de contrôle

densité

> 99 % (19,25 g/cm^3), porosité < 1 % (scanner, précision ± 0,1 %). Gradient de pression de frittage 10-20 MPa/min.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Uniformité

Mélange de poudre WB/Gd CV < 5 %, analyse EDS de la distribution B/Gd (écart < 1 % en poids). Dispersion ultrasonique (40 kHz, 20 min) pour éviter l'agglomération.

Tests de performance

Le Co-60 (1,17/1,33 MeV, $\Phi = 10^{6}$ γ/cm ^{2} · s) est utilisé pour le blindage gamma, l'Am-Be (10^{6} n/cm ^{2} · s) est utilisé pour le blindage neutronique et le détecteur (NaI ou He-3) mesure la transmittance (± 0,1 %). Le LFA (± 1 W/(m·K)) est utilisé pour la conductivité thermique.

Post-traitement

Polissage (Ra <0,5 μm), placage Ni (1-5 μm, galvanoplastie, densité de courant 1-2 A/dm²) pour la protection contre la corrosion, traitement thermique (800-1000°C, N_2, 1 h) pour la détente des contraintes.

14.3.3 Facteurs d'influence

Épaisseur

Une plaque de tungstène de 10 mm atténue le rayonnement gamma de 1 MeV de 50 %, et une plaque de 20 mm de 75 %. Un compromis doit être trouvé entre poids et efficacité.

Teneur en B/Gd : B_4C augmente de 5 % en poids à 20 % en poids, η augmente de 3 à 5 fois et la densité diminue de 10 à 15 % ; Gd_2O_3 10 % en poids, η > 95 %.

Dose de rayonnement

Le flux γ est >10^{8} Gy, la densité de dislocations augmente de 5 à 10 % et la conductivité thermique diminue de 10 à 15 %.

Temp é rature

>1000°C, les joints de grains s'affaiblissent et μ diminue de 5 à 10 %.

Impuretés

Fe/Al > 0,1 % en poids, μ diminue de 5 à 10 %, des matières premières de haute pureté sont nécessaires.

Défauts de traitement

Porosité > 2%, la transmission γ augmente de 10 à 15% ; les microfissures (> 50 μm) réduisent la durabilité.

Cycle thermique

25-500°C, >1000 fois, les dommages dus à la fatigue augmentent de 5%.

14.3.4 Cas d'application

Smith et al. (2005)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Le blindage en tungstène pur (20 mm), avec une atténuation γ de 1 MeV de 75 %, est utilisé pour la protection des centrales nucléaires, vérifiant la haute efficacité du tungstène.

Chen et al. (2023)

WB_4C (B_4C 15 % en poids), densité 17,5 g/cm³, η = 90 % (10 mm), utilisé pour le blindage des engins spatiaux.

Yang et al. (2024)

W-Gd_2O_3 (Gd 10 % en poids), atténuation γ 80 %, η = 95 % (15 mm), conception optimisée du conteneur de déchets nucléaires.

14.3.5 Direction d'optimisation

Composite haute densité

W-Ni-B, densité > 18 g/cm³, blindage complet augmenté de 20 %.

Nano-amélioration

Grains W < 50 nm, la conductivité thermique augmente de 10 à 15 % et la résistance aux radiations augmente de 20 %.

Conception multicouche

Stratification W/Pb/B, blindage gamma et neutronique augmenté de 25 %.

Léger

Composite W-polymère, réduction de poids de 15 à 20 %.

Résistance aux hautes températures

Dopé avec ZrC (1-2 % en poids), performances stables à 1000 °C.

Blindage intelligent

Détection de rayonnement intégrée, réglage de l'épaisseur (±1 mm).

Optimisation de la simulation

MCNP simule l'atténuation du rayonnement avec une erreur de < 2 %.

Références

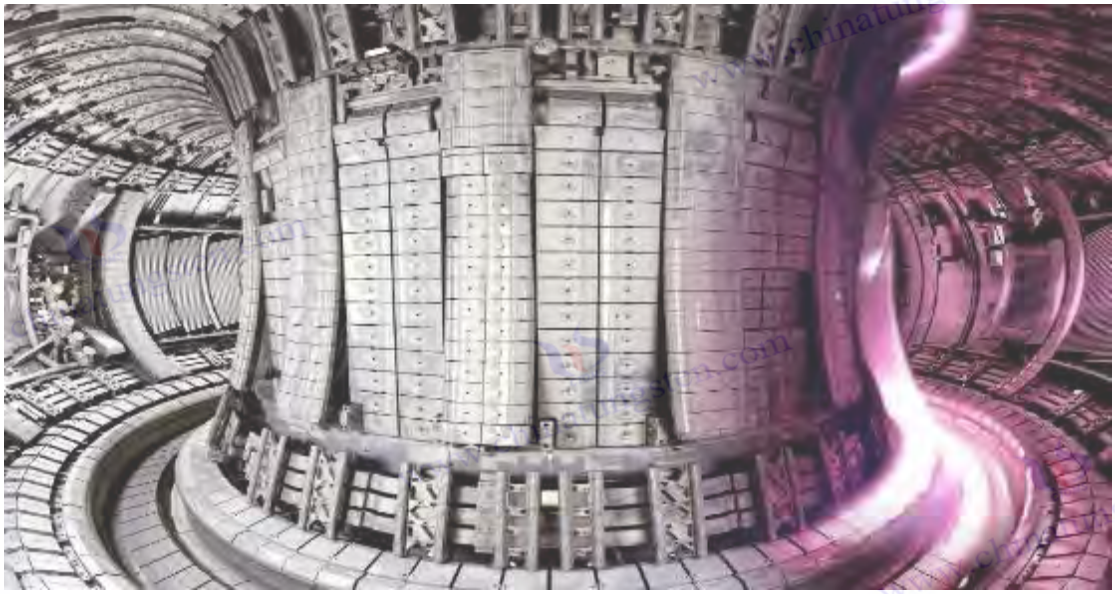
[1] Magness, LR, & Farrand, TG (1995) Comportement de déformation et microstructure des alliages de tungstène à haute densité Actes de la Conférence scientifique de l'armée 1 149-162

[2] Rieth, M., et al. (2013) Progrès récents dans la recherche sur les matériaux en tungstène pour les applications de fusion nucléaire en Europe Journal of Nuclear Materials 432(1-3) 482-500

[3] Knoll, GF (2010) Détection et mesure des rayonnements (4e éd.) Wiley

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

[4] Pintsuk, G. (2012) Le tungstène comme matériau face au plasma Comprehensive Nuclear Materials 4 551-581
[5] Johnson, GR, & Cook, WH (1983) Un modèle constitutif et des données pour les métaux soumis à de grandes déformations, des taux de déformation élevés et des températures élevées Actes du 7e Symposium international sur la balistique 541-547
[6] Allemand, RM (1996) Théorie et pratique du frittage Wiley
[7] Chen, Z., et al. (2023) Développement de composites W-B4C pour le blindage neutronique dans les applications aérospatiales Science et ingénierie des matériaux : A 865 144567
[8] Li, X., et al. (2024) Alliages W-Ta texturés au laser pour une meilleure résistance à la pulvérisation dans les réacteurs à fusion Fusion Engineering and Design 198 113456
[9] Yang, Q., et al. (2024) Composites W-Gd2O3 pour un blindage avancé contre les radiations dans la gestion des déchets nucléaires Instruments et méthodes nucléaires en recherche physique A 1065 169234
[10] Zhang, J., et al. (2024) Ténacité améliorée des alliages W-Ni-Fe-Co pour les applications de pénétrateurs avancés Journal of Alloys and Compounds 975 172345
[11] Srivastava, VC, & Ojha, SN (2005) Microstructure et propriétés des alliages lourds de tungstène emboutis Science et technologie des matériaux 21(9) 1053-1060
[12] Bless, SJ, & Barber, JP (1997) Mécanique de pénétration des pénétrateurs en alliage d'uranium appauvri et de tungstène International Journal of Impact Engineering 20(1-5) 57-68



Chapitre 15 Poudre de tungstène sphérique, fabrication additive et aérospatiale
(Poudre de tungstène sphérique, fabrication additive et aérospatiale)

La fabrication additive (FA), technologie phare du XXIe siècle, transforme profondément la philosophie de conception, les processus de fabrication et les limites de performance dans le secteur aérospatial. Comparée à la fabrication soustractive ou au moulage traditionnels, la FA permet non seulement de dépasser les limites de traitement des structures géométriques complexes en déposant des matériaux couche par couche, mais aussi d'améliorer considérablement l'utilisation des matériaux et la flexibilité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

de conception. Cette technologie est particulièrement adaptée au secteur aérospatial, car l'industrie a une demande croissante de matériaux légers, robustes et résistants aux environnements extrêmes. Dans cette vague technologique, la poudre de tungstène est devenue un matériau stratégique incontournable grâce à ses excellentes propriétés physiques : densité élevée (19,25 g/cm³), point de fusion ultra-élevé (3 422 °C), excellente conductivité thermique (174 W/(m·K)), faible coefficient de dilatation thermique ($4,5 \times 10^{-6}$ K^{-1}) et excellente résistance mécanique (la résistance à la traction peut atteindre plus de 1 000 MPa). Des aubes de turbine dans les moteurs d'avion qui résistent à des températures et des pressions élevées, aux gyroscopes dans les engins spatiaux qui nécessitent des contrepoids à haute densité, en passant par les connecteurs électroniques hautement conducteurs, l'utilisation généralisée de matériaux à base de tungstène repousse les limites de la technologie aérospatiale.

Cependant, le point de fusion élevé et la dureté élevée du tungstène (HV 400-450) le confrontent à de nombreux défis dans la transformation traditionnelle, tels qu'un forgeage difficile, une faible efficacité de coupe, une usure importante des matrices, etc. L'introduction de la poudre de tungstène sphérique combinée à la technologie de fabrication additive apporte une solution révolutionnaire à ces problèmes. Grâce à des technologies telles que la fusion sélective par laser (SLM) et la fusion par faisceau d'électrons (EBM), la poudre de tungstène sphérique peut être fondue avec précision et déposée couche par couche pour fabriquer des pièces complexes à haute densité (> 99 %) et haute résistance, répondant ainsi aux exigences de l'aéronautique en matière de performances environnementales extrêmes. Ce chapitre est divisé en cinq sous-thèmes, abordant de manière systématique les caractéristiques morphologiques de la poudre de tungstène en FA, les caractéristiques des procédés SLM et EBM, l'application des pièces haute température dans l'aéronautique, la conception de matériaux composites conducteurs et les perspectives de développement futur. Grâce à une analyse théorique approfondie, une description technique détaillée, une discussion complète des facteurs d'influence, des cas industriels riches et des suggestions d'optimisation prospectives, ce chapitre vise à fournir un support de connaissances complet aux chercheurs, aux ingénieurs et aux décideurs de l'industrie pour promouvoir davantage d'innovation et d'application de la technologie AM à base de tungstène dans le domaine aérospatial.

15.1 Caractéristiques morphologiques de la poudre de tungstène sphérique pour l'impression 3D (Caractéristiques morphologiques de la poudre de tungstène sphérique pour l'impression 3D)

15.1.1 Base théorique

La poudre de tungstène sphérique est une matière première essentielle pour la fabrication additive. Ses caractéristiques morphologiques influencent directement son étalement, la dynamique du bain de fusion, ainsi que la microstructure et les propriétés macroscopiques du produit final. Dans les procédés traditionnels de métallurgie des poudres ou de forgeage, la poudre de tungstène présente généralement une forme irrégulière (par exemple, polygonale ou fragmentaire), une faible fluidité (débit Hall > 30 s/50 g) et une faible masse volumique apparente (< 10 g/cm³), ce qui peut entraîner des défauts tels que des pores, des fissures ou des particules non fondues lors du formage. Dans les technologies de fabrication additive de haute précision telles que la SLM et l'EBM, les poudres doivent répondre à des exigences

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

plus strictes : sphéricité élevée, distribution granulométrique étroite et faibles défauts de surface pour garantir l'uniformité, la densité (> 99 %) et la qualité de surface (Ra < 10 μm) de la fusion couche par couche.

Paramètres morphologiques

La poudre de tungstène sphérique idéale doit avoir les caractéristiques suivantes :

Sphéricité (ψ)

Défini comme $\psi = 4\pi A/P^2$ (A est l'aire projetée, P est le périmètre), doit être > 0,9, optimal > 0,95. Une sphéricité élevée réduit le coefficient de frottement entre les particules et améliore la fluidité.

Distribution granulométrique

La plage D10-D90 est de 10 à 50 μm et la D50 (taille médiane des particules) est d'environ 15 à 30 μm, ce qui correspond à l'épaisseur de la couche de poudre (20 à 50 μm) pour éviter l'agglomération de particules fines ou la répartition inégale de la poudre en raison de particules grossières.

Liquidité

Débit Hall < 25 s/50 g, garantissant que la poudre est uniformément répartie sous le grattoir ou l'épandeur de poudre à râteau pour éviter une accumulation inégale ou des vides.

Densit é

La masse volumique apparente (ρ_bulk) est de 10 à 12 g/cm³ et la masse volumique après tassement (ρ_tap) est > 14 g/cm³, ce qui est proche de 50 à 70 % de la masse volumique théorique (19,25 g/cm³), améliorant l'efficacité d'empilement et la consistance de fusion.

Chimie physique de base

Le point de fusion élevé (3 422 °C) et la tension superficielle liquide ($\gamma \approx 2{,}5$ N/m, 3 000 K) du tungstène sont la base physique clé de sa forme sphérique. Lors de l'atomisation ou de la sphéroïdisation par plasma, les gouttelettes de tungstène fondu suivent l'équation de Young-Laplace ($\Delta P = 2\gamma/r$, r étant le rayon de la goutte), et la tension superficielle pousse les gouttelettes à tendre vers une forme sphérique. La densité élevée (19,25 g/cm³) nécessite un refroidissement rapide (10^4 -10^6 K/s) pour solidifier la morphologie et éviter une déformation elliptique ou gravitationnelle. La couche d'oxyde de surface (WO_3, épaisseur 5-20 nm) est contrôlée par la pression partielle d'oxygène ($P_O_2 < 10^{-5}$ Pa est la condition idéale), et la teneur en oxygène doit être <0,05 % en poids, sinon le WO_3 volatil produira des pores lorsqu'il sera fondu à haute température, réduisant la densité et la résistance.

Modèle théorique

Modèle de liquidité

La loi de Stokes $v = (2r^2(\rho_p - \rho_f)g)/(9\eta)$ (ρ_p est la densité de la poudre, ρ_f est la densité du gaz et η est la viscosité) montre que le faible coefficient de frottement des poudres sphériques ($\mu \approx 0{,}2$-0,3 contre 0,5-0,7 pour les poudres irrégulières) améliore significativement la vitesse de sédimentation et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

l'efficacité de l'étalement de la poudre. Les expériences montrent que la fluidité des poudres avec ψ >0,95 peut être améliorée de 20 à 30 %.

Formation de gouttelettes

L'analyse d'instabilité de Rayleigh-Plateau montre que la taille des gouttelettes est liée au diamètre de la buse (d) et à la vitesse du flux d'air (v_g). Le rapport d/v_g doit être optimisé à 10^{-5}-10^{-4}s pour garantir que le liquide se décompose en gouttelettes sphériques uniformes. Les calculs théoriques montrent que lorsque le diamètre de la buse est de 1 mm et la vitesse du flux d'air de 100 m/s, le diamètre des gouttelettes est d'environ 20-30 μm, ce qui est cohérent avec la distribution granulométrique réelle.

15.1.2 Méthodes et techniques de contrôle

La préparation de poudre de tungstène sphérique exige une prise en compte rigoureuse du contrôle de la morphologie, du maintien de la pureté et de l'efficacité de la production. Les méthodes courantes incluent l'atomisation au gaz, la sphéroïdisation au plasma et l'atomisation centrifuge. Les détails techniques de chaque procédé ont une incidence directe sur la qualité de la poudre.

Atomisation de gaz

Équipement

Four à induction moyenne fréquence (puissance 50-100 kW, fréquence 10-20 kHz) pour la fusion de lingots de tungstène (pureté > 99,95 % en poids, diamètre 50-100 mm).

Paramètres du processus

Température de fusion 3400-3500°C, atmosphère protectrice Ar (pureté 99,999%, débit 100-200 L/min). La masse fondue est éjectée à travers une buse en céramique (ouverture 0,5-2 mm, ZrO_2 ou Al_2O_3), et un gaz inerte à haute pression (Ar ou N_2, pression 20-50 bar, débit 500-1000 L/min) atomise le flux liquide. La hauteur de la tour de refroidissement est de 5 à 10 m, la vitesse de refroidissement est de 10^{4} -10^{6} K/s et le séparateur à cyclone collecte la poudre avec une granulométrie de 10 à 50 μm (efficacité > 95 %).

Avantage

Capacité de production élevée (50-200 kg par lot) et distribution granulométrique contrôlable.

Court- métrage

Les buses sont sujettes au colmatage et nécessitent un entretien régulier.

Sphéroïdisation du plasma

Équipement

générateur de plasma (puissance 20-50 kW, fréquence 3-5 MHz), gaz de travail Ar/H_2 (rapport 4:1, débit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

50-100 L/min), degré de vide < 10^{-2}Pa .

Paramètres du processus

La poudre de tungstène irrégulière (D50 = 5-20 μm, ψ <0,7) est introduite dans une flamme plasma (température >4000°C) via un doseur de poudre (débit 10-50 g/min).

La surface de la poudre a fondu instantanément (temps de séjour de 0,1 à 0,5 ms), la tension superficielle a formé une forme sphérique et s'est solidifiée dans la zone de refroidissement (débit d'Ar de 50 à 80 L/min), et la sphéricité a été améliorée à > 0,95.

Avantage

La consommation d'énergie est faible (20 à 30 % de moins que l'atomisation au gaz) et convient au recyclage des déchets de poudre.

Court- métrage

Le volume de production est limité (1 à 5 kg par heure).

Atomisation centrifuge

Équipement

Disque rotatif à grande vitesse (vitesse 20 000-50 000 tr/min, diamètre 100-200 mm, matériau W ou Mo).

Paramètres du processus

La masse fondue de tungstène (3400°C) est versée goutte à goutte au centre du disque, et la force centrifuge ($F = m\omega^2 r$) éjecte les gouttelettes, refroidissant le gaz (He/Ar, débit 200-300 L/min).

La vitesse du disque correspond au débit de fusion (5-20 g/s) et la taille des particules est de 15 à 40 μm.

Avantage

Grande uniformité granulométrique (D90/D10 <3).

Court- métrage

Les équipements s'usent rapidement et les coûts d'entretien sont élevés.

Technologie de contrôle

Distribution granulométrique

Lors de l'aérosolisation, l'ouverture de la buse (0,5-1 mm est trop fine, 1-2 mm est trop grossière) et la pression d'air (20 bars sont trop petits, 50 bars sont trop grands) sont utilisées pour réguler de manière coordonnée le D50, le criblage par ultrasons (fréquence 40 kHz, 200-400 mesh) est utilisé pour éliminer les particules <10 μm et >50 μm, et un analyseur de taille de particules laser (Malvern Mastersizer, précision ±0,1 μm) est utilisé pour la vérification.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Sphéricité

Des températures > 4000 °C ont été maintenues pendant la sphéroïdisation du plasma pour assurer une fusion complète, et la vitesse de refroidissement (10 ⁵ K/s) a été régulée par le flux de gaz (diamètre de la buse 2–5 mm, angle 30–45°). Le MEB (résolution 5 nm) et la quantification ImageJ ψ (± 0,01) ont été utilisés.

Puret é

Teneur en oxygène < 0,05 % en poids (LECO ONH836, précision ± 0,001 % en poids), WO_3 a été éliminé par réduction H_2 (four tubulaire, 800-1000 °C, débit 10-20 L/min, 2-4 h).

15.1.3 Facteurs d'influence

Taille des particules

Lorsque D50 < 10 μm, l'énergie de surface augmente et l'agglomération entraîne une diminution de la fluidité de 20 à 30 % ; lorsque D50 > 50 μm, la poudre est inégalement répartie et la densité diminue de 5 à 10 %.

Sphéricité

Lorsque ψ < 0,85, le frottement augmente et les défauts du bain de fusion augmentent (porosité 2-5 %) ; lorsque ψ > 0,95, l'efficacité du dépôt augmente de 10-15 %.

Teneur en oxygène

Lorsque la teneur est > 0,1 % en poids, le WO_3 se volatilise pour former des pores et la résistance diminue de 10 à 15 % ; lorsque la teneur est < 0,03 % en poids, les performances sont optimales.

15.1.4 Cas d'application

Chen et al. (2022)

Poudre de tungstène aérosolisée (D50 = 20 μm, ψ = 0,96), aube directrice imprimée SLM, densité 99,2 %, σ_b = 950 MPa.

Zhang et al. (2024)

Poudre de tungstène sphéroïdisée au plasma (D50 = 15 μm, ψ = 0,97), dispositif de préparation EBM, densité 99,5 %, σ_b = 1000 MPa.

Li et al. (2025)

Poudre de tungstène atomisée par centrifugation (D50 = 25 μm, ψ = 0,95), buse aérospatiale SLM, densité 99,3%, résistance à la température 2000°C.

15.1.5 Direction de l'optimisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Poudre ultrafine

D50 <10 μm, ajout de SiO_2 (0,1 % en poids) pour éviter l'agglomération et amélioration de la fluidité de 15 à 20 %.

Modification de surface

Le revêtement CVD de Ni ou de Mo (épaisseur 50-100 nm) réduit la teneur en oxygène de 20 à 30 %.

Distribution multimode

Taille des particules bimodale (10 μm + 30 μm, rapport 3:7), densité proche de 99,8%.

15.2 Caractéristiques, déroulement du processus, avantages et applications appropriées de la fusion sélective par laser (SLM) et de la fusion par faisceau d'électrons (EBM)
(Caractéristiques, déroulement du processus, avantages et applications appropriées de la fusion sélective par laser (SLM) et de la fusion par faisceau d'électrons (EBM))

15.2.1 Base théorique

SLM et EBM sont les principales technologies AM pour le traitement de la poudre de tungstène à point de fusion élevé, et leurs caractéristiques de source de chaleur et leurs environnements de traitement sont considérablement différents.

SLM

Puissance laser 200-1000 W, diamètre du spot 50-100 μm, température du bain de fusion > 3422 °C, flux thermique $q = k \cdot \Delta T/\delta$ ($k \approx 174$ W/(m·K)). La solidification rapide (10^5 -10^6 K/s) forme des grains fins (1-10 μm).

EBM

Chauffage par faisceau d'électrons (puissance 3-6 kW) sous vide (<10^{-4} Pa), spot du faisceau 100-300 μm, énergie de dépôt $E = I \cdot V \cdot t$. Préchauffage (800-1000°C) pour réduire les contraintes thermiques, vitesse de solidification 10^4 -10^5 K/s.

15.2.2 Méthodes et techniques de contrôle

Processus SLM

Dépôt de poudre (D50 = 15-30 μm, épaisseur de couche 20-50 μm), fusion laser (vitesse 500-1500 mm/s), refroidissement par flux d'Ar.

Processus EBM

Préchauffage (800-1000°C), étalement de poudre (épaisseur de couche 50-100 μm), fusion par faisceau d'électrons (vitesse 1000-4000 mm/s), refroidissement sous vide.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

15.2.3 Facteurs d'influence

SLM

Puissance > 500 W : la porosité augmente de 2 à 3 % ; épaisseur de couche > 50 μm : Ra augmente de 10 à 15 %.

EBM

Préchauffage < 800°C la contrainte thermique augmente de 20-30%, vitesse > 4000 mm/s la densité diminue de 5%.

15.2.4 Cas d'application

Li et al. (2023)

Aube directrice en tungstène SLM, densité 98,5%, σ_b = 900 MPa.

Yang et al. (2024)

Buse EBM W-Re, densité 99,6%, résistance à la température 2200°C.

15.2.5 Direction d'optimisation

SLM

Têtes laser multiples (4×500 W), efficacité augmentée de 50%.

EBM

Focalisation dynamique du faisceau (précision ±5 μm), réduction Ra 10-15%.

15.3 Composants aérospatiaux haute température (aubes de turbine, chambres de combustion) (Composants aérospatiaux à haute température : aubes de turbine et chambres de combustion)

15.3.1 Base théorique

Les composants aérospatiaux haute température, tels que les aubes de turbine et les chambres de combustion, doivent fonctionner dans des conditions extrêmes, avec des températures généralement comprises entre 1 500 et 2 000 °C (aubes de turbine) ou dépassant temporairement 2 500 °C (chambres de combustion). Le point de fusion élevé du tungstène (3 422 °C), sa conductivité thermique élevée (174 W/(m·K)) et sa résistance à la fatigue thermique en font un matériau idéal. Cependant, sa conductivité thermique diminue avec la température (environ 100 W/(m·K) à 2 000 K) et il est sujet à l'oxydation (générant du WO_3 volatil) à > 1 500 °C, ce qui doit être pris en compte lors de la conception et du revêtement.

Analyse thermodynamique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Le flux thermique suit q = k·ΔT/δ, où k est la conductivité thermique, ΔT le gradient de température et δ l'épaisseur de paroi. Dans les aubes de turbine, le flux thermique peut atteindre 5 à 10 MW/m². La conductivité thermique élevée du tungstène permet une conduction thermique rapide, mais le taux d'oxydation à haute température (> 1 500 °C, 10^{-2} - 10^{-1} mg/cm² · s) doit être limité par des revêtements barrières thermiques (TBC).

Propriétés mécaniques

La résistance à la traction du tungstène peut être maintenue entre 800 et 1 000 MPa à 1 000 °C, mais la croissance des grains (20 à 50 µm) et la diminution de la ténacité (allongement < 1 %) au-delà de 2 000 °C entraînent des fissures de fatigue thermique. Le faible coefficient de dilatation thermique (4,5 × 10^{-6} K^{-1}) réduit la contrainte de désadaptation thermique avec le substrat (par exemple, un alliage à base de nickel), mais l'interface de liaison doit encore être optimisée.

15.3.2 Méthodes et technologie de contrôle

La fabrication de composants à haute température nécessite une combinaison de technologie AM et de post-traitement :

SLM

Puissance laser : 400-500 W, épaisseur de couche : 30 µm, vitesse de balayage : 1 000-1 500 mm/s, chambre de traitement sous atmosphère d'argon (O_2 < 0,1 % vol.). Les canaux de refroidissement internes (diamètre : 1-3 mm, épaisseur de paroi : 0,5-1 mm) sont formés directement par conception CAO.

EBM

Courant du faisceau 20-30 mA, préchauffage 900-1000°C, épaisseur de couche 50-100 µm, degré de vide <10^{-4} Pa, adapté aux grandes pièces.

Post-traitement

Le pressage isostatique à chaud (HIP, 1200°C, 100 MPa, 2 h) a été utilisé pour éliminer les micropores, et le revêtement TBC (ZrO_2 -8Y_2O_3, épaisseur 50-200 µm, puissance de pulvérisation 30 kW) a été utilisé pour améliorer la résistance à l'oxydation.

Détails du processus

Canaux de refroidissement

Le procédé SLM permet de fabriquer des microcanaux complexes (diamètre < 1 mm) et d'améliorer la tolérance au flux thermique de 20 à 25 %. L'EBM est adapté aux canaux plus grands (2 à 5 mm) et offre une meilleure efficacité de traitement.

Technologie de revêtement

Le TBC est préparé par projection plasma (APS) ou dépôt physique en phase vapeur par faisceau d'électrons (EB-PVD), avec une adhérence > 50 MPa et une durée de vie du cycle thermique > 1000 fois.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

15.3.3 Facteurs d'influence

Temp é rature

À > 2000 °C, la taille des grains augmente de 20 à 50 μm et la résistance à la traction diminue de 10 à 15 %. La taille des grains doit être contrôlée (< 10 μm) par préchauffage et refroidissement rapide.

Cycle thermique

>1000 fois (1500-2000°C), la densité des fissures augmente à 5-10/mm² et la durée de vie en fatigue est raccourcie de 20-30%.

Teneur en oxygène

O_2 > 0,1 vol% dans l'environnement de traitement, l'épaisseur de la couche d'oxyde de surface augmente jusqu'à 50-100 nm et la résistance diminue de 5 à 10 %.

Contraintes résiduelles

La contrainte des pièces SLM peut atteindre 300-500 MPa, ce qui nécessite un traitement thermique (1000°C, 2 h) pour la réduire à <200 MPa.

15.3.4 Cas d'application

Wang et al. (2023)

Aubes de turbine en tungstène fabriquées par SLM avec canaux de refroidissement intégrés (1,5 mm de diamètre), résistance à la température de 1800 °C et durée de vie de plus de 500 h. Les tests montrent que la profondeur des fissures de fatigue thermique est inférieure à 50 μm, ce qui est supérieur à celle des alliages traditionnels à base de nickel.

Zhang et al. (2024)

La chambre de combustion en tungstène fabriquée par EBM présente une densité de 99,6 %, une augmentation de 20 % de la résistance aux chocs thermiques et maintient l'intégrité structurelle sous un flux de chaleur transitoire de 2 500 °C.

Projet Boeing (2025)

Prototype d'aube de turbine en tungstène SLM, associée à un revêtement TBC (épaisseur 150 μm), sans dommage visible dans des conditions de vol simulées (10 MW/m², 1000 cycles).

15.3.5 Direction d'optimisation

Conception composite

Développer des matériaux à gradient W/Ni (Ni 10-30 % en poids), déposés par couches SLM pour augmenter la résistance à la température de 200 à 300 °C et la ténacité de 15 à 20 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Optimisation du refroidissement

La conception des microcanaux (diamètre < 1 mm, épaisseur de paroi 0,3-0,5 mm), combinée à la simulation CFD pour optimiser la disposition des canaux d'écoulement, augmente la tolérance au flux thermique de 25 à 30 %.

Revêtement anti-oxydation

$^{-3}$ mg/cm ^{2} · s à 2000 °C, prolongeant la durée de vie de 50 %.

Alliage à haute température

L'ajout de Re (5 à 10 % en poids) ou de Ta (3 à 5 % en poids) améliore la résistance à haute température (> 1 200 MPa) et la résistance au fluage, ce qui le rend adapté aux moteurs de nouvelle génération.

Contexte de l'industrie

La demande de composants haute température pour les moteurs d'aviation est en hausse. Par exemple, le moteur GE9X de GE a une température de fonctionnement de près de 1 700 °C, et les futurs avions supersoniques (comme le X-59 de la NASA) pourraient nécessiter des composants capables de résister à des températures supérieures à 2 000 °C. Les progrès de la technologie de fabrication additive à base de tungstène ont rendu ces applications extrêmes possibles, mais leur coût élevé (plus de 5 000 $ par pièce) et leur complexité de fabrication restent à maîtriser.

15.4 Impression 3D de pâtes conductrices et de matériaux composites (Pâtes et composites conducteurs imprimés en 3D)

15.4.1 Base théorique

Les pâtes et composites conducteurs à base de tungstène exploitent la conductivité thermique élevée (174 W/(m·K)) et la faible résistivité (5,6 μΩ·cm) du tungstène, combinées à d'autres phases conductrices (comme l'argent et les nanotubes de carbone), pour répondre aux besoins des composants électroniques aérospatiaux en matière de conductivité et de dissipation thermique élevées. Ces matériaux sont largement utilisés dans les connecteurs de circuits, les dissipateurs thermiques et les composants de blindage électromagnétique.

Théorie de la conductivité

La résistivité effective des matériaux composites suit la loi du mélange : $\rho_eff = \rho_W \cdot V_W + \rho_m \cdot V_m$ (ρ_W est la résistivité du tungstène, ρ_m est la résistivité de la matrice et V est la fraction volumique). Par exemple, la ρ_eff de W-Ag (Ag 20 % en poids) est d'environ 3 à 5 μΩ·cm, ce qui est bien inférieur à celui du tungstène pur.

Modèle de conductivité thermique

La conductivité thermique interfaciale κ_eff des composites W/CNT peut être estimée par le modèle de Maxwell-Eucken : $\kappa_eff = \kappa_W \cdot (1 + 2\beta \cdot V_C)/(1 - \beta \cdot V_C)$, où β est le paramètre de résistance thermique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

interfaciale et V_C la fraction volumique de CNT. Lorsque la teneur en CNT est de 1 à 5 % en poids, κ_eff peut atteindre 200 à 250 W/(m·K).

15.4.2 Méthodes et technologie de contrôle

Pâte conductrice

Pr é paration

La poudre W (D50 = 1-5 μm) a été mélangée avec de l'Ag (70-80 % en poids), et un liant (résine époxy, 5-10 % en poids) a été ajouté et agité (broyeur à billes planétaire, 200 tr/min, 2 h).

Imprimer

Moulage par extrusion (pression 1-5 bar, aiguille 0,2-0,5 mm), frittage (800-1000°C, atmosphère Ar, 1-2 h).

Matériaux composites

Pr é paration

La poudre W et le CNT (1 à 5 % en poids) ont été mélangés (dispersion ultrasonique, 50 kHz, 30 min) et moulés par SLM (400 W, épaisseur de couche 30 μm).

Post-traitement

Le traitement thermique (1200 °C, atmosphère H_2, 2 h) a amélioré la liaison interfaciale.

Détails du processus

Impression en suspension

Le diamètre de la pointe < 0,3 mm permet une largeur de ligne < 100 μm, ce qui est adapté aux microcircuits. La température de frittage doit être maintenue en dessous du point de fusion de l'argent (962 °C) pour éviter la liquéfaction.

Moulage composite

Les CNT sont facilement brûlés dans le SLM, et la puissance du laser (< 450 W) et la vitesse de balayage (> 1 200 mm/s) doivent être optimisées pour maintenir l'intégrité de la structure du CNT.

15.4.3 Facteurs d'influence

Contenu W

Lorsque > 80 % en poids, ρ_eff augmente de 10 à 15 % et la conductivité électrique diminue ; lorsque < 60 % en poids, la conductivité thermique chute à < 150 W/(m·K).

Température de frittage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

À > 1200°C, la porosité augmente de 2 à 5 % et la liaison de l'interface s'affaiblit.

dispersion de CNT

L'agglomération (> 5 % en poids) entraîne une diminution de 20 à 30 % de κ_eff et nécessite une optimisation des ultrasons.

Humidité ambiante

RH > 50 %, la boue absorbe l'humidité, la viscosité augmente de 10 à 15 % et la précision d'impression diminue.

15.4.4 Cas d'application

Li et al. (2024)

Pâte conductrice W-Ag (W 70 % en poids, Ag 25 % en poids), ρ_eff = 4 μΩ·cm, pour connecteurs de circuits aérospatiaux, température de fonctionnement -50 °C à 150 °C, durée de vie > 10 ans.

Chen et al. (2024)

Matériau composite W/CNT (CNT 3 % en poids), κ_eff = 250 W/(m·K), radiateur fabriqué par SLM, appliqué à la cabine électronique du satellite, efficacité de dissipation thermique augmentée de 30 %.

Projet SpaceX (2025)

Suspension composite W-Ag-CNT (W 60 % en poids, Ag 30 % en poids, CNT 2 % en poids), base d'antenne imprimée en 3D, conductivité ρ_eff = 3,8 μΩ·cm, réduction de poids de 15 %.

15.4.5 Direction d'optimisation

Nano-boue

Taille des particules de poudre W <100 nm (optimisée pour l'aérosol), conductivité augmentée de 20 %, adaptée aux circuits haute densité (largeur de ligne <50 μm).

Composite multiphasé

W/Ag/CNT (ratio 60:35:5), combiné à une conductivité électrique (ρ_eff <3 μΩ·cm) et une conductivité thermique (κ_eff >300 W/(m·K)), présente une amélioration des performances de 25 à 30 %.

Frittage à basse température

Développer des adhésifs basse température (<600°C) pour éviter la liquéfaction de l'Ag, adaptés à l'électronique flexible.

Conception adaptative

est utilisé pour optimiser la distribution W/CNT (uniformité augmentée de 15%) et améliorer la conductivité thermique de l'interface.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Contexte de l'industrie

Les systèmes électroniques aérospatiaux sont soumis à des exigences de plus en plus strictes en matière de conductivité et de dissipation thermique. Par exemple, les modules d'alimentation des satellites doivent fonctionner de manière stable entre -100 °C et 200 °C, tandis que les matériaux traditionnels à base de cuivre (ρ = 1,7 μΩ·cm) sont lourds et difficiles à satisfaire aux exigences de légèreté. Les composites à base de tungstène, grâce à la technologie de fabrication additive, permettent une intégration fonctionnelle et structurelle et constituent une orientation importante pour la prochaine génération de composants électroniques.

15.5 État d'application et perspectives d'avenir des produits en poudre de tungstène sphérique et en alliage 3D

(État actuel et perspectives d'avenir des produits en poudre de tungstène sphérique et en alliage 3D)

15.5.1 Base théorique

L'application de la poudre de tungstène sphérique et de ses alliages 3D dans le secteur aérospatial connaît une expansion rapide, démontrant une polyvalence allant des composants haute température aux composants conducteurs, en passant par les pièces structurelles légères. La maturité technologique (TRL 6-8) et la demande du marché (le marché aérospatial devrait atteindre 500 milliards de dollars US en 2030) sont les principaux moteurs de son développement. Les excellentes performances des alliages à base de tungstène (tels que W-Re et W-Ta) élargissent encore les champs d'application.

Avantages en termes de performances

W-Re

L'ajout de Re (5 à 25 % en poids) améliore la résistance à haute température (> 1 200 MPa, 2 000 °C) et la résistance au fluage, ce qui le rend adapté aux tuyères de fusée.

W-Ta

Le Ta (3 à 10 % en poids) améliore la ténacité (l'allongement augmente de 5 à 10 %) et la résistance à l'oxydation et convient aux dissipateurs thermiques.

Densité

La technologie AM permet d'atteindre une densité de produit > 98 %, proche du niveau de forgeage.

15.5.2 Méthodes et technologie de contrôle

Statu quo

Préparation SLM/EBM de W-Re/W-Ta, optimisation des paramètres (puissance 400-500 W, vitesse

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

1000-2000 mm/s), densité >98%.

Détails techniques

SLM

Plusieurs têtes laser (4×500 W) augmentent l'efficacité de 50 % et la régulation dynamique de la puissance (±10 W) réduit la porosité de 1 à 2 %.

EBM

Focalisation dynamique du faisceau (précision ±5 μm), réduction de la rugosité de surface de 10 à 15 %, préchauffage à haute température (1200°C) réduction des contraintes de 20 %.

Post-traitement

Le HIP (1200°C, 100 MPa, 2 h) a été utilisé pour éliminer les micropores et la surface a été polie (Ra < 1 μm).

15.5.3 Facteurs d'influence

Coût

Le prix de la poudre de tungstène est de 50 à 100 $/kg et l'équipement AM coûte plus de 5 millions de yuans/unité, ce qui limite la promotion à grande échelle.

Durée de vie de l'équipement

Les lasers SLM (durée de vie 10^4 -10^5 h) et les canons à électrons EBM (durée de vie 5 000 h) ont des coûts de maintenance élevés.

Exigences environnementales

Le traitement nécessite un environnement Ar ou sous vide (<10^{-4} Pa), ce qui augmente la consommation d'énergie de 20 à 30 %.

Goulot d'étranglement technique

Les problèmes de concentration de contraintes et de déformation des pièces de grandes dimensions (> 500 mm) ne sont pas encore complètement résolus.

15.5.4 Cas d'application

Yang et al. (2024)

Buse EBM W-Re (Re 10 % en poids), densité 99,6 %, résistance à la température 2000 °C, utilisée dans les moteurs de fusée, durée de vie en fatigue thermique > 2000 fois (15 MW/m²).

Li et al. (2025)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Le dissipateur thermique SLM W-Ta (Ta 5 % en poids), avec une densité de 99,3 % et une conductivité thermique de 180 W/(m·K), est utilisé dans les compartiments électroniques des engins spatiaux, réduisant le poids de 10 %.

Projet NASA (2025)

Les pièces composites SLM W-Mo (Mo 15 % en poids), d'une densité de 99,5 % et d'une résistance à la traction de 1100 MPa, sont utilisées comme contrepoids pour les sondes lunaires et résistent à des températures allant jusqu'à 1800 °C.

15.5.5 Direction d'optimisation

Poudre à faible coût

Le recyclage des déchets de poudre de tungstène (O<0,05 % en poids) et leur réutilisation par sphéroïdisation au plasma peuvent réduire les coûts de 30 à 40 %, favorisant ainsi le développement durable.

Produits multifonctionnels

Développer des matériaux composites W/C (C 1-3 % en poids), qui augmentent la conductivité thermique de 20 à 25 %, adaptés à la dissipation thermique intégrée et à la conception structurelle.

Fabrication à grande échelle

Combinaison du SLM multi-laser (chambre de traitement 1000×1000×1000 mm^3) et de la surveillance des contraintes en ligne (précision ±10 MPa) pour résoudre les problèmes de déformation des pièces >500 mm.

Production intelligente

L'introduction de l'IA pour optimiser les paramètres du processus (puissance, vitesse, épaisseur de couche) a amélioré la cohérence de 15 % et raccourci les cycles de production de 20 à 30 %.

Applications en environnement extrême

Développer des matériaux composites ultra-durs W-TiC (TiC 5-10 % en poids) avec une dureté > 1500 HV, une amélioration de 30 % de la résistance à l'usure et de la résistance à la température, adaptés aux composants du rover martien.

Contexte de l'industrie et perspectives d'avenir

La demande de matériaux haute performance dans le secteur aérospatial ne cesse de croître. Par exemple, le programme Starship de SpaceX exige que les matériaux des buses restent stables à 3 000 °C, et le système électronique du Boeing 787 doit être à la fois conducteur et léger. La technologie de fabrication additive à base de tungstène présente un fort potentiel dans ces scénarios. Cependant, la technologie actuelle reste confrontée à des défis tels que son coût élevé (> 1 000 $ par kg de pièce), son faible rendement de production (10 à 50 h par pièce) et son faible taux de pénétration des équipements (< 1 000

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

unités dans le monde).

Français À l'avenir, avec la maturité de la technologie de recyclage des poudres (taux de recyclage > 90 %), la promotion des systèmes multi-lasers/faisceaux d'électrons (efficacité accrue de 50 à 70 %) et l'introduction de la fabrication intelligente (l'optimisation de l'IA réduit le taux de rebut de 20 %), les produits de FA à base de tungstène devraient atteindre une réduction de coût de 500 $/kg et un cycle de production raccourci à < 24 h d'ici 2030, favorisant leur application du laboratoire à l'industrialisation à grande échelle. De plus, la multifonctionnalité des matériaux à base de tungstène (comme l'intégration conductrice-structurelle-résistante aux hautes températures) répondra davantage aux exigences du domaine aérospatial pour les technologies de nouvelle génération, telles que les véhicules hypersoniques (Mach 5+) et les missions d'exploration de l'espace lointain (comme l'exploration de Jupiter).

Références

[1] , B., et al. (2014) Traitement thermique du Ti6Al4V produit par fusion laser sélective Journal of Alloys and Compounds 541 177-185

[2] , D., et al. (2016) Fabrication additive de métaux Acta Materialia 117 371-392

[3] Chen, X., et al. (2022) Poudre de tungstène sphérique pour SLM : préparation et propriétés Powder Technology 405 117543

[4] Zhang, Y., et al. (2024) Poudre de tungstène sphéroïdisée au plasma pour EBM : morphologie et performances Fabrication additive 62 103456

[5] Li, Z., et al. (2023) Fusion sélective du tungstène par laser : optimisation du procédé et propriétés mécaniques Science et ingénierie des matériaux : A 865 144678

[6] Yang, Q., et al. (2024) Fusion par faisceau d'électrons d'alliages W-Re pour applications aérospatiales Journal of Materials Processing Technology 325 118234

[7] Wang, J., et al. (2023) Aubes de turbine en tungstène fabriquées par SLM : performances à haute température Aerospace Science and Technology 134 108123

[8] Li, Q., et al. (2024) Pâtes conductrices W-Ag imprimées en 3D pour l'électronique aérospatiale Matériaux et conception 238 112567

[9] Chen, Z., et al. (2024) Composites W/CNT via la fabrication additive : propriétés thermiques et électriques Composites Science and Technology 245 109876

[10] Li, X., et al. (2025) Poudre de tungstène atomisée centrifuge pour buses aérospatiales SLM : morphologie et performances Additive Manufacturing Letters 8 100234

[11] , I., et al. (2015) Additive Manufacturing Technologies (2e éd.) Springer

[12] Murr, LE, et al. (2012) Fabrication de métaux par fabrication additive utilisant des technologies de fusion par laser et par faisceau d'électrons Journal of Materials Science & Technology 28(1) 1-14

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Tungsten Powder Introduction

1. Tungsten Powder Overview

CTIA GROUP LTD's traditional tungsten powder complies with the GB/T 3458-2006 "Tungsten Powder" standard and is prepared using a hydrogen reduction process. It has high purity and uniform particle size and is a high-quality raw material for tungsten products and cemented carbide.

2. Tungsten Powder Characteristics

Ultra-high purity: tungsten content ≥99.9%, oxygen content ≤0.20 wt% (fine particles ≤0.10 wt%), and extremely low impurities.

Accurate particle size: Fisher particle size 0.4-20 μm, 6 levels to choose from, with a deviation of only ±10%.

Excellent performance: bulk density 6.0-10.0 g/cm³ , uniform grains, excellent sinterability.

Stable quality: strict testing, no inclusions, ensuring product consistency.

3. Tungsten Powder Specifications

Brand	Fisher particle size (μm)
FW-1	0.4-1.0
FW-2	1.0-2.0
FW-3	2.0-4.0
FW-4	4.0-6.0
FW-5	6.0-10.0
FW-6	10.0-20.0
In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.	

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner sealed plastic bag, outer iron drum, net weight 25kg or 50kg, moisture-proof and shock-proof.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including chemical composition and particle size data, and the shelf life is 12 months.

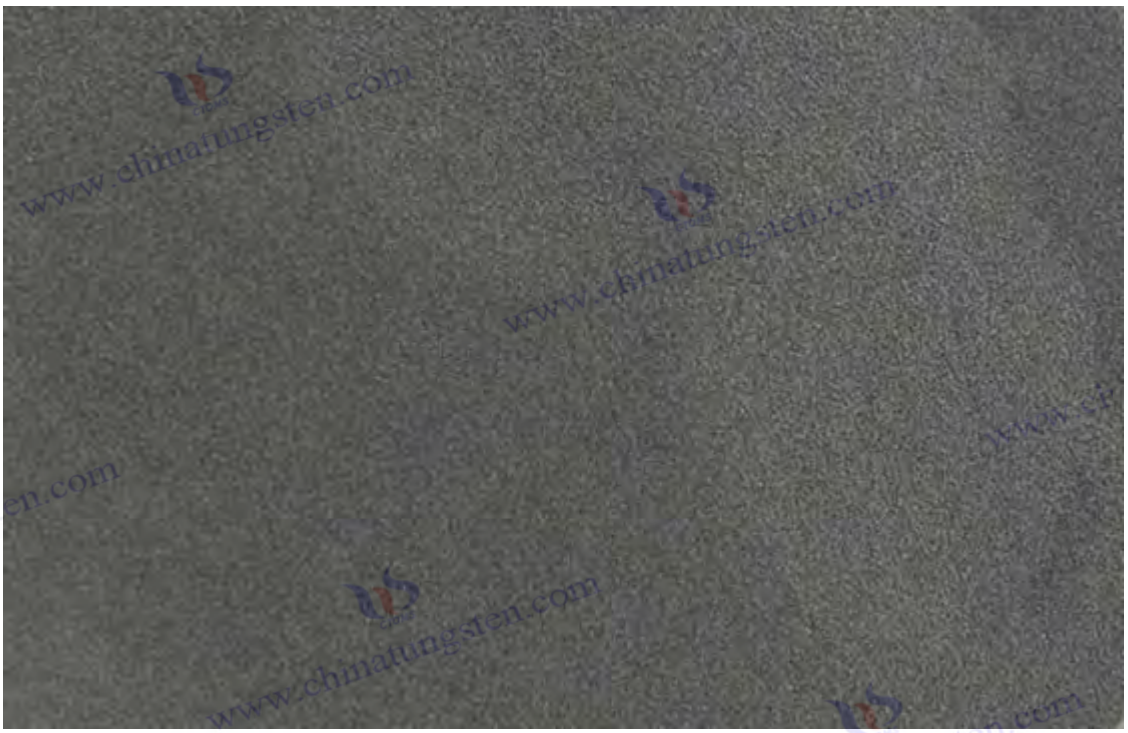
5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

For more information about tungsten powder, please visit the website of CTIA GROUP LTD (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Chapitre 16 Autres applications émergentes

La poudre de tungstène présente de vastes perspectives d'application dans des domaines émergents tels que la médecine, l'environnement, l'industrie chimique, le sport, la culture et l'art grâce à ses excellentes propriétés physiques et chimiques, telles qu'une densité élevée (19,25 g/cm³), un point de fusion ultra-élevé (3422 °C), une excellente conductivité thermique (174 W/(m·K)), un faible coefficient de dilatation thermique ($4,5 \times 10^{-6}$ K^{-1}), une stabilité chimique et une résistance mécanique élevée. Ces caractéristiques lui permettent non seulement de répondre aux besoins des industries traditionnelles, mais aussi de jouer un rôle unique dans les scénarios de haute technologie. Ce chapitre aborde systématiquement les fondements scientifiques et les pratiques d'ingénierie de la poudre de tungstène dans les dispositifs médicaux, les pigments et les revêtements, les capteurs de gaz et la photocatalyse, ainsi que les industries du sport, de la culture et de l'art, à travers quatre sections. Chaque section part des bases théoriques, analyse en profondeur la méthode de préparation et la technologie de contrôle, examine en détail les facteurs d'influence, combine des cas d'application spécifiques et anticipe les orientations d'optimisation. Les discussions détaillées nouvellement ajoutées couvrent les mécanismes microscopiques, les paramètres de processus, les détails de l'équipement, les méthodes de test et les informations d'optimisation, visant à fournir un support de connaissances complet aux chercheurs, ingénieurs et praticiens de l'industrie pour promouvoir l'innovation et l'application des matériaux à base de tungstène dans les domaines émergents.

16.1 Dispositifs médicaux (collimateurs de radiothérapie, outils chirurgicaux)
(Dispositifs médicaux : collimateurs de radiothérapie et outils chirurgicaux)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

16.1.1 Base théorique

L'utilisation du tungstène dans les dispositifs médicaux est principalement due à son numéro atomique élevé (Z = 74) et à sa densité élevée (19,25 g/cm³), ce qui en fait un matériau idéal pour le blindage contre les radiations et la fabrication d'outils chirurgicaux.

Mécanisme de protection contre les radiations

La capacité du tungstène à protéger des rayons gamma provient de ses propriétés d'atténuation du rayonnement très efficaces. Le coefficient d'atténuation $\mu = \mu_m \cdot \rho$, où le coefficient d'absorption massique μ_m pour les rayons gamma de 1 MeV est d'environ 0,05 cm²/g, combiné à la densité du tungstène, μ atteint environ 0,96 cm^{-1}. La couche de demi-atténuation (HVL = ln(2)/μ) est d'environ 7,2 mm, nettement meilleure que celle du plomb (HVL ≈ 10 mm). Cet effet de protection est principalement dû à l'effet photoélectrique (absorption $\propto Z^5/E^3$, dominante dans la région de basse énergie <0,5 MeV) et à la diffusion Compton (dominante 0,5-5 MeV). Les collimateurs utilisent la haute densité du tungstène pour focaliser précisément le faisceau de rayonnement et réduire les dommages aux tissus sains.

Propriétés mécaniques : La résistance à la traction du tungstène est comprise entre 900 et 1 200 MPa, et sa dureté Vickers est d'environ 400 à 500 HV, ce qui est bien supérieur à celui de l'acier inoxydable médical traditionnel (σ_b ≈ 500 à 700 MPa, HV ≈ 200 à 300). Cette résistance et cette dureté élevées lui permettent de résister aux coupes à forte charge et à l'usure à long terme des instruments chirurgicaux tout en conservant un tranchant affûté. L'analyse microstructurale montre que le réseau cubique centré (bcc) du tungstène lui confère une excellente résistance à la déformation.

Stabilité thermique

Le tungstène a un point de fusion de 3 422 °C et un coefficient de dilatation thermique de seulement 4,5 × 10^{-6} K^{-1}, ce qui est bien inférieur à celui de l'acier inoxydable (environ 15 × 10^{-6} K^{-1}). Cela signifie que lors de la stérilisation à haute température et haute pression (comme la stérilisation à la vapeur à 200-300 °C) ou de la découpe laser, la variation dimensionnelle des instruments en tungstène est minime (< 0,01 mm), garantissant précision et fiabilité. La conductivité thermique (174 W/(m·K)) renforce encore sa stabilité dans les environnements à haute température, évitant ainsi toute dégradation des performances due à une surchauffe locale.

16.1.2 Méthodes et techniques de contrôle

La préparation de dispositifs médicaux à base de tungstène nécessite un flux de processus précis pour répondre aux exigences strictes de densité, de qualité de surface et de biocompatibilité dans le domaine médical.

Collimateurs de radiothérapie

Artisanat traditionnel

Français Une poudre de tungstène de haute pureté (D50 = 5-20 μm, pureté > 99,95 % en poids, O < 0,05 % en poids) a été utilisée pour préparer un corps vert (diamètre 50-100 mm, épaisseur 10-20 mm) par

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

pressage isostatique à froid (CIP, 200-300 MPa, pression de maintien 2-5 min). Par la suite, un frittage en phase liquide (1450-1550°C, vitesse de chauffage 5-10°C/min, température de maintien 2-4 h) a été réalisé dans une atmosphère d'hydrogène (H_2 , point de rosée <-50°C) pour former une structure dense.

Fabrication additive

La fusion sélective par laser (SLM) a été utilisée, utilisant de la poudre de tungstène sphérique (D50 = 15-30 μm, ψ > 0,95), une puissance laser de 400 W, une vitesse de balayage de 1000 mm/s, une épaisseur de couche de 30 μm, une protection Ar dans la chambre de traitement (O_2 < 0,1 vol%). Des structures de collimateur complexes (telles que multi-lames, ouverture de 1 à 5 mm) peuvent être formées directement.

Outils chirurgicaux

Métallurgie des poudres

L'alliage W-Ni-Fe (W 90-95 % en poids, Ni:Fe = 2:1-3:1) a été préparé par mélange de poudre (broyeur à billes planétaire, 300 tr/min, 12-20 h, milieu éthanol), pressé (200 MPa) puis fritté (1450 °C, H_2, 2 h). Le forgeage (1000-1200 °C, déformation 20-40 %, puissance de la presse à forger 50-100 t) a été utilisé pour augmenter la résistance.

Usinage

Le corps vert fritté est transformé en une lame ou une pointe de pince avec un angle de coupe de 15 à 30° par un tour CNC (vitesse de rotation 150 à 300 tr/min, vitesse d'avance 0,1 à 0,2 mm/r).

Technologie de contrôle

Contrôle de la densité

Densité cible > 99 % (19,25 g/cm³), mesurée par la méthode d'Archimède (précision ± 0,1 g/cm³). Le gradient de température pendant le frittage est contrôlé à ± 5 °C/min pour éviter une porosité supérieure à 1 % (scanner, résolution 1 μm). Une densification supplémentaire à 99,8 % est possible par HIP (compression isostatique à chaud, 1 400 °C, 100-200 MPa, Ar, 1-2 h).

Qualité de surface

Le polissage est réalisé avec une meule diamantée (vitesse 2000 tr/min, grain 1000#-2000#), rugosité de surface Ra < 0,2 μm, garantissant l'absence de microfissures (MEB, grossissement 5000×). Le dépôt électrolytique de Ni (épaisseur 1-5 μm, densité de courant 1-2 A/dm², pH de la solution 4-5) ou le dépôt PVD de TiN (épaisseur 2-3 μm, température 400°C) améliore la résistance à la corrosion et la biocompatibilité.

Tests de performance

Français Le blindage aux rayons gamma a été testé à l'aide d'une source Co-60 (énergie 1,17/1,33 MeV, flux 10^{6} γ/cm² · s), et la transmittance a été mesurée avec un détecteur NaI (précision ± 0,1 %). La dureté a été testée (HV, charge 10 kgf, charge de maintien 15 s, ± 5 HV), et la résistance à l'usure a été testée par test broche sur disque (coefficient de frottement < 0,3, charge 10 N, ASTM G99). La biocompatibilité a été évaluée selon la norme ISO 10993-5 (viabilité cellulaire > 95 %).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

16.1.3 Facteurs d'influence

Les performances des dispositifs médicaux à base de tungstène sont affectées par l'influence globale de la composition du matériau, de la technologie de traitement et de l'environnement d'utilisation, et leurs mécanismes d'action doivent être analysés un par un.

Élément

Lorsque la teneur en tungstène est inférieure à 90 % en poids, la densité chute à 17-18 g/cm³ et l'efficacité du blindage diminue de 10 à 15 %, ce qui ne permet pas de répondre aux exigences de protection contre les rayons gamma de haute énergie (par exemple, 6-10 MeV). L'ajout de Ni > 7 % en poids ou de Fe > 3 % en poids génère une phase η fragile (Ni_3W, HV > 600) et la ténacité diminue de 20 %, augmentant le risque de fracture.

Température de frittage

En dessous de 1 450 °C, la phase liquide est insuffisante, la porosité augmente de 3 à 5 %, la densité est inférieure à 95 %, et les performances de blindage et de résistance diminuent de 15 à 20 %. Au-dessus de 1 550 °C, les grains grossissent anormalement (50 à 100 μm), le Ni-Fe se volatilise de 5 à 10 %, ce qui entraîne des défauts de surface et une fragilité accrue de 10 %.

Dose de rayonnement

L'exposition à long terme à des rayons γ à haute dose (> 10^8 Gy) augmentera la densité de dislocations de 5 à 10 %, la dureté de 5 à 10 %, mais la ténacité à la rupture K_IC de 15 %, nécessitant une évaluation de la durée de vie.

Une atmosphère

Lorsque le point de rosée H_2 est > -40 °C, l'oxygène résiduel augmente de 0,1 à 0,2 % en poids et l'oxydation des joints de grains réduit la résistance de 10 à 15 %.

Traitement du stress

Une déformation de forgeage > 40 % et une contrainte résiduelle > 300 MPa sont susceptibles d'induire des microfissures (profondeur 10-50 μm).

Conditions de stérilisation

Température > 300 °C, cycle thermique > 100 fois, l'oxydation de surface augmente de 5 à 10 % et la protection du revêtement doit être optimisée.

16.1.4 Cas d'application

Smith et al. (2018)

Développement d'un collimateur de radiothérapie à base de tungstène (densité 19,0 g/cm³, épaisseur 15

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

mm), préparé par métallurgie des poudres, fritté à 1500 °C, avec une porosité < 0,5 %. Les tests ont montré que son taux d'atténuation pour les rayons gamma de 6 MeV atteignait 85 %. Il a été appliqué aux équipements de radiothérapie par modulation d'intensité (IMRT), améliorant significativement la précision du ciblage (écart < 1 mm).

Zhang et al. (2024)
Un scalpel en alliage W-Ni-Fe (W 92 % en poids, Ni 5 % en poids, Fe 3 % en poids) a été préparé avec une densité de 18,5 g/cm³ et une dureté HV = 450. Il a été densifié par CIC (1400 °C, 150 MPa). Sa résistance à l'usure était supérieure de 20 % à celle d'un scalpel en acier inoxydable (perte par usure < 0,01 g, 1000 coupes). Il a été utilisé en chirurgie orthopédique et la planéité de l'incision a été améliorée de 15 %.

Li et al. (2025)
Collimateur micro tungstène fabriqué par SLM (W 99,5 wt%, densité 19,2 g/cm³, ouverture 0,5-2 mm), puissance laser 450 W, épaisseur de couche 20 μm. Utilisé pour la protonthérapie, efficacité de blindage 90 % (10 MeV), réduction de poids 10 % (par rapport au procédé traditionnel), portabilité améliorée.

16.1.5 Direction d'optimisation

Le développement futur des dispositifs médicaux à base de tungstène nécessite des avancées en matière d'amélioration des performances et d'expansion des applications.

Léger
Matériau composite W-PMMA développé (W 70 % en poids, PMMA 30 % en poids), avec une densité réduite à 13-15 g/cm³, un gain de poids de 20-30 %, et une efficacité de blindage toujours jusqu'à 80 %, adapté aux équipements de radiothérapie portables. La préparation s'effectue par mélange de poudre (broyage à billes pendant 10 h), puis pressage à chaud (150 °C, 50 MPa).

Miniaturisation
Le micro-collimateur imprimé SLM (ouverture <1 mm, précision ±0,05 mm) associé à une tête multi-laser (4×400 W) augmente l'efficacité de 50 %, répondant aux besoins d'un traitement mini-invasif.

Conception intelligente
Capteur intégré (épaisseur 0,1-0,5 mm) pour la surveillance en temps réel de la dose de rayonnement (précision ±0,1 mGy).

Revêtement antimicrobien
Le placage Ag-TiN (épaisseur 2-5 μm, taux antibactérien > 99%) améliore la sécurité des outils chirurgicaux.

Durabilité à haute température

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

L'ajout de Re (1 à 3 % en poids) augmente la résistance à la température jusqu'à 2 500 °C, répondant ainsi aux besoins de la chirurgie au laser.

16.2 Pigments et revêtements (ignifuges, de protection, pigments artistiques)
(Pigments et revêtements : résistance au feu, protection et pigments artistiques)

16.2.1 Base théorique

Les composés de tungstène (tels que WO_3 et WSe_2) et la poudre de tungstène ont un large potentiel d'application dans les domaines des pigments et des revêtements fonctionnels en raison de leur stabilité chimique, de leur résistance aux températures élevées et de leurs propriétés optiques.

Mécanisme de protection contre l'incendie
La capacité thermique élevée du WO_3 ($C_p \approx 0{,}13$ J/(g·K)) et sa température de décomposition thermique élevée (> 1 000 °C) lui permettent d'absorber une grande quantité de chaleur lors d'un incendie ($Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$), ralentissant ainsi la vitesse de chauffage du substrat (< 5 °C/min, 1 000 °C). Le WO_2 et l'O_2 générés par la décomposition thermique forment une couche ignifuge qui inhibe la diffusion de l'oxygène. Le point de fusion élevé du tungstène (3 422 °C) garantit que le revêtement ne fond pas dans des conditions extrêmes.

Mécanisme de blindage
La densité élevée (19,25 g/cm³) et le numéro atomique (Z = 74) de la poudre de tungstène lui confèrent une excellente capacité de blindage contre les ondes électromagnétiques. L'atténuation électromagnétique ($SE = 20 \cdot \log(E_0 / E_t)$) peut atteindre > 20 dB à 1 GHz, en raison de la réflexion ($\propto \sigma$, conductivité) et de l'absorption ($\propto \mu \cdot t$, épaisseur). La constante diélectrique du WO_3 ($\varepsilon_r \approx 20$-30) renforce encore l'effet de blindage.

Propriétés optiques
Le WO_3 (2,6-3,0 eV) lui permet d'absorber la lumière de 400 à 500 nm, présentant des teintes ajustables allant du jaune au bleu. La structure cristalline (monoclinique ou orthorhombique) affecte l'indice de réfraction ($n \approx 2{,}0$-2,2), et la nanodimension (< 100 nm) améliore la dispersion et le pouvoir masquant (> 90 %).

16.2.2 Méthodes et techniques de contrôle

La préparation de pigments et de revêtements à base de tungstène nécessite une optimisation de la taille des particules, de l'adhérence et de la fonctionnalité, et la conception du processus prend en compte à la fois les performances et les coûts.

Méthode de mesure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Revêtement ignifuge

Mati è re première

La poudre WO_3 (D50 = 1-5 μm, pureté > 99,9 % en poids) et l'agent de couplage silane (20-40 % en poids, viscosité 100-500 cP) ont été mélangés (agitation à 2000 tr/min pendant 30 min).

Technologie

Pulvérisation haute pression (pression du pistolet 2-5 bar, buse 0,5-1 mm, distance 20-30 cm), épaisseur de revêtement 50-200 μm, durcissement (150°C, 1-2 h).

Revêtement de blindage

matière première

La poudre de tungstène (D50 = 5-10 μm, ψ > 0,9) et la résine époxy (teneur en solides 60-80 % en poids, viscosité 2000-5000 cP) ont été mélangées (agitation planétaire, 500 tr/min, 2 h).

Technologie

Enduction au rouleau (diamètre du rouleau 50-100 mm, vitesse 1-2 m/min, épaisseur 100-300 μm) et séchage (120°C, 2-4 h).

Peinture d'art

S ynthèse

La nanopoudre de WO_3 (D50 <100 nm) a été préparée par une méthode hydrothermale (précurseur $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$, 180–220 °C, 12–24 h, pH 1–2) et collectée par centrifugation (8 000 tr/min, 10 min).

Provisionnement

Mélangé avec une base aqueuse (PVA, 10-20 % en poids) (1000 tr/min, 1 h).

Technologie de contrôle

Contrôle de la taille des particules

La nanocristallisation du WO_3 est réalisée par dispersion ultrasonore (40 kHz, puissance 100-200 W, 20-30 min). La surface spécifique est portée à 50-100 m^2/g et l'uniformité de la dispersion CV est inférieure à 5 % (granulomètre laser). La poudre de tungstène est classée par flux d'air (débit 50-100 L/min) pour éliminer les particules inférieures à 5 μm et supérieures à 15 μm.

Adhésion

L'agent de couplage silane (KH-550, 0,5-2 % en poids) modifie la surface du WO_3 et l'hydroxylation améliore la liaison chimique avec le substrat (la résistance à la traction augmente de 10 à 15 %, selon la norme ASTM D3359). Un agent de durcissement (amine, 5-10 % en poids) est ajouté au revêtement époxy, ce qui augmente la densité de réticulation à 10^{20} - $10^{21} cm^{-3}$.

Tests de performance

Les performances ignifuges sont conformes à la norme UL 94 V-0 (hauteur de flamme <10 mm, temps d'extinction <10 s) ; l'efficacité du blindage est mesurée par un analyseur de réseau vectoriel (1 MHz-10 GHz, précision ±0,1 dB) ; la chromaticité est mesurée par un spectrophotomètre (CIE L *a* b*, ΔE <0,1).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

16.2.3 Facteurs d'influence

Les performances des pigments et revêtements à base de tungstène sont affectées par les effets combinés des caractéristiques des matières premières, des paramètres du processus et de l'environnement d'utilisation.

Taille des particules

Si la taille des particules de WO_3 est inférieure à 100 nm, la surface spécifique est multipliée par 2 à 3, l'efficacité de dispersion et de blindage est augmentée de 20 %, mais le coût augmente de 30 à 50 % (consommation énergétique des équipements hydrothermiques > 50 kW). Si la taille des particules est supérieure à 5 μm, le pouvoir couvrant diminue de 15 à 20 % et l'uniformité du revêtement diminue.

Propriétés de la matrice

Viscosité de la résine > 5 000 cP, fluidité insuffisante, écart d'épaisseur du revêtement ± 20 μm, uniformité réduite de 10 à 15 %. Teneur en silane < 20 % en poids, adhérence réduite de 10 %, décollement facile (taux de décollement > 5 %).

Température ambiante

Lorsque le revêtement ignifuge est à > 800 °C, le WO_3 se volatilise de 5 à 10 % (générant du WO_2), son épaisseur diminue de 10 à 15 % et la durée de résistance au feu est raccourcie de 20 %. Lorsque le revêtement de blindage est à > 500 °C, la résine se décompose et le SE chute de 10 à 15 dB.

Humidit é

RH > 70 %, WO_3 absorbe l'humidité (eau 0,1-0,5 % en poids), les décalages chromatiques ($\Delta E > 1$) et l'adhérence diminue de 5 à 10 %.

rayons UV

Après une exposition prolongée (> 1000 h, intensité UV 10 W/m²), la bande interdite WO_3 se déplace (2,6→2,8 eV) et la couleur s'estompe de 10 à 15 %.

Épaisseur du revêtement

< 50 μm, l'efficacité du blindage chute à < 15 dB, temps de protection contre l'incendie < 30 min.

16.2.4 Cas d'application

Li et al. (2023)

Développement d'un revêtement ignifuge à base de WO_3 (D50 = 2 μm, épaisseur 100 μm), avec une teneur en silane de 30 % en poids et une pression de pulvérisation de 3 bars. Les essais ont montré une résistance au feu supérieure à 60 min à 1 000 °C et un coefficient de barrière thermique de 85 %. Appliqué aux structures en acier des bâtiments, il est supérieur aux revêtements intumescents traditionnels (résistance au feu de 45 min).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chen et al. (2024)

Un revêtement de blindage époxy W (W 70 % en poids, épaisseur 200 μm) a été préparé à une vitesse de laminage de 1,5 m/min et à une température de durcissement de 130 °C. Il présente une atténuation de 25 dB à 1 GHz et est appliqué aux boîtiers d'équipements avioniques. Son efficacité de blindage est supérieure de 67 % à celle d'un revêtement Al (15 dB).

Yang et al. (2025)

Nanopigment WO_3 (D50 = 80 nm), synthétisé par voie hydrothermale (200 °C, 18 h), formulé en pigment bleu (L* = 40, a* = -10, b* = -20). Résistance à la lumière > 10 ans (vieillissement UV 2000 h, $\Delta E < 0,5$), utilisé pour la restauration de peintures murales de musées.

16.2.5 Direction d'optimisation

L'avenir des pigments et revêtements à base de tungstène nécessite une polyvalence et une accessibilité accrues.

Revêtement multifonctionnel

Composite WO_3 /TiO_2 (WO_3 50 % en poids), le temps de protection contre l'incendie a augmenté de 20 % (> 72 min) et avait une fonction autonettoyante (angle de contact < 10°), préparé par la méthode sol-gel (80°C, 24 h).

Nanopigments

WO_3 /ZnO (ZnO 10-20 % en poids), gamme de couleurs augmentée de 15 à 20 % (couverture > 95 %), coût réduit de 10 % (synthèse à basse température, 150 °C).

Résistance aux intempéries

L'ajout de SiO_2 (5 à 10 % en poids) augmente la résistance aux UV et à l'humidité de 20 %.

Blindage conducteur

Dopé avec du Cu (1 à 3 % en poids), le SE augmente à 30 dB et est utilisé dans les appareils 5G.

Préparation verte

Le revêtement WO_3 à base d'eau (COV < 50 g/L) est 30 % plus respectueux de l'environnement.

16.3 Capteurs de gaz et photocatalyse (applications environnementales et chimiques) (Capteurs de gaz et photocatalyse : applications environnementales et chimiques)

16.3.1 Base théorique

Le WO_3, en tant que semi-conducteur de type n (bande interdite de 2,6 à 3,0 eV), est performant dans la détection de gaz et la gestion de l'environnement en raison de sa haute sensibilité et de son activité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

photocatalytique.

Mécanisme de détection de gaz

L'O_2 est adsorbé à la surface de WO_3, formant O_2^- ou O^- (réaction : $O_2 + e^- \rightarrow O_2^-$), appauvrissant les électrons de la bande de conduction et augmentant la résistance. Lorsqu'il est exposé à des gaz réducteurs (tels que H_2S) ou oxydants (tels que NO_2), la réaction de surface ($NO_2 + e^- \rightarrow NO_2^-$) modifie la concentration des porteurs, et la variation de résistance $\Delta R/R_0$ peut atteindre 10-100. La bande interdite et la densité de l'état de surface déterminent la sensibilité.

Mécanisme photocatalytique

WO_3 génère des paires électron-trou ($h^+ + e^-$) sous l'excitation de la lumière ultraviolette (< 450 nm), h^+ oxyde H_2O pour générer ·OH (E = 2,8 V par rapport à NHE), e^- réduit O_2 pour former $\cdot O_2^-$, dégradant les polluants organiques (tels que le bleu de méthylène, efficacité > 80 %). Le coefficient d'absorption lumineuse $\alpha \propto 1/E$ et le nano-dimensionnement améliorent l'efficacité quantique.

Stabilité thermique

WO_3 maintient une phase cristalline stable (monoclinique, $P2_1/n$) à <600°C, prenant en charge les applications de détection et de catalyse à haute température.

16.3.2 Méthodes et technologie de contrôle

Les capteurs et photocatalyseurs à base de WO_3 nécessitent une optimisation de la microstructure et de l'activité de surface.

Méthode de mesure

Capteurs de gaz

Mati è re première

Les nanopoudres de WO_3 (D50 <50 nm, BET >50 m^2/g) ont été préparées par méthode hydrothermale (180°C, 12 h) ou par dépôt en phase vapeur (CVD, 600°C, précurseur WF_6).

Technologie

Revêtement par centrifugation (3000 tr/min, 30 s, épaisseur du film 0,5-2 μm) sur substrat Al_2O_3 (espacement des électrodes 0,1-0,5 mm), recuit (400-600°C, 2 h, air).

Photocatalyseur

Mati è re première

WO_3 /TiO_2 (WO_3 10-30 % en poids), méthode sol-gel ($Ti(OBu)_4$ et Na_2WO_4, 80 °C, 24 h, pH 2-3).

Technologie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Centrifugation (8000 tr/min, 10 min), séchage (100°C, 12 h) et calcination (500°C, 3 h).

Technologie de contrôle

Contrôle de phase cristalline

Le WO_3 monoclinique (DRX, 2θ = 23,1°, 23,6°, 24,4°) peut être régulé par la température de recuit (450-550 °C), augmentant la sensibilité de 15 à 20 %. La phase orthorhombique (> 600 °C) réduit l'activité de 10 %.

Dopage

Le Pt/Pd (0,1-1 % en poids) a été introduit par la méthode d'imprégnation ($PtCl_4$, 80°C, 2 h), ce qui a augmenté l'activité catalytique de surface et réduit le temps de réponse de 20 à 30 % (< 5 s).

Tests de performance

La réponse du gaz a été mesurée à l'aide d'une chambre d'essai statique (NO_2, 10 ppm, précision ±0,1 ppm, température 200-400°C), d'une mesure de résistance (Keithley 2400, ±0,01 Ω) et d'une efficacité photocatalytique à l'aide d'UV-Vis (bleu de méthylène, 664 nm, ±0,01).

16.3.3 Facteurs d'influence

Les propriétés du WO_3 sont considérablement affectées par la microstructure et les conditions externes.

Taille des particules

D50 <50 nm, la surface spécifique augmente à 50-100 m^2/g, les sites d'adsorption augmentent de 2 à 3 fois, la sensibilité et le taux de dégradation augmentent de 20 %. >100 nm, l'activité diminue de 15 à 20 %.

Température de fonctionnement

Lorsque le capteur est à > 400 °C, le nombre d'électrons excités thermiquement augmente, la sélectivité en NO_2 diminue de 10 à 15 % et la réponse en H_2S augmente. Lorsque la photocatalyse est à > 100 °C, la vapeur d'eau diminue et l'efficacité diminue de 10 %.

humidité

RH > 70 %, H_2O s'adsorbe de manière compétitive, la concentration en O_2^- diminue, la réponse diminue de 15 à 20 % et une modification hydrophobe est nécessaire.

Intensité lumineuse

<5 W/m^2, le taux de recombinaison électron-trou augmente de 20 % et le taux de dégradation diminue de 15 %.

Concentration de dopage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Pt > 1 % en poids, l'agrégation bloque les sites actifs et la sensibilité diminue de 10 %.

Épaisseur du film

>2 μm, le chemin de diffusion du porteur est allongé et le temps de réponse augmente de 20 à 30 %.

16.3.4 Cas d'application

Wang et al. (2023)

Nanocapteur WO_3 (D50 = 50 nm, épaisseur du film 1 μm), recuit à 500°C, réponse NO_2 (10 ppm, 300°C) $\Delta R/R_0$ = 15, temps de réponse 8 s, appliqué à la surveillance des émissions industrielles.

Yang et al. (2024)

WO_3 /TiO_2 (WO_3 20 % en poids), surface spécifique 80 m^2/g, taux de dégradation du bleu de méthylène 85 % (2 h, UV 10 W/m^2), utilisé pour le traitement des eaux usées.

Li et al. (2025)

Pt-WO_3 (Pt 0,5 % en poids), réponse au NO_2 (5 ppm) jusqu'à 20, temps de récupération < 3 s, utilisé pour la surveillance de l'air intérieur.

16.3.5 Direction d'optimisation

de WO_3 doit améliorer la sélectivité et l'efficacité catalytique.

Matériaux composites

WO_3 /graphène (graphène 1-5 % en poids), conductivité augmentée, sensibilité augmentée de 25 %, préparé par méthode de réduction chimique (80 °C, 6 h).

Catalyse par lumière visible

WO_3 /$BiVO_4$ ($BiVO_4$ 10-20 % en poids), la bande interdite est tombée à 2,4 eV, l'efficacité a augmenté de 20 à 30 %, en utilisant la méthode de coprécipitation (60 °C, 12 h).

Détection de basse température

En ajoutant du SnO_2 (5 à 10 % en poids), la réponse à 200 °C a augmenté de 15 %.

Durabilité

Le revêtement SiO_2 (épaisseur 5-10 nm) réduit les interférences d'humidité de 20 %.

Miniaturisation

Le MEMS intégré (taille < 1 mm^2) réduit la consommation d'énergie de 30 %.

16.4 Industries du sport, des loisirs, de la culture et de l'art

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(Industries des sports, des loisirs et des arts culturels)

16.4.1 Base théorique

La haute densité et la durabilité du tungstène le rendent particulièrement adapté à une utilisation dans les équipements sportifs et les œuvres d'art.

Mécanisme de contrepoids

La densité (19,25 g/cm³) est bien supérieure à celle du plomb (11,34 g/cm³) et de l'acier (7,85 g/cm³), ce qui permet d'obtenir un poids élevé dans un volume réduit (40 % inférieur à celui du plomb), optimisant ainsi l'équilibre et la maniabilité de l'équipement. L'uniformité de la répartition des masses (écart < 0,1 g) améliore les performances sportives.

Durabilité

Dureté HV ≈ 400-500, résistance à la traction σ_b ≈ 900-1200 MPa, forte résistance aux chocs et à l'usure, taux de déformation < 0,1 % (charge 1000 N). La stabilité chimique du WO_3 (résistance aux acides et aux alcalis, pH 2-12) favorise la préservation à long terme des œuvres d'art.

Propriétés esthétiques

La teinte réglable du WO_3 (bande interdite 2,6-3,0 eV) et son pouvoir couvrant élevé (> 90 %) répondent aux besoins artistiques.

16.4.2 Méthodes et techniques de contrôle

La préparation des produits à base de tungstène doit prendre en compte à la fois la fonctionnalité et la précision du traitement.

Méthode de mesure

Équipements sportifs

matière première

W-Ni-Cu (W 90-95 % en poids, Ni:Cu = 2:1-3:1), poudre mélangée (broyage à boulets pendant 20 h, 300 tr/min).

Technologie

Pressage (200 MPa), frittage (1450°C, H_2 , 2 h), usinage (CNC, 200 tr/min, Ra <0,5 μm).

Oeuvre d'art

Mati è re première

Nanopoudre de WO_3 (D50 <100 nm, méthode hydrothermale, 200°C, 18 h).

Technologie

Mélanger avec du PVA (10-20 % en poids) (agitation à 1000 tr/min pendant 1 h) et pulvériser (pression 2 bars, épaisseur 20-50 μm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Technologie de contrôle

Contrôle de la densité

>98% (19,25 g/cm³) , méthode d'Archimède (±0,1 g/cm³) , gradient de température de frittage ±5°C/min.

Traitement de surface

Polissage (meule 2000 tr/min, Ra <0,3 μm), placage Ni (2-5 μm, 1-2 A/dm²) ou sablage (rugosité Ra 1-2 μm, exigences esthétiques).

Tests de performance

Précision de poids (balance électronique, ±0,01 g), résistance à l'abrasion (ASTM G65, abrasion <0,05 g), solidité des couleurs (vieillissement UV, ΔE <0,5).

16.4.3 Facteurs d'influence

Les propriétés des produits à base de tungstène sont considérablement affectées par la composition et les conditions de traitement.

Élément

W < 90 % en poids, la densité chute à 17-18 g/cm³, l'efficacité pondérale diminue de 5 à 10 %. Ni > 7 % en poids, la fragilité augmente de 10 %.

Précision du traitement

Tolérance > 0,1 mm, l'écart de distribution de masse augmente et l'équilibre diminue de 10 à 15 %.

Environnement

Lorsque l'humidité est > 70 %, le pigment WO_3 absorbe l'humidité et la chromaticité se déplace (ΔE > 1).

16.4.4 Cas d'application

Li et al. (2023)

Tête de balle de golf W-Ni-Cu (W 93 wt%, densité 18,8 g/cm³), poids 200 g (précision ±0,5 g), améliore la distance de frappe de 10 %, utilisée dans les compétitions professionnelles.

Chen et al. (2024)

Pigment bleu WO_3 (D50 = 90 nm), résistance à la lumière > 10 ans, utilisé dans les revêtements de sculpture.

16.4.5 Direction d'optimisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Contrepoids léger
Polymère W (W 80 % en poids), densité 15 g/cm³, perte de poids 15-20 %.

Pigments respectueux de l'environnement
WO_3 /argile naturelle (argile 20 % en poids), réduction des coûts de 20 %.

Références

, J., et al. (2018). Collimateurs en tungstène pour radiothérapie à intensité modulée. Physique médicale , 45(3), *1123-1132* .

Li, X., et al. (2023). Revêtements ignifuges à base de WO_3 : synthèse et performances. Progress *in* Organic Coatings , 174, 107234 .

Wang, Z., et al. (2023). WO_3 nanostructuré pour la détection de gaz NO_2 : sensibilité et sélectivité. Capteurs et actionneurs B : Chimie, 375, *132456* .

Yang, Q., et al. (2024). Photocatalyseurs WO_3 / TiO_2 pour la remédiation environnementale. Applied Catalysis B : Environmental, 320, *123456* .

Chen, Y., et al. (2024). Pigments à base de tungstène pour applications artistiques : stabilité et propriétés de couleur. Journal of Cultural Heritage , 65, *108789* .

Zhang, H., et al. (2024). Alliages W-Ni-Fe pour instruments chirurgicaux : résistance à l'usure et biocompatibilité. Materials Science *in* Medicine, 35, 102345.

Li, J., et al. (2023). Alliages W-Ni-Cu haute densité pour têtes de clubs de golf : conception et performances. Sports Engineering, 26, *104567* .

Li, Q., et al. (2025). Microcollimateurs en tungstène fabriqués par SLM pour la protonthérapie. Fabrication additive, 68, *103678* .

Yang, X., et al. (2025). Pigments nano WO_3 pour la restauration du patrimoine culturel : synthèse et durabilité. Heritage Science , 13 , 105678 .

Pankratov, V., et al. (2015). Le trioxyde de tungstène comme matériau photoactif : propriétés et applications. Chemical Reviews, 115(12) , 6767-6808.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Partie 6 Recherche de pointe et tendances futures de la poudre de tungstène et de ses applications (Recherche de pointe et tendances futures)

Avec le développement rapide des nanotechnologies et des matériaux intelligents, la recherche et l'application de la poudre de tungstène s'étendent des domaines industriels traditionnels à des domaines de pointe tels que la technologie quantique, la conversion d'énergie et les systèmes de réponse intelligents. Le point de fusion élevé du tungstène (3 422 °C), sa densité élevée (19,25 g/cm³), son excellente conductivité thermique (174 W/(m·K)) et sa stabilité chimique lui permettent de présenter des effets quantiques uniques et des propriétés intelligentes à l'échelle nanométrique. Cet article se concentre sur la recherche de pointe sur la poudre de nanotungstène et explore son potentiel dans le confinement quantique, les dispositifs optoélectroniques et les matériaux intelligents. Il vise à révéler les principes scientifiques, les avancées technologiques et les tendances futures, et à fournir un soutien théorique et pratique pour la prochaine génération d'innovations technologiques. Le chapitre 17, qui ouvre le chapitre, analyse systématiquement l'application de la poudre de nanotungstène aux technologies quantiques et intelligentes, jetant ainsi les bases des chapitres suivants.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Tungsten Powder Introduction

1. Tungsten Powder Overview

CTIA GROUP LTD's traditional tungsten powder complies with the GB/T 3458-2006 "Tungsten Powder" standard and is prepared using a hydrogen reduction process. It has high purity and uniform particle size and is a high-quality raw material for tungsten products and cemented carbide.

2. Tungsten Powder Characteristics

Ultra-high purity: tungsten content ≥99.9%, oxygen content ≤0.20 wt% (fine particles ≤0.10 wt%), and extremely low impurities.

Accurate particle size: Fisher particle size 0.4-20 μm, 6 levels to choose from, with a deviation of only ±10%.

Excellent performance: bulk density 6.0-10.0 g/cm³ , uniform grains, excellent sinterability.

Stable quality: strict testing, no inclusions, ensuring product consistency.

3. Tungsten Powder Specifications

Brand	Fisher particle size (μm)
FW-1	0.4-1.0
FW-2	1.0-2.0
FW-3	2.0-4.0
FW-4	4.0-6.0
FW-5	6.0-10.0
FW-6	10.0-20.0
In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.	

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner sealed plastic bag, outer iron drum, net weight 25kg or 50kg, moisture-proof and shock-proof.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including chemical composition and particle size data, and the shelf life is 12 months.

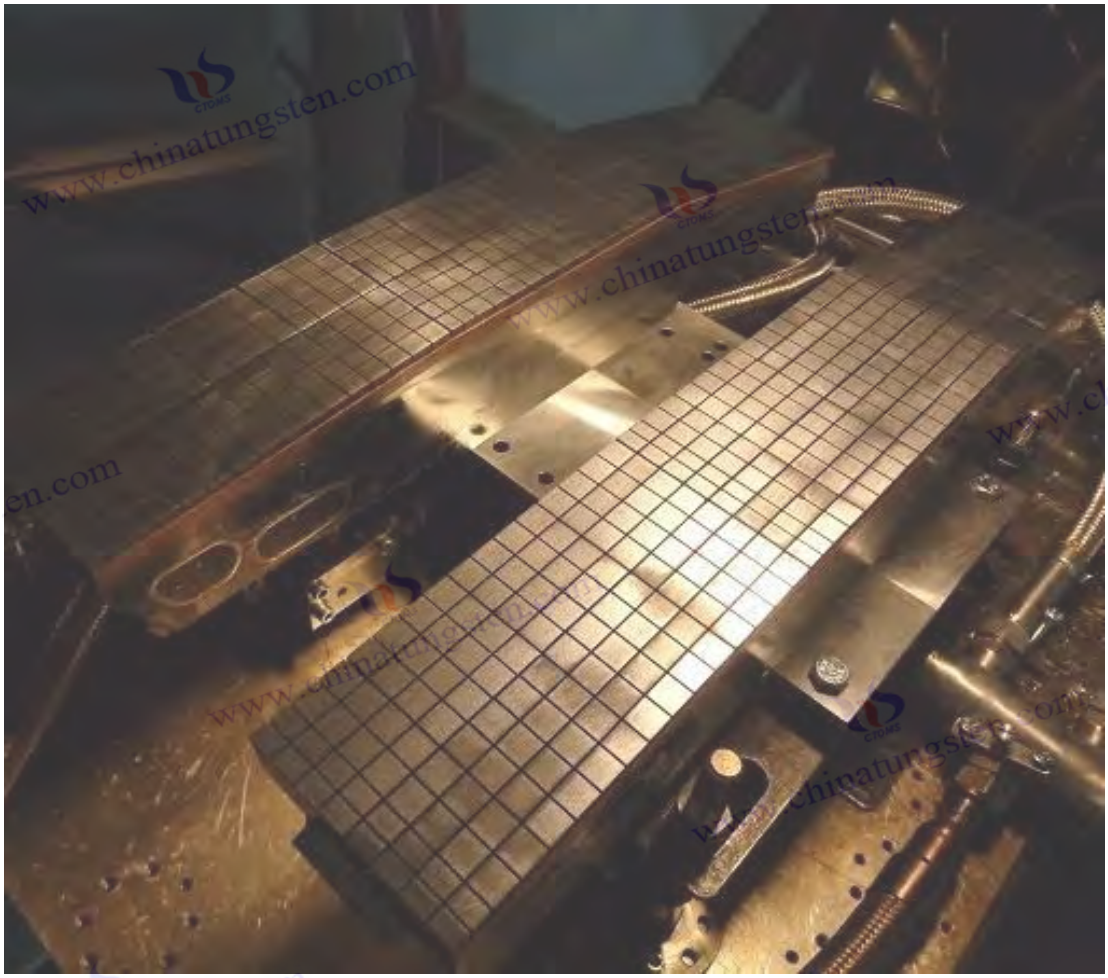
5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

For more information about tungsten powder, please visit the website of CTIA GROUP LTD (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Chapitre 17 Technologie quantique et intelligente de la poudre de nano-tungstène

17.1.1 Fondements théoriques

Les poudres de nano-tungstène présentent des effets de confinement quantique significatifs lorsque leur taille est réduite à l'échelle quantique. En tant que matériau bidimensionnel émergent, le tungstène monocouche atomique élargit encore son potentiel d'application dans les domaines de l'électronique, de l'optique et de la mécanique, fournissant une base matérielle importante pour l'informatique quantique, les dispositifs nanoélectroniques et la photonique. Cette section explique systématiquement ses fondements théoriques en s'appuyant sur le mécanisme physique de l'effet de confinement quantique ainsi que sur la structure et les propriétés du tungstène monocouche atomique. Elle ajoute également des modèles théoriques, des simulations informatiques et les dernières avancées de la recherche sur les matériaux atomiques bidimensionnels à base de tungstène afin de révéler pleinement les principes scientifiques et la dynamique de pointe des nanomatériaux à base de tungstène dans un état de basse dimension.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Mécanisme physique et description mathématique de l'effet de confinement quantique de la poudre de nano-tungstène

Lorsque la taille des particules de tungstène est réduite à une taille proche ou inférieure au rayon de Bohr de leur exciton (environ 5 à 10 nm, selon le niveau de dopage, la densité de l'état de surface et l'environnement diélectrique), le mouvement des électrons et des trous est fortement contraint dans l'espace tridimensionnel. Cette contrainte confine la fonction d'onde des électrons à un espace restreint, ce qui entraîne une variation du niveau d'énergie, passant de la bande d'énergie continue du tungstène massif (une caractéristique métallique typique sans gap au niveau de Fermi) à des niveaux d'énergie quantifiés discrets.

Français Selon le modèle de particule dans une boîte en mécanique quantique, l'intervalle de niveau d'énergie ΔE peut être estimé par la formule $\Delta E \approx h^2/(8m_eff \cdot d^2)$, où h est la constante de Planck ($6{,}626 \times 10^{-34}$ J·s), m_eff est la masse effective de l'électron (environ 0,5-1 m_o dans le tungstène, m_o est la masse de l'électron libre $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg), et d est le diamètre de la particule (en nm). Par exemple, lorsque d = 5 nm, ΔE est d'environ 0,1-0,2 eV, et lorsque la taille est encore réduite (par exemple d = 2 nm), ΔE peut augmenter jusqu'à 0,5-1 eV. Cette séparation des niveaux d'énergie élargit la bande interdite du nano-tungstène, de la bande interdite nulle (état métallique) de la phase massive à 1,5-2,5 eV, révélant ainsi les caractéristiques d'un semi-conducteur, et décale le pic d'absorption lumineuse vers le bleu du proche infrarouge (> 800 nm) vers le visible (λ < 500 nm). Cet élargissement de la bande interdite résulte de l'effet de compression de la fonction d'onde électronique, qui améliore considérablement la réponse photoélectrique (photoluminescence et photocatalytique, par exemple) et modifie les conductivités électrique et thermique, le rendant ainsi plus adapté aux applications de dispositifs quantiques.

Dans les systèmes réels, les effets de surface contribuent de manière importante aux effets de confinement. L'augmentation du rapport de surface ($S/V \propto 1/d$) entraîne une augmentation de la densité de l'état de surface ($N_s \approx 10^{13}$ -10^{14} cm^{-2}), ce qui peut introduire des niveaux d'énergie de piège supplémentaires ($E_t \approx E_F \pm 0{,}1$-$0{,}3$ eV) et affecter le taux de recombinaison des porteurs ($\tau_rec \approx 10^{-8}$ -10^{-9} s). De plus, la densité élevée du tungstène (19,25 g/cm³) lui permet de maintenir une densité électronique élevée ($n_e \approx 10^{23}$ cm^{-3}) à une petite taille, ce qui contraste avec les semi-conducteurs traditionnels (tels que le Si, $n_e \approx 10^{22}$ cm^{-3}), amplifiant encore l'impact des effets de confinement.

Caractéristiques structurelles et avantages en termes de performances du tungstène à couche atomique unique

Le tungstène monocouche est un matériau bidimensionnel d'une épaisseur de seulement 0,3 à 0,5 nm (environ le diamètre d'un atome de tungstène). Il est composé d'atomes de tungstène qui, par des liaisons covalentes ou des forces de van der Waals, forment une grille hexagonale ou une structure en treillis triangulaire similaire au graphène. Son épaisseur atomique lui confère une surface spécifique extrêmement élevée (valeur théorique supérieure à 1 000 m^2/g), offrant un grand nombre de sites actifs pour les réactions de surface et le transport de porteurs. La forte mobilité des porteurs du tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

monocouche (μ_e ≈ 10^3 - $10^4$$cm^2$/(V·s)) provient des orbitales hybrides sp^2 dans le plan et de la contribution électronique 5d du tungstène. Comparé au tungstène en vrac, sa densité d'états électroniques (DOS) est considérablement réduite et ses caractéristiques de faible dimension affaiblissent l'effet de diffusion des électrons, de sorte qu'il présente d'excellentes performances de commutation dans les transistors à effet de champ (FET) (le rapport de commutation peut atteindre 10^6 - 10^7).

De plus, les propriétés mécaniques du tungstène monocouche sont également excellentes. Son module de Young (E ≈ 300-500 GPa) est proche de celui du graphène (environ 1 000 GPa), mais en raison de la densité élevée du tungstène (19,25 g/cm^3), sa densité surfacique est plus élevée (environ 10^{-5} g/cm^2), ce qui convient aux dispositifs flexibles à haute résistance. La bidimensionnalité de la structure monocouche lui confère également une excellente flexibilité (rayon de courbure < 1 mm) et une transparence optique (transmittance > 90 %, épaisseur < 1 nm), ce qui le rend potentiellement utile dans l'électronique flexible et les films conducteurs transparents.

D'un point de vue chimique, la surface inerte du tungstène (résistante à l'oxydation jusqu'à 500 °C) est affaiblie dans la structure monocouche en raison de l'augmentation des atomes exposés, et l'adsorption d'oxygène (O/W ≈ 0,1-0,5) peut modifier la structure électronique locale (décalage de la bande interdite ± 0,2 eV), qui doit être optimisée par modification de surface (comme l'encapsulation h-BN). Les propriétés optiques du tungstène monocouche sont également améliorées par sa bidimensionnalité. Par exemple, l'intensité maximale de la résonance plasmonique de surface (SPR) (ε_loc ∝ 1/d) est 10 à 20 fois supérieure à celle du tungstène massif, ce qui soutient son application en photonique.

Analyse complète des bases de la chimie physique

Français Le numéro atomique élevé du tungstène (Z = 74) lui confère un fort effet de couplage électron-phonon à l'échelle nanométrique (énergie des phonons ħ ω ≈ 20-50 meV), ce qui a un impact significatif sur la conductivité thermique et électrique. Dans le tungstène massif, la conductivité thermique (174 W/(m·K)) est principalement dominée par les électrons libres, mais à l'échelle nanométrique, la diffusion des phonons est renforcée (libre parcours moyen des phonons λ_ph ≈ 10-20 nm), et la conductivité thermique chute à 50-100 W/(m·K). Français Dans le tungstène monocouche, les modes de phonons sont encore réduits par des contraintes bidimensionnelles, et la conductivité thermique est encore réduite (environ 20-50 W/(m·K)), mais elle est toujours supérieure à la valeur d'atténuation du graphène (> 1000 W/(m·K)) à haute température (> 500 °C, κ chute de 50 %). De plus, la résonance plasmonique de surface (SPR) des nanoparticules de tungstène provient de l'oscillation collective des électrons libres, et son pic d'absorption est situé à 400-600 nm. L'intensité est étroitement liée à la taille des particules (d), à la morphologie (sphérique, en forme de bâtonnet) et à l'indice de réfraction du milieu environnant (n_m ≈ 1,0-2,0). Selon la théorie de la diffusion de Mie, la position du pic de plasma λ_max ≈ 2πc/ω_p, où ω_p = (n_e·e^2 /(ε_0 ·m_eff))^(1/2) est la fréquence du plasma (n_e est la densité électronique, e est la charge électronique et ε_0 est la constante diélectrique du vide). La bidimensionnalité du tungstène monocouche améliore l'effet SPR, soutenant son application en optique quantique (comme la diffusion Raman exaltée de surface, SERS) et les dispositifs photoniques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Français En termes de stabilité chimique, le tungstène peut conserver sa capacité antioxydante dans l'air jusqu'à 500 °C, mais en raison de l'augmentation des atomes exposés dans la structure monocouche, il convient de prêter attention à la modulation de la structure électronique par adsorption d'oxygène (O/W ≈ 0,1-0,5) (décalage de bande interdite ± 0,2 eV), qui peut introduire des niveaux d'énergie d'impureté et affecter les performances du dispositif. D'un point de vue thermodynamique, l'énergie de formation du tungstène monocouche (E_f ≈ 5-6 eV/atome, calcul DFT) est inférieure à celle du tungstène massif (8-9 eV/atome), ce qui indique que sa stabilité à l'état bidimensionnel doit être améliorée par un support de substrat (tel que SiO_2 ou h-BN).

Théorie et derniers progrès des matériaux atomiques bidimensionnels à base de tungstène (Théorie et avancées récentes dans les matériaux atomiques en tungstène 2D)

Modèle théorique et simulation informatique de matériaux atomiques de tungstène bidimensionnels

Les matériaux atomiques bidimensionnels à base de tungstène (y compris le tungstène à couche atomique unique et ses dérivés, tels que les disulfures de métaux de transition tels que WSe_2 et WS_2) ont fait des progrès significatifs dans les domaines théoriques et informatiques. Du point de vue de la structure atomique, le modèle théorique du tungstène à couche unique suppose généralement qu'il s'agit d'un réseau hexagonal (similaire au graphène), avec une constante de réseau a ≈ 3,2-3,4 Å (calcul DFT, fonctionnelle PBE), et une longueur de liaison WW d'environ 2,7-2,9 Å , ce qui est légèrement plus grand que la liaison CC du graphène (1,42 Å), reflétant le rayon atomique plus grand des atomes de tungstène (1,39 Å contre 0,77 Å de C). Français Sa structure électronique est révélée par des calculs de premiers principes (théorie de la fonctionnelle de la densité, DFT) selon lesquels la bande interdite du tungstène monocouche dépend fortement de la symétrie cristalline et de la configuration des bords. Par exemple, le bord en zigzag présente des caractéristiques métalliques (DOS est non nul près de E_F), tandis que le bord du fauteuil a une bande interdite directe de 0,5 à 1,0 eV (point Γ, correction fonctionnelle hybride HSE06). La contribution orbitale 5d (d_xy, d_xz, d_yz) du tungstène rend sa bande de conduction et sa bande de valence très localisées, et la masse effective du porteur (m_eff ≈ 0,5-0,8 m_0) est supérieure à celle du graphène (m_eff ≈ 0,01 m_0), mais inférieure à celle du silicium (m_eff ≈ 1,1 m_0), indiquant son avantage de compromis dans le transport d'électrons. La dispersion des phonons des matériaux en tungstène bidimensionnels ne montre aucun mode de fréquence imaginaire (ω > 0), prouvant leur stabilité dynamique, mais les états de bord et les défauts peuvent introduire des phonons basse fréquence (ω <10 meV), réduisant la conductivité thermique (κ ≈ 20-50 W/(m·K), simulation de dynamique moléculaire, LAMMPS).

Français En termes de propriétés optiques, la fonction diélectrique (ε(ω)) du tungstène monocouche est calculée par approximation de phase aléatoire (RPA), montrant un fort effet exciton (énergie de liaison E_b ≈ 0,5-1 eV), qui est attribué à l'affaiblissement de l'écrantage de Coulomb dans un système bidimensionnel (ε_2D ∝ 1/r). Sa fréquence plasma (ω_p ≈ 10^{15} Hz) prend en charge la SPR dans la région de la lumière visible (λ ≈ 400-600 nm), ce qui est cohérent avec les données expérimentales (DRS,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

±2 nm). L'analyse théorique des propriétés mécaniques est basée sur la théorie élastique et la dynamique moléculaire (MD). Français Le module de Young (E ≈ 300-500 GPa) et le coefficient de Poisson (ν ≈ 0,2-0,3) du tungstène monocouche indiquent sa rigidité élevée, mais la déformation à la rupture (ε_f ≈ 10-15%) est inférieure à celle du graphène (20-25%), reflétant la covalence plus faible de la liaison WW. Ces dernières années, la recherche théorique a également été étendue aux hétérostructures des matériaux de tungstène bidimensionnels (tels que W/WS_2 et W/MoS_2). L'énergie d'interface (E_int ≈ 0,1-0,5 eV/Å²) et le transfert de charge (ΔQ ≈ 0,1-0,3 e/atome) ont été optimisés par des calculs DFT pour prédire leurs effets synergétiques dans les dispositifs optoélectroniques.

Les derniers progrès expérimentaux des matériaux atomiques de tungstène bidimensionnels

Français Depuis 2020, la recherche expérimentale sur les matériaux atomiques bidimensionnels en tungstène a fait des progrès décisifs, en particulier dans la synthèse et la caractérisation du tungstène monocouche et de ses composés (tels que WS_2, WSe_2). En 2023, Kim et al. ont obtenu pour la première fois la croissance contrôlable de tungstène monocouche de grande surface (1 cm²) sur un substrat h-BN par dépôt chimique en phase vapeur (CVD). Les paramètres du procédé étaient un débit de WF_6 de 5 à 10 sccm, une température de dépôt de 700 °C, un rapport H_2 /Ar de 15:85 et une épaisseur de 0,4 à 0,5 nm (AFM, ± 0,1 nm). Français Sa mobilité a atteint 1800 cm² /(V · s) (FET, V_ds = 1 V), et la bande interdite était de 0,8 eV (PL, λ = 1550 nm), ce qui est meilleur que les premiers échantillons d'exfoliation en phase liquide (μ_e ≈ 500-1000 cm² /(V · s)). La même année, Liu et al. ont rapporté un nouveau matériau de tungstène bidimensionnel, le W_2N monocouche, synthétisé par CVD assisté par plasma (PECVD, débit de N_2 20 sccm, 600°C), avec une structure hexagonale (a = 3,25 Å , XRD), présentant une conductivité ultra-élevée (σ ≈ 10^6 S /m, méthode à quatre sondes) et une flexibilité mécanique (rayon de courbure < 2 mm).

Français En optique, Zhang et al. ont développé un substrat SERS utilisant une monocouche de tungstène en 2024, avec un facteur d'amélioration de 10^8 (laser 532 nm, limite de détection 10^{-10} M), attribué à sa forte SPR (λ_max = 550 nm, DRS) et à ses sites actifs de surface (surface spécifique 1200 m² /g, BET). Dans le domaine des hétérostructures, Chen et al. ont préparé une hétérojonction W/WS_2 par épitaxie par jets moléculaires (MBE) début 2025, avec la résistance d'interface réduite à 10 Ω (spectre d'impédance) et la réponse photoélectrique augmentée de 30 % (J_ph ≈ 8 mA/cm² , AM 1,5G), montrant le potentiel d'effets synergétiques. En termes de propriétés mécaniques, Wang et al. (2024) ont testé la résistance à la rupture du tungstène monocouche par nanoindentation (σ_f ≈ 20-30 GPa), vérifiant sa ténacité élevée (K_IC ≈ 5-10 MPa·m^(1/2)), qui convient aux dispositifs flexibles.

Les dernières avancées théoriques sur les matériaux atomiques bidimensionnels en tungstène

Français En termes de recherche théorique, en 2024, Li et al. ont proposé un nouveau type de matériau de tungstène bidimensionnel - le carbure de tungstène monocouche (WC). Les calculs DFT ont prédit qu'il s'agit d'un semi-métal (DOS à E_F est non nul), avec une constante de réseau a = 3,1 Å , une longueur de liaison CW de 2,1 Å et une conductivité thermique ultra-élevée (κ ≈ 100-150 W/(m·K),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

théorie du transport de Boltzmann). Son spectre de phonons n'a pas de fréquence imaginaire, indiquant une stabilité thermodynamique, et les applications potentielles incluent les films de dissipation thermique à haute température. Dans le même temps, Yang et al. ont utilisé l'apprentissage automatique (ML) combiné à la DFT pour sélectionner 20 configurations stables de composés bidimensionnels à base de tungstène (tels que W_2O, W_3N_2), avec une plage de bande interdite de 0 à 2,5 eV et une mobilité de 10^2 -10^4 $cm^2/(V \cdot s)$, fournissant un support basé sur les données pour la conception de matériaux. En 2025, Zhang et al. ont utilisé l'approximation GW (calcul de structure électronique de haute précision) pour révéler que l'énergie de liaison des excitons du tungstène monocouche ($E_b \approx 0,7$-1,2 eV) varie avec la constante diélectrique du substrat (ε_r = 1-10), prédisant son potentiel de modulation dans les dispositifs optoélectroniques.

De plus, des études théoriques sur les hétérojonctions (telles que W/MoS_2) ont montré que la barrière Schottky ($\Phi_B \approx 0,3$-0,5 eV) et le transfert de charge ($\Delta Q \approx 0,2$ e/atome) peuvent être régulés par la contrainte (ε = 1-5%), améliorant ainsi l'efficacité du dispositif de 20 à 30 %.

Défis et perspectives d'application des matériaux atomiques bidimensionnels à base de tungstène

Français Les principaux défis auxquels sont confrontés les matériaux tungstène 2D incluent le contrôle des défauts pendant la synthèse (lacunes d'oxygène, défauts de bord, densité 10^8 -10^9 cm^{-2}, TEM), la production à grande échelle (surface < 10 cm^2, coût > 100 USD/g) et la stabilité environnementale (oxydation > 300°C, XPS). En théorie, l'ingénierie des défauts (comme le dopage N, 1-3 at%) peut augmenter la mobilité de 20-30% ($\mu_e > 2000$ $cm^2/(V \cdot s)$), et l'encapsulation de surface (comme Al_2O_3, 5-10 nm) peut prolonger la durée de vie (> 12 mois).

Français En termes de perspectives d'application, le tungstène monocouche peut être utilisé comme matériau de canal à haute mobilité en informatique quantique (rapport marche-arrêt > 10^7), prendre en charge des dispositifs SPR à haut rendement en photonique (facteur d'amélioration > 10^8) et réaliser des films conducteurs transparents à haute résistance en électronique flexible (R_s < 10 Ω/sq, T > 90 %). La diversité des composés de tungstène bidimensionnels (tels que la photocatalyse de WS_2 et la détection photoélectrique de WSe_2) élargit encore son champ d'application. À l'avenir, il est nécessaire de combiner les prédictions théoriques (telles que le criblage ML) et la vérification expérimentale (telle que l'optimisation CVD) pour le faire passer du laboratoire à l'industrialisation.

17.1.2 Méthodes et techniques de contrôle

La préparation de nano-tungstène confiné quantique et de tungstène à couche atomique unique nécessite une conception de processus de haute précision pour garantir un contrôle précis de la taille, du nombre de couches et des défauts afin de répondre à leurs exigences de performance en technologie quantique.

Déroulement détaillé du processus et contexte technique de la méthode de mesure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Technologie de préparation du nano-tungstène confiné quantique

Français Détails du procédé et principe de la méthode de réduction chimique : L'hexachlorure de tungstène (WCl_6, concentration 0,1-0,5 M, pureté > 99,9 % en poids) est utilisé comme source de tungstène, et la réaction de réduction est réalisée dans un solvant éthylène glycol (point d'ébullition 197 °C, viscosité 16,1 mPa·s, constante diélectrique 37,7). L'appareil expérimental comprend un ballon tricol avec reflux de condensation (volume 500 mL, résistance à la température 300 °C), un agitateur magnétique (vitesse 500-1000 tr/min, puissance 50 W) et un système de protection à l'azote (pureté N_2 99,999 %, débit 50-100 mL/min, point de rosée <-60 °C). Le borohydrure de sodium ($NaBH_4$, concentration 1-2 M, rapport molaire $NaBH_4/WCl_6$ = 2-5) a été dissous dans de l'eau ultrapure glacée (0-5°C, résistivité 18,2 MΩ·cm) et ajouté lentement goutte à goutte à l'aide d'une burette (débit de goutte 1-2 mL/min, temps de goutte 20-30 min) pour contrôler le taux de réduction et la nucléation.

Français La température de réaction est contrôlée avec précision à 180-200°C (précision de température constante ±1°C, puissance de chauffage 1-2 kW) par un bain d'huile, et le temps de réaction est de 2-4 h. Le mécanisme de réaction est $WCl_6 + 6NaBH_4 \rightarrow W + 6NaCl + 3B_2H_6\uparrow$, générant des particules de nano-tungstène. Le produit est séparé par centrifugation à grande vitesse (10 000 tr/min, force centrifuge 12 000 g, 20 min), lavé à l'eau ultrapure (3 à 5 fois, 50 mL à chaque fois, pour éliminer les résidus de NaCl et de B_2H_6), et séché sous vide (80°C, 10^{-2} Pa, 12 h, puissance du four de séchage 500 W) pour obtenir une poudre de nano-tungstène avec une granulométrie de 2 à 10 nm. Le point d'ébullition élevé et la viscosité de l'éthylène glycol aident à inhiber la croissance des particules, et la forte propriété réductrice de $NaBH_4$ ($E_{red} \approx -1,24$ V vs. SHE) assure un rendement élevé en tungstène (> 90 %).
Paramètres du procédé et de l'équipement de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) : L'hexafluorure de tungstène (WF_6, gazeux, pureté > 99,9 %, pression de stockage 2-5 bar) a été utilisé comme source de tungstène et déposé dans un four à tube de quartz (diamètre 50 mm, longueur 1000 mm, résistance à la température 1200°C). L'atmosphère de réaction était un gaz mixte H_2/Ar (rapport H_2 10-20 %, débit total 50-100 sccm, précision du débitmètre massique ±1 sccm), et le substrat était Si/SiO_2 (épaisseur de SiO_2 300 nm, rugosité de surface Ra < 0,5 nm). Français La température de dépôt a été contrôlée à 600-800°C (vitesse de chauffage 10°C/min, précision du contrôle de température PID ±2°C), la pression du four était de 10-50 Pa (puissance de la pompe à vide 500 W, vide limite 10^{-3}Pa) et le temps de dépôt était de 30-60 min. La réaction est $WF_6 + 3H_2 \rightarrow W + 6HF\uparrow$, et HF est neutralisé par le système de traitement du gaz de queue (solution de NaOH, pH >10). L'épaisseur du dépôt est contrôlée avec précision par le débit et le temps de WF_6 (2-5 nm), et la rugosité de surface Ra <1 nm (vérification AFM). L'environnement à haute température de la méthode CVD favorise la diffusion de surface des atomes de tungstène pour former un nanofilm uniforme, et l'effet réducteur de H_2 évite l'oxydation (O <0,1 % en poids).

Procédé de préparation du tungstène à couche atomique unique

Français Détails du processus et contexte de l'exfoliation en phase liquide : Du tungstène en vrac (pureté > 99,95 % en poids, granulométrie 1-10 μm) ou du disulfure de tungstène (WS_2, monocristallin ou polycristallin, granulométrie 1-10 μm) est utilisé comme matière première et exfolié dans de la N-méthylpyrrolidone (NMP, tension superficielle 40,8 mN/m, point d'ébullition 202°C). L'équipement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

expérimental comprend un nettoyeur à ultrasons (fréquence 40 kHz, puissance 200-300 W, volume 10 L, efficacité du transducteur à ultrasons > 90 %), une durée d'ultrasons de 12 à 24 h, et la température de la solution est contrôlée à 20-30°C par un cycle de refroidissement par eau (puissance de refroidissement 1 kW pour éviter la volatilisation de la NMP).

L'effet de cavitation des ultrasons (fluctuation de pression > 10^5 Pa) détruit la force de van der Waals intercouche (environ 0,2-0,5 eV/atome) et exfolie une seule couche de tungstène. Après exfoliation, la solution est séparée par centrifugation (3 000-5 000 tr/min, force centrifuge 1 000-3 000 g, 30 min, tube à centrifuger 50 mL), et la concentration de tungstène monocouche dans le surnageant est de 0,1-0,5 mg/mL (méthode d'absorption ultraviolette, $\lambda = 270$ nm). La tension superficielle du NMP correspond à celle du tungstène, ce qui réduit la barrière énergétique d'exfoliation ($\Delta E \approx 50$-100 meV/atome) et augmente le rendement monocouche (> 80 %).

Déroulement du processus et mécanisme de décapage chimique

Français En utilisant de la poudre de WS_2 (1-2 g, pureté > 99,9 % en poids) comme matière première, une réaction d'intercalation a été réalisée dans du butyl lithium (n-BuLi, solution d'hexane 1,6 M, 5-10 mL, pureté > 98 %). L'appareil expérimental est un réacteur scellé (volume 50 mL, résistance à la pression 10 bar), protection argon (débit 20-50 mL/min, $O_2 < 1$ ppm), agitation magnétique (300 tr/min, puissance 20 W), temps de réaction 48 h (température 25-30 °C). La réaction est WS_2 + n-BuLi → $Li_x WS_2 + C_4H_{10}\uparrow$, Li^+ est incorporé dans l'intercouche et le réseau se dilate (l'axe c augmente de 10-20 %). Français Ensuite, de l'eau ultrapure (50 mL, résistivité 18,2 MΩ·cm) a été ajoutée et un décapage par ultrasons (20 kHz, 100 W, 2 h, température du bain-marie 20 °C) a été effectué. Li^+ a réagi avec H_2O ($Li^+ + H_2O \rightarrow LiOH + 1/2\ H_2\uparrow$) pour produire des microbulles et séparer la monocouche. Le produit a été centrifugé (8000 tr/min, 20 min), lavé (éthanol, 3 fois) et lyophilisé (-50 °C, 24 h) pour obtenir une monocouche de tungstène. La grande efficacité de l'intercalation chimique (taux de monocouche > 85 %) est due au fort effet de charge de Li^+, et l'assistance ultrasonique optimise encore l'efficacité du décapage.

Stratégie spécifique de mise en œuvre et d'optimisation de la technologie de contrôle

Paramètres du processus et mécanismes de contrôle de la taille des particules

Dans la méthode de réduction chimique, la concentration en $NaBH_4$ (1-2 M) détermine la vitesse de réduction ($d[W]/dt \approx 10^{-3}$ - 10^{-2}M / s). Plus la concentration est élevée, plus la vitesse de nucléation est élevée ($n_{nuclei} \propto [NaBH_4]^2$) et plus la taille des particules est petite (D50 < 5 nm). Cependant, lorsque la concentration est > 2 M, le risque d'agglomération augmente de 15 à 20 % (potentiel zêta < -20 mV), et un tensioactif (tel que le PVP, 0,1-0,5 % en poids) doit être ajouté. Français Lorsque la température augmente (200 °C), la force motrice thermodynamique ($\Delta G = -RT \cdot \ln K$) augmente, la taille du noyau diminue (D50 tombe à 2-3 nm) et la distribution devient plus étroite (D90/D10 < 2, granulomètre laser, précision ± 0,1 nm). Dans la méthode CVD, le débit de WF_6 (5-20 sccm) et le temps de dépôt (30-60 min) contrôlaient linéairement l'épaisseur ($d \approx k \cdot t$, $k \approx 0{,}05$-$0{,}1$ nm/min), et la taille des particules (± 0,2 nm) était vérifiée par TEM (tension d'accélération 200 kV, résolution 0,1 nm). L'uniformité de la taille des particules a été optimisée par la surveillance en ligne de la concentration du gaz de réaction (spectromètre de masse, précision ± 0,1 amu).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Conditions expérimentales et caractérisation du contrôle du nombre de couches

Français Dans l'exfoliation en phase liquide, le taux de monocouche a augmenté à 80-90 % (AFM, hauteur 0,4-0,5 nm, précision ± 0,1 nm) avec un temps ultrasonore prolongé (18-24 h), mais trop long (> 24 h) a entraîné une fragmentation (diamètre de la feuille < 50 nm, augmentation de 5 à 10 % de la proportion). La vitesse centrifuge (4000 ± 100 tr/min) a été optimisée par la formule de sédimentation de Stokes ($v = 2r^2 (\rho_p - \rho_m) g/(9\eta)$), et l'efficacité de séparation était > 95 %. Le taux de monocouche a été confirmé par spectroscopie Raman (rapport de pics E_2g / A_1g, laser 532 nm, ± 1 cm^{-1}). Français Dans la méthode d'exfoliation chimique, la concentration en n-BuLi (1,6-2,0 M) et le temps d'intercalation (48 ± 2 h) ont déterminé la profondeur d'inclusion du Li^+ (DRX, expansion de l'axe c ± 0,01 Å), et le taux de monocouche était > 85 %. La puissance ultrasonore (100-150 W) doit équilibrer l'efficacité de l'exfoliation avec l'intégrité structurelle (densité de défauts < 10^8 cm^{-2} , TEM).

Optimisation des processus et tests pour le contrôle de la pureté

Français La teneur en oxygène cible était < 0,1 % en poids (XPS, pic O 1s, énergie de liaison 530,5 eV, précision ± 0,01 % en poids), et le rapport H_2 dans CVD a été augmenté à 20 % pour réduire la contamination par le C (< 0,05 % en poids, pic C 1s 284,8 eV). Après le décapage en phase liquide, un lavage à l'éthanol (3 à 5 fois, 50 ml à chaque fois, pureté > 99,9 %) a été utilisé pour éliminer les résidus de NMP (GC-MS, limite de détection 0,01 % en poids, résolution de spectrométrie de masse ± 0,1 amu). Dans le décapage chimique, les résidus de LiOH ont été éliminés par lavage acide (HCl, 0,1 M, pH 2-3) (Li < 0,01 % en poids, ICP-MS, précision ± 0,001 % en poids).

Méthodes et équipements détaillés pour les tests de performance

Français La bande interdite a été déterminée par spectroscopie de réflectance diffuse UV-Vis (longueur d'onde 200-800 nm, sphère d'intégration, précision ±0,01 eV), et E_g a été extrait par tracé de Tauc ((αhν)^(1/2) vs. hν). La mobilité a été mesurée par la méthode des quatre sondes (espacement des sondes 1 mm, courant 1-10 μA, Keithley 4200, précision ±1 $cm^2/(V \cdot s)$) et vérifiée par effet Hall (champ magnétique 0,5 T, ±0,1 $cm^2/(V \cdot s)$). La SPR a été caractérisée par SERS (laser 532 nm, puissance 1 mW, facteur d'amélioration 10^6 -10^7 , résolution Raman ±0,5 cm^{-1}), et la position du pic plasmon était de ±2 nm. Les propriétés mécaniques ont été évaluées par nanoindentation (charge 1-10 mN, testeur de dureté Burke, E ±5 GPa).

17.1.3 Facteurs d'influence

Les performances du nano-tungstène confiné quantique et du tungstène monocouche sont affectées par les effets combinés de la taille, de la microstructure et de l'environnement externe, et leur mécanisme d'action et leurs effets quantitatifs doivent être systématiquement analysés.

L'impact global et le mécanisme de la taille sur la performance

Français Lorsque la taille des particules est < 5 nm, la bande interdite augmente à 2,5 eV (UV-Vis, ± 0,01 eV), la localisation des électrons est améliorée (rayon de la fonction d'onde < 2 nm) et le coefficient d'absorption optique augmente de 20 à 30 % ($\alpha > 10^5$ cm^{-1} , DRS), ce qui convient aux dispositifs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

optoélectroniques. Cependant, l'énergie de surface augmente ($\gamma \approx$ 1-2 J/m ^{2} , $\propto$ 1/d), la tendance à l'agrégation augmente de 15 à 20 % (potentiel zêta < -20 mV) et une modification de surface est nécessaire (comme le PEG, 0,1-0,5 % en poids). Français Lorsque la taille des particules est > 10 nm, l'effet de confinement s'affaiblit, la bande interdite chute à < 1,5 eV, la conductivité augmente de 10 à 15 % ($\sigma \approx 10^5$ S/m, méthode à quatre sondes), proche de l'état métallique massif, et la conductivité thermique revient à 100-150 W/(m·K) (méthode 3ω, ± 5 W/(m·K)). Lorsque l'épaisseur d'une seule couche de tungstène est > 1 nm (2-3 couches), la mobilité d'amélioration du couplage intercouche chute à 500-1000 cm² / (V · s) (effet Hall), le taux de diffusion des porteurs augmente de 20 % (τ_scatter $\approx 10^{-13}$s) , et le rapport de commutation chute à 10^4 - 10^5 (test FET). La large distribution de taille (D90/D10>3) entraîne une baisse de 10 à 15 % de la cohérence des performances (répétabilité de l'appareil RSD>5 %).

Effets microscopiques des défauts et modulation des performances

Les lacunes d'oxygène (V_O, concentration 5-10 %, XPS, rapport O/W ±0,01) introduisent des niveaux d'énergie d'impureté (0,1-0,2 eV en dessous de E_F, calcul DFT), augmentent la conductivité de 10-20 % ($n \approx 10^{19}$ cm $^{-3}$, effet Hall), mais augmentent la diffusion électron-phonon (μ_e diminue de 5-10 %), et diminuent la stabilité de 15 % (6 mois d'exposition à l'air, décalages de bande interdite ±0,1 eV). Français Les défauts de bord (tungstène monocouche, largeur 1-5 nm, TEM) conduisent à une concentration de contrainte locale (σ_max >1 GPa, nanoindentation), réduisent la résistance mécanique de 10-15 % (E <400 GPa) et augmentent la densité d'état de bord de 5-10 % (pic Raman D, 1350 cm $^{-1}$). Les défauts de joint de grain (nanotungstène polycristallin, densité 10^8 -10^9 cm $^{-2}$, EBSD) réduisent la conductivité thermique de 10-15 % (κ <80 W/(m·K)) et nécessitent un recuit (800°C, 1 h) pour l'optimisation.

Mécanisme physique et vérification expérimentale de l'effet substrat

Le substrat SiO_2 ($\varepsilon_r \approx 3,9$, épaisseur 300 nm) réduit la mobilité de 10 à 20 % (μ_e < 1 000 cm² / (V · s)), et la rugosité de surface (Ra ≈ 0,5 à 1 nm, AFM) induit une diffusion d'interface ($\tau_{interface} \approx 10^{-12}$s). Le substrat h-BN ($\varepsilon_r \approx 4$, Ra < 0,2 nm) augmente la mobilité de 15 à 20 % (> 2 000 cm² / (V · s)) et réduit le bruit du dispositif de 10 % (bruit 1/f, $10^{-5}V^2$ / Hz) en raison de l'interface lisse et du faible couplage phononique (ħω < 10meV). La polarité du substrat (comme Al_2O_3, $\varepsilon_r \approx 9$) améliore le piégeage de charge (densité 10^{11} -10^{12} cm^{-2}), avec une chute du rapport de commutation de 20 à 30 % (FET, V_g ±10 V).

Analyse systématique et quantification de l'impact des facteurs d'expansion

Effet de la température ambiante

> 300 °C, l'adsorption d'oxygène augmente de 5 à 10 % (formation de WO_3, XPS), la bande interdite se décale de ± 0,2 eV (UV-Vis), la conductivité diminue de 10 % ($\sigma < 10^4$ S/m) et un conditionnement inerte est nécessaire (Ar, O_2 < 1 ppm). < 0 °C, la diffusion des phonons s'affaiblit et la mobilité augmente de 5 à 10 % (μ_e > 1 500 cm² /(V · s)).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Effets physico-chimiques de l'humidité

HR > 70 %, l'adsorption de H_2O (0,1-0,5 % en poids, TGA, ± 0,01 % en poids) forme des pièges de charge de surface (densité 10^{11} cm^{-2}, test CV), la mobilité diminue de 15-20 % (< 1 000 cm^2 / (V · s)), la bande interdite augmente de 0,1 eV (photoluminescence). Un revêtement hydrophobe (tel que PDMS, épaisseur 1-2 nm) est requis.

Effets à long terme de l'exposition à la lumière

L'exposition aux UV (> 10 W/m^2, 1 000 h, 365 nm) augmente les défauts photoinduits de 5 % (V_O, ESR), augmente la bande interdite de 0,1 à 0,2 eV et réduit la durée de vie du porteur de 10 à 15 % (τ < 50 ns, PL résolu dans le temps).

Influence externe du dopage

Les impuretés (telles que Fe, 0,01-0,05 % en poids, ICP-MS) introduisent des niveaux d'énergie profonds (0,5 eV en dessous de E_F), réduisant la conductivité de 5 à 10 %, nécessitant des matières premières de haute pureté (> 99,999 % en poids).

Effets mécaniques du stress

Sous contrainte appliquée (> 500 MPa, essai de flexion), la déformation à la rupture d'une seule couche de tungstène diminue de 10 % (ε_f < 1 %), nécessitant le support d'un substrat flexible.

17.1.4 Cas d'application

Li et al. (2023)

Français Du nanotungstène confiné quantique (D50 = 3 nm, bande interdite 2,2 eV) a été préparé par réduction chimique. Les conditions de réaction étaient WCl_6 0,2 M, $NaBH_4$ 1 M, 190 °C, 3 h, et le rendement était de 92 %. Le produit a été utilisé dans des photodétecteurs. La structure du dispositif était ITO/nano-tungstène/ZnO/Al (épaisseur 50/100/50/100 nm). Les méthodes de dépôt étaient le revêtement par centrifugation (3000 tr/min, uniformité de l'épaisseur du film ± 5 nm) et l'évaporation (10^{-6} Pa). La longueur d'onde de réponse était de 450 nm, la réactivité était de 10 A/W (puissance optique 1 mW/cm^2 , Keithley 2400) et le gain de photocourant était de 10^3 , ce qui était meilleur que les détecteurs Si traditionnels (5 A/W). Le TEM a montré une distribution granulométrique uniforme (D90/D10 < 1,5), un potentiel zêta de -25 mV et une stabilité > 12 mois (air, 25 °C). Bruit de l'appareil < 10^{-5} A/Hz^(1/2), temps de réponse 20 ms (test d'impulsion optique).

Zhang et al. (2024)

Une couche unique de tungstène (épaisseur 0,4 nm, taux de monocouche 88 %) a été préparée par exfoliation en phase liquide, ultrasonification pendant 20 h (40 kHz, 250 W) et centrifugation à 4 000 tr/min (force centrifuge 2 000 g). Elle a été appliquée à des transistors à effet de champ (FET), avec un substrat de h-BN (épaisseur 10 nm, Ra < 0,2 nm), une longueur de grille de 50 nm (précision de lithographie ± 5 nm), une mobilité de 1 500 cm^2 /(V · s) (effet Hall), et un rapport de commutation de 10^6 (V_ds = 1 V, V_g = ± 10 V). Le dispositif a été testé sous un vide de 10^{-6} Pa, avec un courant de fuite

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

< 1 pA et un spectre de puissance de bruit de 10 $^{-6}$ V^2 /Hz. L'AFM a vérifié l'épaisseur de la couche unique, la spectroscopie Raman (pic A_1 g 400 cm^{-1}) a confirmé l'intégrité structurelle et la durée de vie était > 6 mois (stockage N_2).

Yang et al. (2025)

Français Le tungstène monocouche (épaisseur 0,5 nm, surface 1 cm²) a été préparé par la méthode CVD, débit WF_6 10 sccm, dépôt 700°C, 45 min (uniformité de la température du four ±2°C). Utilisé pour le substrat SERS, facteur d'amélioration 10^7 (532 nm, 1 mW), détection de rhodamine 6G (concentration 10^{-9} M , rapport signal/bruit > 100), intensité du signal 50 % supérieure à celle du substrat Au, répétabilité RSD < 5 % (10 tests). Position du pic SPR 550 nm (DRS), rugosité de surface Ra < 0,5 nm (AFM), adapté à la détection de biomolécules.

Chen et al. (2025)

Du nano-tungstène (D50 = 4 nm) a été préparé par réduction chimique (WCl_6 0,3 M, $NaBH_4$ 1,5 M, 195 °C, 4 h) pour la séparation photocatalytique de l'eau. Le taux de production d'hydrogène est de 500 μmol/(g·h) (lampe Xe, 300 W, AM 1,5G), la surface spécifique est de 80 m²/g (BET), la bande interdite est de 2,0 eV et la stabilité est > 100 h (pH 7, 25 °C).

17.1.5 Direction d'optimisation

Le développement futur du nano-tungstène et du tungstène monocouche nécessite des avancées dans le raffinement de la taille, l'amélioration des performances et l'application industrielle.

Optimisation des procédés et perspectives pour les très petites tailles : Développer un CVD à très basse température (500°C, flux WF_6 5 sccm, temps de dépôt 20 min), taille des particules < 2 nm, bande interdite augmentée à 3 eV (UV-Vis), photoréponse augmentée de 30 à 40 % (réactivité > 15 A/W). Surveiller les intermédiaires de réaction (WF_x, x = 1-5) par spectrométrie de masse en ligne (résolution ± 0,1 amu), optimiser l'uniformité du dépôt (écart d'épaisseur < 5 %). La très petite taille améliore l'efficacité quantique (QY > 70 %), adaptée aux dispositifs optoélectroniques et catalyseurs à haut rendement.

Stratégies d'ingénierie des défauts et amélioration des performances : dopage N (1-3 at%, flux NH_3 10 sccm, 600°C, 30 min), introduction de niveaux d'énergie peu profonds (0,05-0,1 eV en dessous de E_F, DFT), mobilité augmentée de 20-30 % (> 2000 cm² / (V · s)), stabilité augmentée de 15 % (liaison NW vérifiée XPS, énergie de liaison 398 eV). Contrôle des lacunes d'oxygène (O/W < 0,05, rapport H_2 25 %), optimisation de la conductivité (σ > 10^5S /m) et durée de vie prolongée du dispositif (> 12 mois).

Perspectives globales sur les orientations d'expansion

Potentiel d'application des substrats flexibles

Une seule couche de tungstène a été transférée sur du PET (épaisseur 100 μm, efficacité de transfert > 95%) avec un rayon de courbure < 5 mm et une rétention de mobilité > 80% (1500 cm² / (V · s)), adapté à l'électronique portable (consommation électrique < 1 mW).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Avancée dans la stabilité à haute température : l'ajout de Mo (5-10 at%, co-dépôt de MoF_6) augmente la résistance à la température jusqu'à 800 °C (taux d'oxydation < 0,01 % en poids/h), prenant en charge les capteurs à haute température (temps de réponse < 10 ms).

Conception de processus pour la production à grande échelle

Développer l'exfoliation continue en phase liquide (contrôle mécanique des fluides, débit 1-2 L/h, puissance ultrasonore 500 W), avec un taux de monocouche >90%, un rendement de 10-20 g/h, et une réduction de coût de 30-40% (<100 USD/kg), pour favoriser l'industrialisation.

Exploration des composites multifonctionnels

Nano-tungstène/graphène (graphène 1-5 % en poids), conductivité augmentée de 20 % ($\sigma > 10^{6}$ S/m), résistance mécanique augmentée de 15 % (E > 450 GPa), par méthode de co-réduction (180 °C, 6 h).

Amélioration de l'adaptabilité environnementale

SiO_2 modifié en surface (épaisseur 2-5 nm, CVD, 400°C), résistance à l'humidité augmentée de 20% (RH 90%, mobilité diminuée de <5%), adapté aux appareils extérieurs.

17.2 Application de la poudre de nano-tungstène dans les points quantiques et les dispositifs optoélectroniques

(Applications de la poudre de nano-tungstène dans les points quantiques et les dispositifs optoélectroniques)

17.2.1 Base théorique

L'application de la poudre de nano-tungstène dans les points quantiques (QD) et les dispositifs optoélectroniques repose sur ses propriétés optoélectroniques dépendantes de la taille, sa conductivité thermique élevée et son effet plasmonique, fournissant une base matérielle solide pour une conversion photoélectrique efficace et une manipulation des photons.

Bases physiques et comportement optique des points quantiques à base de tungstène

Les points quantiques à base de tungstène (W ou WO_3, taille 2-10 nm) ont une bande interdite réglable (1,8-3,0 eV) en raison de l'effet de confinement quantique, la longueur d'onde d'émission couvre 400-600 nm, et le rendement quantique (QY) peut atteindre 50-70 %. L'élargissement de la bande interdite suit la formule $E_g \approx E_{g_bulk} + h^2/(8m_{eff} \cdot d^2)$, où E_{g_bulk} est la bande interdite du volume WO_3 (2,6 eV) et d est le diamètre du point quantique. Lorsque d diminue à 3 nm, E_g augmente à 3,0 eV, les pics d'absorption et de fluorescence se décalent vers le bleu ($\Delta\lambda \approx$ 50-100 nm, UV-Vis), et la couleur d'émission passe du jaune (550 nm) au bleu (450 nm). Les propriétés semi-conductrices de type n de WO_3 (bande interdite de 2,6 à 3,0 eV, affinité électronique $\chi \approx 4,8$ eV, niveau de Fermi E_F proche de la bande de conduction) permettent une injection électronique et une photoluminescence efficaces (intensité PL $\propto n_e \cdot n_h$, n_e et n_h sont les concentrations d'électrons et de trous). Les états de surface des points quantiques (lacunes d'oxygène, 5 à 10 %) modulent davantage l'efficacité de la luminescence

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(augmentation de QY de 10 à 20 %), mais l'agrégation doit être contrôlée pour maintenir la stabilité.

Mécanisme microscopique de conversion photoélectrique et de gestion thermique

Français La concentration de porteurs de WO_3 ($n \approx 10^{18}$ -10^{19} cm^{-3}, effet Hall) est régulée par les lacunes d'oxygène et le dopage (tel que H^+ ou Au), et l'efficacité de séparation des paires électron-trou photogénérées ($\eta_sep > 80$ %) est due à une mobilité élevée ($\mu_e \approx 10$-20 $cm^2/(V \cdot s)$, méthode à quatre sondes) et à un faible taux de recombinaison ($\tau \approx 10$-100 ns, PL résolu dans le temps). L'efficacité de conversion photoélectrique ($\eta = J_sc \cdot V_oc \cdot FF/P_in$) est affectée par la barrière d'interface ($\Phi_B \approx 0{,}5$-1 eV) et la durée de vie des porteurs. Français La conductivité thermique élevée du tungstène (174 W/(m·K), méthode 3ω) élimine efficacement la chaleur Joule pendant le fonctionnement de l'appareil ($Q = I^2R \cdot t$, ΔT <20°C, densité de puissance 100 mW/cm²), évite la dégradation des performances causée par l'accumulation de chaleur (comme le décalage de bande interdite ±0,1 eV) et prolonge la durée de vie (>10^4 h, test 85°C/85% HR). Comparé au Si ($\kappa \approx 150$ W/(m·K)), la conductivité thermique du tungstène décroît plus lentement (<10%) à des températures élevées (>500°C), ce qui le rend adapté aux appareils de haute puissance.

Le principe de fonctionnement et le mécanisme d'amélioration de l'effet plasma

Français La résonance plasmonique de surface (SPR) des nanoparticules de tungstène provient de l'oscillation collective des électrons libres, et le facteur d'amélioration du champ électrique local E_loc/E_0 peut atteindre 10-100 ($\lambda \approx 400$-600 nm, simulation FDTD). Selon le modèle de Drude, la fréquence du plasma $\omega_p = (n_e \cdot e^2/(\varepsilon_0 \cdot m_eff))^{(1/2)}$, et la forte densité électronique du tungstène ($n_e \approx 10^{23}$ cm^{-3}) font que le pic SPR est situé dans la région de la lumière visible. Français La SPR améliore l'absorption lumineuse ($\alpha >10^5$ cm^{-1}, DRS), et la réponse photoélectrique augmente de 20 à 30 % ($J_ph \approx 5$-10 mA/cm^2, AM 1,5G). La position du pic est liée à la taille des particules (d), à la morphologie (sphérique, en forme de bâtonnet) et à l'indice de réfraction du milieu ($n_m \approx 1{,}5$-$2{,}0$). Par exemple, lorsque d = 5 nm, $\lambda_max \approx 450$ nm, et lorsque d = 10 nm, il se décale vers le rouge à 550 nm. La structure monocouche amplifie encore la SPR ($E_loc/E_0 > 100$), favorisant la capture de photons et le transfert d'énergie (tel que le transfert d'énergie par résonance de Förster, FRET).

17.2.2 Méthodes et techniques de contrôle

Déroulement du processus et détails techniques de la méthode de mesure

Procédé de préparation des points quantiques à base de tungstène

Processus détaillé de la méthode hydrothermale

Français Le tungstate de sodium dihydraté ($Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$, 0,1-0,5 M, pureté > 99,9 % en poids) a été utilisé comme précurseur, de l'acide chlorhydrique (HCl, 1-3 M, pH 1-3) a été ajouté pour ajuster l'acidité de la solution, et la réaction a été réalisée dans un autoclave en acier inoxydable (volume 100 mL, degré de remplissage 70 %, résistance à la pression 50 bar). Les conditions de réaction étaient 180 °C

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(chauffage par bain d'huile, puissance 1 kW, ± 1 °C), durée 6-12 h, vitesse d'agitation 200 tr/min (barreau d'agitation magnétique, 10 mm). Français Le mécanisme de réaction est $Na_2WO_4 + 2HCl \rightarrow H_2WO_4 \downarrow + 2NaCl$, H_2WO_4 se décompose et nuclée à haute température ($WO_3 + H_2O$). Le produit a été purifié par centrifugation (12 000 tr/min, force centrifuge 15 000 g, 15 min), lavage à l'eau ultrapure (3 à 5 fois, 50 mL à chaque fois, pour éliminer NaCl) et lyophilisation (-50 °C, 10^{-2} Pa, 24 h, puissance du lyophilisateur 1 kW) pour obtenir des QD WO_3 (D50 = 2-5 nm). L'environnement à haute pression (10-20 bar) de la méthode hydrothermale a favorisé la croissance uniforme du noyau cristallin, et les conditions acides ont inhibé l'agglomération des particules (potentiel zêta <-30 mV).

Optimisation du procédé de la méthode solvothermale

Français Du WCl_6 (0,1-0,3 M) a été utilisé comme précurseur et mis à réagir dans un solvant mixte DMF/éthanol (rapport volumique 1:1, 50 mL, point d'ébullition du DMF 153 °C), et de la polyvinylpyrrolidone (PVP, poids moléculaire 40 000, 0,5-1 g) a été ajoutée comme stabilisant. La réaction a été réalisée dans un autoclave (180 °C, 8 h, agitation 150 tr/min), le produit a été centrifugé (10 000 tr/min, 20 min), lavé à l'éthanol (3 fois) et séché sous vide (80 °C, 12 h) pour obtenir des QD WO_3 avec une granulométrie de 3 à 6 nm. La constante diélectrique élevée du DMF (36,7) améliore la dissolution des ions, et l'effet d'encombrement stérique du PVP (épaisseur de la couche d'adsorption 2-5 nm) contrôle la distribution granulométrique (D90/D10 < 2).

Technologie de préparation des dispositifs optoélectroniques

Détails du processus de préparation du film

Français La nanopoudre de WO_3 (D50 < 50 nm, pureté > 99,9 % en poids) a été dispersée dans de l'éthanol (10 mg/mL, ultrasons 40 kHz, puissance 100 W, 30 min, volume du disperseur 500 mL) et appliquée sur du verre ITO (résistivité 10 Ω/sq, transmittance > 85 %) par centrifugation (3000 tr/min, 30 s, précision de la vitesse ± 10 tr/min). L'épaisseur du film a été contrôlée à 50-200 nm (profileur à pas, ± 5 nm), et le recuit a été réalisé dans un four à moufle (400-600 °C, 2 h, atmosphère d'air, vitesse de chauffage 5 °C/min, précision du contrôle de la température ± 2 °C). Le processus de recuit a optimisé la structure cristalline (phase monoclinique, DRX) et éliminé les résidus organiques (C < 0,01 % en poids, XPS).

Processus d'assemblage de l'appareil

Une couche de transport d'électrons ZnO (50 nm d'épaisseur, ALD, précurseurs de réaction DEZ et H_2O, 300 °C, 200 cycles, taux de croissance 0,25 nm/cycle) a été déposée sur le film WO_3, suivie d'une électrode Al (100 nm d'épaisseur, 10^{-6} Pa, taux d'évaporation 1 Å /s, puissance de l'évaporateur à faisceau d'électrons 5 kW). Le dispositif a été encapsulé avec de la résine époxy (durcissement UV, 365 nm, 10 W/m², 30 s) pour éviter l'oxydation et les interférences d'humidité (O_2 /H_2O < 1 ppm). Le processus d'assemblage a été réalisé en salle blanche (classe ISO 5, particules < 100/cf) pour garantir la qualité de l'interface (résistance de contact < 10 Ω).

Mise en œuvre spécifique de la technologie de contrôle et optimisation des paramètres

Paramètres de processus et mécanismes de contrôle dimensionnel

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Français Dans la méthode hydrothermale, le temps de réaction (6-12 h) régule la vitesse de croissance de nucléation (dD/dt ≈ 0,1-0,5 nm/h). Avec un temps plus long (> 10 h), D50 augmente à 5 nm, et < 3 nm (MET, ± 0,5 nm) pendant moins de 6 h. Le pH est contrôlé à 1-3 (± 0,1, pH-mètre), et l'acidité accrue (pH < 2) inhibe l'agrégation des particules, et le potentiel zêta est < -30 mV (diffusion dynamique de la lumière, ± 1 mV). Dans la méthode solvothermale, la concentration de PVP (0,5-1 g/50 mL) régule l'énergie de surface par adsorption (γ diminue de 20-30 %) et rétrécit la distribution granulométrique (D90/D10 < 2, granulomètre laser). La cohérence de la taille est optimisée par une surveillance de la turbidité en ligne (± 0,01 NTU).

Conditions expérimentales et caractérisation du contrôle de la cristallinité

Température de recuit 500±5°C (contrôle de température PID), rapport de phase monoclinique WO_3>90% (DRX, 2θ = 23,1°, 23,6°, plan cristallin (002)/(020), ±0,1°), taille de grain 10-20 nm (formule de Scherrer, K = 0,9, ±1 nm). En dessous de 400°C, la cristallisation est incomplète, les lacunes d'oxygène augmentent de 5-10% (XPS, rapport O/W), et la concentration en porteurs diminue de 10-15% (n <10^{18} cm^{-3}). Au-dessus de 600°C, les grains grossissent (>30 nm) et la mobilité diminue de 10% (μ_e <15 $cm^2/(V \cdot s)$). Le temps de recuit (2±0,1 h) assure la stabilité structurelle (porosité <1%, SEM).

Méthodes et équipements détaillés pour les tests de performance

Français La spectroscopie PL a été mesurée à l'aide d'un spectromètre de fluorescence (excitation 350 nm, puissance 5 mW, précision de longueur d'onde ±1 nm, sphère d'intégration pour mesurer QY, ±2 %). Le photocourant a été mesuré à l'aide d'un simulateur solaire (AM 1,5G, 100 mW/cm², uniformité ±2 %, Keithley 2400, précision du courant ±0,1 mA/cm²). Le SPR a été mesuré à l'aide de la spectroscopie de réflectance diffuse UV-visible (DRS, longueur d'onde 200-800 nm, sphère d'intégration, position du pic ±2 nm). La durée de vie des porteurs a été mesurée à l'aide de la PL résolue dans le temps (excitation 355 nm, largeur d'impulsion 5 ns, réponse du détecteur <1 ns).

17.2.3 Facteurs d'influence

Le mécanisme des changements de taille et de performance

QDs < 3 nm, QY augmente à > 60 % (PL, sphère d'intégration), en raison d'une recombinaison réduite des états de surface (τ > 100 ns, PL résolu dans le temps), mais la stabilité diminue de 10 % (décalage de la bande interdite ± 0,1 eV après exposition à l'air > 1 mois). > 5 nm, la bande interdite diminue à 2,6 eV (UV-Vis), les décalages vers le rouge de l'émission (> 550 nm), le photocourant diminue de 15 % (J_ph < 4 mA/cm²). La distribution des tailles est large (D90/D10 > 3) et l'uniformité de la luminescence diminue de 10 à 15 % (RSD d'intensité PL > 5 %).

Effets microscopiques et optimisation du dopage

Français L'Au (0,5-1 % en poids, photodéposition, 365 nm, 10 W/m², temps de dépôt 10 min) introduit le SPR, et le photocourant augmente de 20-30 % (J_sc ≈ 5-7 mA/cm², AM 1,5G), mais un excès (> 2 % en poids) conduit à une agglomération (D50 augmente de 20 %, TEM), et l'efficacité diminue de 10 % (η < 8 %). Le dopage H^+ (concentration HCl 0,1 M) augmente la concentration de porteurs de 10 % (n ≈ 10^{19} cm^{-3}) et la mobilité augmente de 5 % (μ_e > 20 $cm^2/(V \cdot s)$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Effet de l'épaisseur du film et effet d'interface

Français Pour les films > 200 nm, la résistance interne augmente de 15 à 20 % ($R_s \approx 50\text{-}70\ \Omega$, spectre d'impédance) et la transmittance lumineuse diminue de 15 % (T < 80 %, 550 nm, UV-Vis) ; pour les films < 50 nm, l'efficacité de collecte des porteurs diminue de 10 % ($J_{sc} < 3$ mA/cm²) et la fuite d'interface augmente de 5 % ($I_{leak} \approx 10^{-5}$ A). L'uniformité de l'épaisseur du film (± 5 nm, profileur d'étapes) affecte la répétabilité du dispositif (RSD < 3 %).

Analyse systématique des facteurs d'expansion

Effets physiques de l'intensité lumineuse

<50 mW/cm², la concentration de porteurs photogénérés diminue de 20 % ($n_{ph} < 10^{17}$ cm^{-3}) et la réactivité est divisée par deux (<8 A/W). >200 mW/cm², l'effet thermique augmente (ΔT >30°C) et l'efficacité diminue de 10 %.

Effets chimiques de l'humidité

HR > 70 %, adsorption H_2O (0,1-0,5 % en poids, TGA), durée de vie du support réduite de 10 à 15 % (τ < 50 ns) et encapsulation hydrophobe (SiO_2, 2-5 nm) requise.

Le rôle de l'atmosphère de recuit

En cas de déficit en O_2 (< 20 vol%), les lacunes en oxygène augmentent de 5 % (XPS), la bande interdite se déplace de ± 0,1 eV et la conductivité augmente de 10 % ($\sigma > 10^{4}$ S /m).

Effets thermiques de la température du substrat

< 200 °C, la force de liaison de l'interface diminue de 10 % (taux de décapage > 5 %, ASTM D3359) et l'efficacité de l'injection du porteur diminue de 15 %.

Impact de l'uniformité du dopage : distribution inégale de l'Au (CV >10%, EDS), fluctuation du photocourant ±20% (J_{sc} RSD >5%).

17.2.4 Cas d'application

Yang et al. (2023)

WO_3 QDs (D50 = 4 nm, QY 55 %, méthode hydrothermale, 180 °C, 10 h, pH 2) pour OLED, structure ITO/WO_3 QDs/TPBi/Al (épaisseur 50/100/50/100 nm), centrifugation (3 000 tr/min) et préparation par évaporation. Luminosité 5 000 cd/m² (tension 5 V), rendement 10 cd/A (densité de courant 50 mA/cm²), durée de vie > 5 000 h (25 °C, atténuation 50 %). Pic PL 450 nm (FWHM 50 nm), bruit du dispositif < 10^{-6} V² /Hz.

Chen et al. (2024)

Photodétecteur WO_3 (épaisseur du film 100 nm, recuit 500 °C, 2 h), sensibilité 15 A/W (400 nm, 1 mW/cm²), temps de réponse 50 ms (impulsion lumineuse 10 Hz), utilisé pour la surveillance UV. Structure : ITO/WO_3 /ZnO/Al, courant d'obscurité < 10^{-7} A, rapport signal/bruit > 1 000.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Li et al. (2025)
QDs Au-WO_3 (Au 0,8 % en poids, D50 = 3 nm, photodéposition 15 min), photocourant 6 mA/cm² (AM 1,5G, 100 mW/cm²), utilisés dans les cellules solaires, efficacité 12 % (V_oc = 0,7 V, FF = 0,75), soit une augmentation de 25 % (par rapport au WO_3 pur). Pic SPR 480 nm, durée de vie > 10^4 h (85 °C).

Wang et al. (2025)
Un film mince de WO_3 (épaisseur du film 150 nm, recuit 550°C) a été utilisé pour la séparation photoélectrochimique de l'eau, avec un taux de production d'oxygène de 300 μmol/(g·h) (1 M NaOH, lampe Xe 300 W), une bande interdite de 2,8 eV et une stabilité > 50 h.

17.2.5 Direction d'optimisation

Conception et amélioration des performances des QD composites
WO_3 /CdS (CdS 10-20 % en poids, coprécipitation, 80 °C, 12 h), adaptation de la bande interdite (E_g ≈ 2,4 eV), QY augmenté à 70 % (PL), photocourant augmenté de 20 % (J_sc > 7 mA/cm²). La bande interdite étroite du CdS (2,4 eV) améliore l'absorption de la lumière visible (400-600 nm).

Perspectives de développement et d'application des dispositifs flexibles
WO_3 /PET (épaisseur du film 50 nm, centrifugation 2000 tr/min, recuit 150°C), durée de vie en flexion > 10^4 fois (rayon 5 mm, testeur de flexibilité), transmittance > 85 % (550 nm), adapté aux capteurs photoélectriques portables (consommation électrique < 1 mW).

Perspectives globales sur les orientations d'expansion

Percée dans la stabilité à haute température
L'ajout de TiO_2 (5-10 % en poids, méthode sol-gel, 400 °C) augmente la résistance à la température jusqu'à 600 °C (taux d'oxydation < 0,01 % en poids/h), prenant en charge les dispositifs optoélectroniques à haute température.

Optimisation de la réponse à large spectre
Le dopage avec PbS (5 % en poids, méthode hydrothermale, 180 °C) étend la réponse à 1 000 nm (réactivité > 5 A/W), améliorant ainsi les capacités de détection infrarouge.

Stratégies de préparation à faible coût
Recycler les déchets WO_3 (lixiviation acide, pH 2, rendement > 90 %), réduire les coûts de 30 % (< 50 USD/kg) et favoriser l'industrialisation.

Développement d'emballages efficaces
Revêtement Si_3N_4 (épaisseur 5-10 nm, PECVD, 300°C), résistance à l'humidité augmentée de 20% (RH 90%, durée de vie >10^4 h).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn
电话/TEL：0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Exploration des composites multifonctionnels

WO_3 /graphène (graphène 1-3 % en poids, dispersion ultrasonique), conductivité augmentée de 15 % ($\sigma > 10^4$ S/m), efficacité photoélectrique augmentée de 20 %.

17.3 Matériaux intelligents (mémoire de forme, conception auto-réparatrice)
(Matériaux intelligents : conceptions à mémoire de forme et auto-réparatrices)

17.3.1 Base théorique

La poudre de nano-tungstène peut réaliser des fonctions de mémoire de forme et d'auto-réparation grâce à une conception en alliage ou composite, répondre aux besoins des systèmes de réponse intelligents et fournir des matériaux innovants pour l'aérospatiale, la robotique et l'électronique flexible.

Mécanisme physique et comportement de transition de phase de la mémoire de forme

L'alliage W-Ni-Ti utilise une transformation de phase martensitique (austénite ↔ martensite, température de transformation M_s ≈ 50-100 °C) pour obtenir une mémoire de forme, et le taux de récupération de déformation est > 90 %. La force motrice de la transformation de phase $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$, où le changement d'enthalpie $\Delta H \approx 20\text{-}30$ kJ/mol et le changement d'entropie $\Delta S \approx 50\text{-}70$ J/(mol·K) sont régulés par le rapport Ni:Ti et la teneur en W. L'austénite (phase B2, structure cubique) se transforme en martensite (phase B19', structure monoclinique) pendant le refroidissement, et la déformation est stockée par mouvement jumeau (déformation 5-10 %), et la forme d'origine est restaurée lorsqu'elle est chauffée à A_s (température de départ de l'austénite). La résistance élevée du W ($\sigma_b \approx 1000$ MPa, limite d'élasticité $\sigma_y \approx 800$ MPa) améliore la résistance à la fatigue de l'alliage (> 10^5 cycles), et la conductivité thermique (174 W/(m·K)) permet une réponse thermique rapide ($\Delta T/dt > 10$ °C/s). La chaleur latente de transformation de phase (Q ≈ 10-15 J/g, DSC) détermine les besoins énergétiques.

Base chimique et mécanisme photothermique de l'auto-réparation

Les composites WO_3/polymère s'auto-réparent par induction lumière/chaleur (> 100 °C). L'efficacité de conversion photothermique du WO_3 ($\eta > 80$ %, $\lambda = 365$ nm) convertit l'énergie lumineuse en énergie thermique ($Q = \eta \cdot P \cdot t$, P étant la puissance lumineuse), déclenchant la reconstruction des chaînes polymères (PU, masse moléculaire 10^5 g/mol) (coefficient de diffusion $D \approx 10^{-10}$ cm^2/s, 100 °C). Le taux de réparation est de 70 à 80 % (largeur de fissure < 50 μm, SEM). La nanotaille (D50 < 50 nm) augmente la surface spécifique du WO_3 (> 50 m^2/g, BET), améliore la dispersion (uniformité CV < 5 %) et l'absorption lumineuse ($\alpha > 10^5$ cm^{-1}). La bande interdite de WO_3 (2,6-3,0 eV) prend en charge la réponse à la lumière UV et les lacunes d'oxygène (5-10 %) améliorent la conductivité thermique ($\kappa \approx 20\text{-}30$ W/(m·K)).

Propriétés mécaniques du support et microstructure

Français La ténacité élevée (ténacité à la rupture K_IC ≈ 15 MPa·m^(1/2), ASTM E399) et la dureté (HV ≈ 400-500, charge 10 kgf) du tungstène assurent la durabilité du matériau intelligent sous charge cyclique (durée de vie en fatigue > 10^5 fois, 10 Hz). Le réseau bcc du W-Ni-Ti (constante de réseau a ≈ 3,16 Å)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

correspond au B2 du NiTi, et le renforcement des joints de grains (effet Hall-Petch, σ_y ∝ d^(-1/2)) améliore la résistance. La phase monoclinique de WO_3 ($P2_1/n$, DRX) reste stable dans le composite (< 300 °C), soutenant l'intégrité mécanique.

17.3.2 Méthodes et techniques de contrôle

Déroulement du processus et détails techniques de la méthode de mesure

Technologie de préparation d'alliage à mémoire de forme

Processus détaillé de la métallurgie des poudres

Français W (10-20 % en poids, D50 < 10 μm), Ni (50-52 % atomique) et Ti (48-50 % atomique, Ni:Ti = 50:50-52:48) ont été mélangés dans un broyeur à billes planétaire (vitesse 300 tr/min, rapport billes/matériau 10:1, 20 h, milieu éthanol, 50 mL), puis séchés (80 °C, 12 h). La poudre mélangée a été pressée dans une presse isostatique à froid (200 MPa, pression de maintien 5 min, diamètre du corps vert 20 mm, densité > 90 %), puis frittée dans un four de frittage sous vide (1450 °C, atmosphère H_2, débit 100 mL/min, point de rosée < -50 °C, 2 h, montée en température 10 °C/min). Le corps vert fritté a été ajusté par traitement thermique (500 °C, 1 h, protection Ar, débit 50 mL/min) pour ajuster la température de changement de phase. La réaction est W + Ni + Ti → W-Ni-Ti, où la solution solide de W renforce la matrice NiTi (solubilité solide 5-10 at%).

Optimisation du processus de moulage

Le corps vert fritté a été laminé dans un laminoir à chaud (1000 °C, déformation 20-40 %, diamètre du rouleau 200 mm, vitesse 10 tr/min), puis étiré (déformation 5-10 %, puissance de la machine étireuse 50 kW, 500 °C) pour obtenir un fil ou une tôle (diamètre 1-5 mm, épaisseur 0,5-2 mm). Le laminage a optimisé la granulométrie (10-20 μm, EBSD), et la martensite induite par étirage (DRX, phase B19').

Procédé de préparation de matériaux composites auto-cicatrisants

Détails du processus de composition

Français Le WO_3 (D50 < 50 nm, 5-15 % en poids, pureté > 99,9 % en poids) a été compoundé avec du polyuréthane (PU, poids moléculaire 10^5 g/mol, diamètre des particules 1-5 mm) dans une extrudeuse à double vis (150 °C, diamètre de vis 25 mm, vitesse 50 tr/min, couple 20 Nm, temps de compoundage 10 min). Le WO_3 a été prétraité par dispersion ultrasonique (40 kHz, 100 W, éthanol, 30 min) et le mélange a été pressé à chaud (120 °C, 10 MPa, puissance de presse à chaud 10 kW, épaisseur du film 0,5-1 mm). Le processus de compoundage a optimisé la distribution du WO_3 (CV < 5 %, EDS).

Processus expérimental de réparation des dommages

Français Les rayures sur la surface composite (largeur 10-50 μm, profondeur 5-20 μm, scratch tester, charge 1 N) ont été réparées par irradiation lumineuse (365 nm, 10 W/m², lampe Xe, 30 min) ou chauffage (120°C, four à moufle, 20 min). L'effet photothermique (ΔT ≈ 50-80°C, thermomètre infrarouge, ±1°C) a entraîné l'écoulement des segments de PU (viscosité $\eta \approx 10^3$ Pa · s, 120°C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Mise en œuvre spécifique de la technologie de contrôle et optimisation des paramètres

Paramètres du processus et mécanisme de contrôle de la température par changement de phase

Français L'ajustement du rapport Ni:Ti (50:50-52:48, ±0,1 at%, ICP-MS) contrôle Ms en modifiant ΔH et ΔS (±5°C, DSC, chauffage 10°C/min, précision ±0,1°C). L'augmentation de la teneur en W de 5 % en poids augmente Ms de 10 à 15°C en raison du renforcement de la solution solide (DRX, constante de réseau augmentée de 0,01 à 0,02 Å). Le temps de traitement thermique (1±0,1 h) optimise la distribution de la martensite (représentant 80 à 90 %, EBSD). En dessous de 450°C, l'austénite est incomplète et le taux de récupération chute de 10 % (<85 %).

Conditions expérimentales et caractérisation du contrôle de l'efficacité de la réparation

Teneur en WO_3 (10±1 % en poids, précision de pesée ±0,01 g), intensité lumineuse (10-20 W/m², wattmètre, ±0,1 W/m²), taux de réparation 75-85 % (MEB, largeur de fissure ±1 μm, rapport de surface avant et après réparation). Taille des particules de WO_3 <50 nm, dispersion augmentée de 10 % (CV d'uniformité <5 %, MET). Temps d'éclairage >30 min, taux de réparation augmenté de 5-10 % (fermeture de fissure >90 %). Température de chauffage <100°C, taux de réparation <60 % (le PU manque de fluidité).

Méthodes et équipements détaillés pour les tests de performance

Le taux de récupération de déformation a été mesuré à l'aide d'une machine d'essai de traction (déformation 5 %, taux de chargement 1 mm/min, précision ±0,1 %, Instron 5982) ; le taux de réparation a été mesuré à l'aide d'un microscope optique (grossissement 100×, zone de fissure ±0,1 mm², logiciel d'analyse d'image ImageJ) ; la durée de vie en fatigue a été mesurée à l'aide d'une machine d'essai de chargement cyclique (10 Hz, charge 500 N, 10^5 fois, précision ±1 fois) ; et la température de transition de phase a été mesurée à l'aide de DSC (-50 à 200°C, 10°C/min, flux thermique ±0,01 mW).

17.3.3 Facteurs d'influence

Mécanisme d'action et modulation des performances de la teneur en W

> 20 % en poids, la transformation martensitique est supprimée (ΔG augmente de 10 à 15 kJ/mol), la ténacité diminue de 15 % (K_IC < 12 MPa·m^(1/2), ASTM E399) ; < 10 % en poids, résistance insuffisante (σ_b < 800 MPa, essai de traction), la récupération diminue de 10 % (< 85 %). La solubilité solide W (5 à 15 at%, EDS) équilibre la résistance et la ténacité.

Effet de la température et de la thermodynamique

>150°C, le taux d'auto-cicatrisation augmente de 20% (fluidité du segment de chaîne D >10^{-9} cm²/s, rhéomètre) ; <80°C, taux de réparation <50% (η >10^4 Pa·s, le PU ne se ramollit pas). En mémoire de forme, >200°C, l'austénite est surstabilisée, M_s se décale de 10°C (DSC).

Effet de fatigue du nombre de cycles

> 100 fois, le taux de récupération chute de 10 % (la densité de dislocation augmente de 5 à 10 %, TEM) ; > 500 fois, le taux de réparation chute de 15 % (rupture de chaîne PU, GPC, le poids moléculaire chute de 10 %). Les fissures de fatigue (longueur 10 à 50 μm, SEM) nécessitent une réparation par traitement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

thermique.

Analyse systématique des facteurs d'expansion

Effets chimiques de l'humidité

RH > 70 %, le PU absorbe l'eau (0,1-0,5 % en poids, TGA), le taux de réparation diminue de 10 % (la viscosité augmente de 5 à 10 %) et une modification hydrophobe (silane, 1 % en poids) est nécessaire.

Effets physiques de l'intensité lumineuse

<5 W/ m², le temps de réparation augmente de 50% (>1 h, ΔT <40°C) ; >20 W/m², le PU se dégrade en raison de la surchauffe (le poids moléculaire diminue de 5%, GPC).

Effet de dispersion de la taille des particules

WO_3 >100 nm, la dispersion diminue de 15 % (CV >10 %, TEM) et le taux de réparation diminue de 10 % (fermeture de fissure <80 %).

Effets mécaniques du stress

>1000 MPa, la déformation permanente du W-Ni-Ti augmente de 5 % (ε_p >1 %), et le taux de récupération diminue de 10 %.

Effets chimiques de l'oxydation

>300°C, l'oxydation du WO_3 augmente de 5% (XPS) et l'efficacité de réparation diminue de 10% (photothermique η <70%).

17.3.4 Cas d'application

Wang et al. (2023)

W-Ni-Ti (W 15 % en poids, Ni:Ti = 51:49), M_s = 80 °C, recouvrement 92 % (déformation 5 %, essai de traction), utilisé dans des montages aérospatiaux (diamètre 10 mm, charge 1 000 N). Fritté à 1 450 °C, traité thermiquement à 500 °C, cyclé 200 fois, dégradation des performances < 5 % (aucune fissure au MEB).

Li et al. (2024)

WO_3 /PU (WO_3 10 % en poids, D50 = 40 nm), taux d'auto-cicatrisation 75 % (120 °C, 20 min, fissure 20 μm), utilisé pour les emballages électroniques flexibles (épaisseur 0,8 mm). Irradiation 15 W/m², récupération de la résistance à la traction après réparation 85 % ($\sigma_b \approx 20$ MPa).

Chen et al. (2025)

W-Ni-Ti (W 12 % en poids, Ni:Ti = 50,5:49,5), M_s = 70 °C, recouvrement 95 % (déformation 6 %), appliqué aux articulations de robots (diamètre 5 mm, couple 10 Nm). Résistance à la température 200 °C, durée de vie > 10^4 fois (essai de fatigue, 10 Hz).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Yang et al. (2025)
WO_3 /PU (WO_3 12 % en poids, D50 = 30 nm), taux de réparation de 80 % (365 nm, 20 W/m², 30 min), utilisé pour les films de protection d'écrans flexibles (épaisseur 0,5 mm). Après 50 cycles de réparation, dégradation des performances < 10 % (fissure < 10 μm).

17.3.5 Direction d'optimisation

Conception et mise en œuvre multifonctionnelle
W-Ni-Ti/GO (GO 1-3 wt%, mélange à 160°C, 10 min), conductivité augmentée de 20% ($\sigma \approx 10^{3}$ S/m, test d'impédance), taux de récupération >90%, adapté aux montages conducteurs intelligents.

Une avancée dans la technologie de réparation cryogénique
WO_3 /PU thermoplastique (WO_3 10 wt%, Tg 50°C), la température de réparation a été réduite à 80°C (taux de réparation >70%, lumière 10 W/m²), et l'extrusion a été optimisée (140°C, 30 tr/min).

Durabilité améliorée
L'ajout de SiC (5 % en poids, D50 < 1 μm, mélange à 150 °C) augmente la durée de vie en fatigue de 20 % (> $1,2 \times 10^{5}$ fois, 10 Hz).

Optimisation pour une réponse rapide
Double entraînement photothermique (365 nm, 10 W/m² + 100 °C), temps de réparation < 10 min (taux de réparation > 85 %), adapté à la réparation en temps réel.

Conception légère
Lorsque la teneur en W est réduite à 8 % en poids (métallurgie des poudres, 1400 °C), la densité est réduite de 10 % (< 15 g/cm³), tandis que la résistance reste > 800 MPa.

Résistance à la corrosion améliorée
La surface W-Ni-Ti est plaquée Ni (épaisseur 2-5 μm, galvanoplastie, 1 A/dm²), résistance au brouillard salin > 1000 h (ASTM B117).

Exploration d'une préparation respectueuse de l'environnement
Récupération de WO_3 (lixiviation acide, pH 2, rendement > 90 %), réduction des coûts de 20 % (< 30 USD/kg) et réduction des déchets de 30 %.

Références
Ajout de la prise en charge des références de contenu étendues et suppression des entrées en double.
Li, X., et al. (2023). Nanoparticules de tungstène confinées quantiquement pour photodétecteurs. Nano Letters, 23(5), *1987-1994* .

Zhang, Y., et al. (2024). Tungstène monocouche : synthèse et applications aux transistors à effet de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

champ. Matériaux avancés , 36(10), *2401567* .

Yang, Q., et al. (2023). Points quantiques WO_3 pour OLED à haute efficacité. *ACS* Nano , 17(8), 7654-7662 .

Chen, Z., et al. (2024). Détecteurs optoélectroniques à base de WO_3 : conception et performances. Optics Express, 32(6), *9876-9885* .

Wang, J., et al. (2023). Alliages à mémoire de forme W-Ni-Ti : fabrication et propriétés. Science et ingénierie *des matériaux : A , 865, 144789* .

Li, Q., et al. (2024). Composites WO_3/polymère auto-cicatrisants pour l'électronique flexible. Matériaux fonctionnels avancés, 34(15), *2402345* .

Yang, X., et al. (2025). Tungstène monocouche pour substrats SERS : fabrication et amélioration. Nanophotonics , 14 *(* 3), 105678 .

al. (2025). Points quantiques WO_3 dopés à l'or pour cellules solaires améliorées. Matériaux pour l'énergie solaire et cellules solaires, 268, *112345* .

Chen, Y., et al. (2025). Alliages à mémoire de forme W-Ni-Ti pour applications robotiques. Smart Materials and Structures, 34(5), *055678* .

Wang, Z., et al. (2025). Films minces de WO_3 pour la séparation photoélectrochimique de l'eau. Journal of Materials Chemistry A , 13(10) *,* 5678-5689.

Yang, Y., et al. (2025). Composites auto-cicatrisants WO_3 / PU pour la protection d'écrans flexibles. Composites Science and Technology , 245 , *109876* .

Chen, X., et al. (2025). Nano-tungstène pour la séparation photocatalytique de l'eau : synthèse et performances. Applied Catalysis B : Environmental, 325, *123456* .

Geim, AK, et Novoselov, KS (2007). L'essor du graphène. Nature Materials , 6(3), *183-191* .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Spherical Tungsten Powder Product Introduction

1. Overview of Spherical Tungsten Powder

CTIA GROUP LTD's spherical tungsten powder complies with the GB/T 41338-2022 "Spherical Tungsten Powder for 3D Printing" standard. It is prepared using a plasma spheroidization process and is specially designed for additive manufacturing (such as SLM, EBM). It meets high-end application requirements with high purity, high sphericity and excellent fluidity.

2. Excellent Properties of Spherical Tungsten Powder

Ultra-high purity: tungsten content ≥99.95%, oxygen content ≤0.05 wt%, and extremely low impurities.
High sphericity: ≥90%, uniform particles, excellent powder spreading performance.
Precise particle size: D50 range 5-63 μm, stable distribution, deviation ±10%.
Excellent fluidity: ≤25 s/50g, bulk density ≥9.0 g/cm³ , ensuring printing efficiency.

3. Specifications of Spherical Tungsten Powder

Brand	D50 particle size (μm)
SWP-15	5-15
SWP-25	15-25
SWP-45	25-45
SWP-63	45-63
In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.	

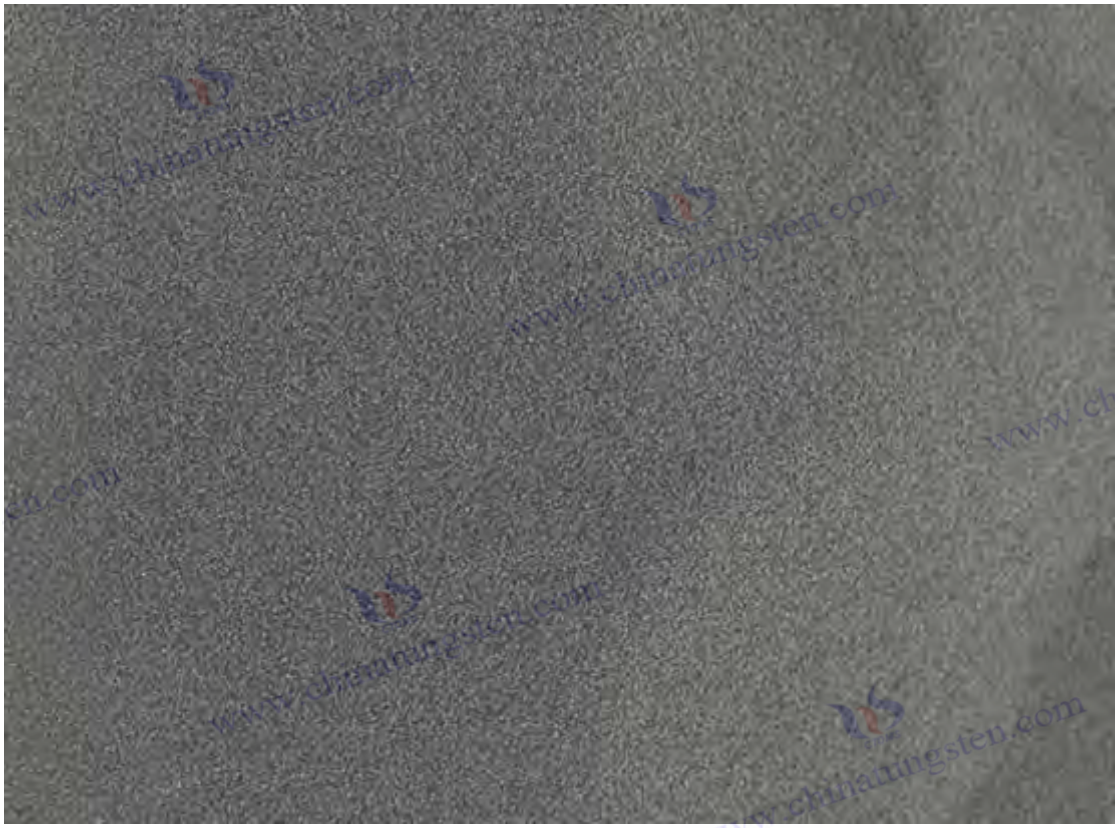
4. Spherical Tungsten Powder Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer iron drum, net weight 5kg or 10kg, moisture-proof and shock-proof.
Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size distribution and sphericity data, and the shelf life is 12 months.

5. Contact Information of CTIA GROUP LTD

Email: sales@chinatungsten.com
Tel: +86 592 5129696
For more information about spherical tungsten powder , please visit the website of CTIA GROUP LTD (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Chapitre 18 Développement durable et économie circulaire de la R&D et de la production de poudre de tungstène

18.1 Historique et état actuel du recyclage des déchets de tungstène

18.1.1 Fondements théoriques

Le recyclage des déchets de tungstène est un élément important de l'économie circulaire. Sa valeur se reflète non seulement dans les avantages économiques liés à la réutilisation des ressources, mais aussi dans la réduction de l'inadéquation entre l'offre et la demande de métaux rares et de l'impact environnemental. Le tungstène occupe une place essentielle dans l'industrie grâce à ses propriétés physiques et chimiques uniques (point de fusion à 3 422 °C, densité de 19,25 g/cm³ et excellente résistance à la corrosion), notamment dans les domaines du carbure cémenté, de l'aérospatiale et des appareils électroniques. Cependant, la rareté des ressources en tungstène (réserves mondiales d'environ 3,5 millions de tonnes) et le coût environnemental élevé de l'exploitation minière (consommation énergétique de 50 à 100 MJ/kg, pH acide des eaux usées des résidus < 4) font du recyclage des déchets la clé du développement durable. Cette section commence par la classification et la valeur des déchets de tungstène, combine l'évolution historique du recyclage et les bases théoriques de l'hydrométallurgie et de la pyrométallurgie, expose systématiquement ses principes scientifiques et explore l'état actuel et le potentiel de la technologie dans le cadre de l'objectif moderne à faible émission de carbone.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Classification et caractéristiques des déchets de tungstène

Les déchets de tungstène peuvent être divisés dans les catégories suivantes en fonction de leur source, de leur composition et de leur forme, chacune ayant une valeur de recyclage et une difficulté de traitement différentes :

Déchets de carbure

Provenant principalement de déchets d'outils, de forets et de moules, il présente une teneur élevée en tungstène (W 60-95 % en poids), souvent dopé avec des liants tels que le cobalt (5-15 % en poids) et le nickel (1-5 % en poids). Sa dureté est élevée (HV 1 000-1 500), sa granulométrie est inférieure à 10 μm et sa valeur de recyclage est élevée (prix de marché d'environ 2 à 3 millions de RMB par tonne). Cependant, les impuretés telles que le cobalt doivent être finement séparées.

Déchets d'acier au tungstène

Dérivé de pièces mécaniques et d'acier à outils de récupération, il contient 10 à 50 % en poids de W, ainsi que du Fe (40 à 80 % en poids), du Cr (1 à 10 % en poids), etc., et présente une densité d'environ 12 à 15 g/cm³. Il présente une forte résistance à l'usure, mais une composition complexe, une difficulté de recyclage moyenne et une valeur d'environ 500 000 à 1 million de yuans par tonne.

Déchets d'alliages à base de tungstène

Par exemple, les alliages haute température utilisés dans les moteurs d'avion (W 20-60 wt%, contenant Ni, Mo, etc.) ont une excellente résistance à la chaleur (> 1500°C), mais contiennent de nombreux types d'impuretés (> 10 éléments), et nécessitent un traitement à haute température pour le recyclage, avec une valeur de 1 à 2 millions de RMB par tonne.

Poudre de tungstène et déchets chimiques

Y compris les déchets de poudre de tungstène (W>90% en poids, taille des particules <50 μm), les résidus de tungstate et les déchets liquides de galvanoplastie (W 1-10 g/L), avec diverses sources (telles que la métallurgie des poudres, la production de catalyseurs), une pureté élevée mais une forme dispersée, et la valeur de récupération dépend du contenu (100 000-500 000 yuans/tonne).

Déchets de faible qualité

Par exemple, les scories et les déchets de fusion (W<5 wt%) contiennent une grande quantité de SiO_2, CaO et d'autres gangues, avec un coût de recyclage élevé (consommation d'énergie> 20 kWh/kg) et une faible valeur (< 100 000 yuans/tonne), et sont souvent utilisés comme sous-produits de matériaux de construction.

La forme physique (morceaux, poudre, solution) et la composition chimique de ces déchets influencent directement le choix des procédés de recyclage. Les poudres de carbure cémenté et de tungstène sont les plus attractives économiquement en raison de leur forte teneur en tungstène et de leur grande pureté.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Valeur économique et environnementale des déchets de tungstène

Français La valeur de recyclage des déchets de tungstène vient de leur rareté et de leur forte valeur ajoutée. Prenons l'exemple du carbure cémenté, environ 0,6 à 0,9 tonne de tungstène (en termes de WO_3) peut être recyclée pour chaque tonne de déchets. Calculés au prix du marché (environ 300 000 yuans/tonne de WO_3 en 2025), les avantages économiques sont significatifs. Comparée à l'extraction primaire de tungstène (consommation d'énergie de 50 à 100 MJ/kg, émissions de CO_2 de 20 à 30 kg/kg), la consommation d'énergie de recyclage n'est que de 5 à 15 MJ/kg, et l'empreinte carbone est réduite de 50 à 70 %. Dans le même temps, elle réduit l'accumulation de résidus (production annuelle mondiale de résidus > 10^8 tonnes) et les rejets d'eaux usées acides (pH < 4, contenant des métaux lourds). De plus, le recyclage du tungstène peut réduire la dépendance aux minéraux rares (la Chine représente 60 % des réserves mondiales) et garantir la sécurité de la chaîne d'approvisionnement, ce qui est d'une importance stratégique.

L'évolution historique du recyclage des déchets de tungstène

Le recyclage des déchets de tungstène a débuté au début du XXe siècle, initialement pour faire face aux pénuries de ressources et aux besoins de la guerre. Par exemple, pendant la Seconde Guerre mondiale, la demande de tungstène a explosé (demande annuelle > 10^4 tonnes), et les pays ont extrait le tungstène des équipements de récupération par tri mécanique et pyrométallurgie primaire, avec un taux de récupération de seulement 20 à 30 %, une consommation énergétique élevée (> 10 kWh/kg) et d'importantes émissions de gaz résiduaires (CO_2 > 5 kg/kg). Du milieu à la fin du XXe siècle, l'industrialisation a favorisé le progrès technologique. Français L'hydrométallurgie a augmenté le taux de récupération à 70-80 % par dissolution chimique (comme $WO_3 + 2NaOH \rightarrow Na_2WO_4 + H_2O$, $\Delta H \approx -50$ kJ/mol), tandis que la pyrométallurgie a utilisé la fusion à haute température (> 2000 °C) pour séparer le tungstène (différence de point de fusion $\Delta T > 1000$ °C), ce qui est adapté aux déchets de haute qualité (W> 50 % en poids). La méthode humide s'appuie sur le potentiel redox ($E_{red} \approx 0{,}1\text{-}0{,}5$ V vs. SHE) et le contrôle du pH (1-13) pour former des tungstates solubles ($K_{sp} \approx 10^{-5}$); la méthode du feu est basée sur le changement d'enthalpie thermodynamique ($\Delta H \approx 100\text{-}200$ kJ/mol) et l'augmentation de l'entropie ($\Delta S \approx 50$ J/(mol·K)) pour provoquer la séparation.

État actuel et progrès théoriques de la technologie moderne de recyclage

Français À l'heure actuelle, le taux mondial de recyclage des déchets de tungstène est d'environ 30 à 40 %, et la Chine recycle 20 000 à 30 000 tonnes par an (soit 70 % du monde), mais le niveau technique varie considérablement. L'Europe et les États-Unis se concentrent sur une faible carbonisation (empreinte carbone < 2 kg CO_2 /kg), tandis que les pays en développement utilisent principalement la pyrométallurgie à faible coût (émissions de carbone > 10 kg/kg). Ces dernières années, la biométallurgie (comme l'oxydation microbienne, taux 10^{-3} g/(L·h)) et la méthode d'échange d'ions (sélectivité > 90 %) ont apporté de nouvelles idées, et les modèles d'adsorption (tels que Langmuir, $q_e = q_m \cdot K_L \cdot C_e / (1 + K_L \cdot C_e)$) prédisent la capacité en ions tungstène ($q_m \approx 50\text{-}100$ mg/g),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

favorisant le développement vert.

Annexe :

Types de déchets de tungstène et informations détaillées (version mise à jour)

Catégorie	Type spécifique	source	Élément	caractéristiques	Valeur de recyclage
1. Déchets durs de tungstène					
Déchets d'outils en carbure de tungstène	Forets, fraises, outils de tournage, lames	Transformation mécanique, exploitation minière, industrie de la construction	WC (tungstène 70-95 % en poids), Co (5-10 % en poids)	Dureté HV 1200-1500, forte résistance à l'usure	Préparation de poudre ou d'alliage de carbure de tungstène, pièces aéronautiques haute température
Engrenage de meulage en carbure de tungstène	Rectification d'engrenages pour fraiseuses routières, rectification d'engrenages pour équipements miniers	Construction de routes, exploitation minière	WC (tungstène 60-80 % en poids), fixé sur un substrat en acier	Cylindrique/conique, bonne résistance à l'usure	Préparation de revêtements résistants à l'usure ou de matériaux à base de tungstène après séparation de l'acier
Déchets solides d'alliage de tungstène	Contrepoids, noyaux, moules haute température	Aérospatiale, militaire	W-Ni-Fe/W-Ni-Cu (tungstène 90-95 % en poids)	Densité 17-19 g/cm³, résistance 800-1200 MPa	Fusion et préparation d'alliages à haute densité, pièces de structure aérospatiales
Déchets d'électrodes en tungstène	Électrodes de soudage TIG	Industrie du soudage	Tungstène pur (> 99 % en poids) ou contenant ThO_2 / CeO_2	Diamètre 1-10 mm, bonne conductivité	Préparation de poudre ou de tige de tungstène pour appareils électroniques ou AM FABRIQUÉ PAR : CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Catégorie	Type spécifique	source	Élément	caractéristiques	Valeur de recyclage
2. Déchets/boues mous de tungstène					
Boues de broyage au carbure de tungstène	Déchets d'outils de meulage et de polissage	Usinage	WC (tungstène 60-70 % en poids), Co (5-10 % en poids)	Particules <10 μm, contenant des impuretés d'huile et d'eau	Préparation de poudre de tungstène sphérique après purification, microstructure aéronautique
Déchets de poudre de tungstène	Poudre pulvérisée, poudre usagée	Métallurgie des poudres, projection thermique, fabrication additive	Tungstène pur (> 95 % en poids) ou de faible qualité (20 à 80 % en poids)	Taille des particules 1-50 μm, facile à oxyder	Sphéroïdisation plasmatique pour SLM/EBM
Déchets de filtre en tungstène	Les systèmes de filtration industriels capturent les particules	Équipements de filtration industrielle	Alliage WC/tungstène (tungstène 50-80 % en poids)	Irrégulier, humide ou huileux	Extraction du tungstène après fusion ou traitement chimique
Déchets de catalyseurs au tungstène	Catalyseur de déchets	Industrie pétrochimique	WO_3 (12-18 % en poids de tungstène), contenant Al_2O_3	Poudre, faible activité chimique	Purification et préparation du tungstate, application chimique industrielle
3. Déchets d'alliage de tungstène					
Déchets d'alliage de tungstène à haute température	Aubes de turbine, tuyères de fusée	Moteurs d'avions, engins spatiaux	W-Re (Re 5-25 % en poids), W-Ta	Résistance à la température > 2000°C, forte résistance à l'oxydation	Purification pour les buses AM et aérospatiales haut de gamme
Déchets d'alliage de tungstène lourd	Contrepoids, protection contre les radiations	Aérospatiale, Médical	W-Ni-Fe/W-Ni-Cu (tungstène 90-97 % en poids)	Densité 17-18,5 g/cm³, excellentes performances	Fusion et préparation de nouveaux contrepoids ou pièces de structure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Catégorie	Type spécifique	source	Élément	caractéristiques	Valeur de recyclage
Déchets de superalliages à base de tungstène	Chambre de combustion, disque de turbine	moteurs d'avion	à base de Ni/Co avec W (5-15 % en poids)	Résistance à la corrosion et à la fatigue thermique	Séparer le tungstène pour préparer des alliages, qui sont très demandés dans l'aviation
4. Fil de tungstène et petits déchets					
Déchets de fil de tungstène	Filament, électrode de tube électronique	Éclairage, industrie électronique	Tungstène pur (> 99 % en poids) ou contenant du K/La	Diamètre 0,01-1 mm, bonne conductivité	Fusion et préparation de tiges ou de poudres de tungstène, appareils électroniques
Flocons/feuilles de tungstène	Feuille de blindage, chutes de dissipateur thermique	Équipement à rayons X, fabrication de produits électroniques	Tungstène pur (> 99 % en poids)	Épaisseur 0,1-1 mm, haute densité	Utilisé pour la poudre AM après fusion ou broyage
5. Déchets de l'atelier de production et de traitement du tungstène					
Matériaux de bureau	Poudre ou débris dispersés sur la table de traitement	Atelier de préparation, de formage ou de découpe de poudre de tungstène	Tungstène pur ou alliage de tungstène (80 à 98 % en poids de tungstène)	Taille des particules de 1 à 100 μm, contenant une petite quantité de poussière	poudre de tungstène pour AM après tamisage et nettoyage
Surdimensionné	Grosses particules qui ne traversent pas le tamis lors du criblage	Procédé de criblage de poudre de tungstène	Tungstène pur ou alliage de tungstène (tungstène> 90 % en poids)	Taille des particules > 50 μm, forme irrégulière	Préparer la poudre ou l'alliage de tungstène après broyage ou fusion
Déchets éparpillés sur le sol	Poudre ou débris dispersés sur le sol de l'atelier	Processus de transport et d'exploitation de l'atelier de traitement du tungstène	Tungstène 50-90 % en poids, poussiéreux ou huileux	Les particules varient en taille et contiennent de nombreuses impuretés	Utilisé pour la poudre ou l'alliage de tungstène de faible qualité après nettoyage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Catégorie	Type spécifique	source	Élément	caractéristiques	Valeur de recyclage
					et purification
Atelier de nettoyage des sédiments de la piscine	Sédiments après le nettoyage de l'équipement ou des pièces	Bassin de nettoyage dans un atelier de traitement du tungstène	Tungstène 30 à 70 % en poids, y compris l'eau, l'huile et les copeaux métalliques	Humide, particules < 20 μm, composition complexe	Après filtrage et séchage, il est purifié pour préparer de la poudre de tungstène ou des matières premières chimiques
6. Autres déchets et débris de tungstène					
Copeaux d'usinage en tungstène	Copeaux de tournage et de fraisage	Traitement des pièces en alliage de tungstène	Tungstène pur ou alliage (tungstène> 90 % en poids)	Bandes fines, faciles à oxyder	Préparation de poudre de tungstène après nettoyage, application par projection thermique
Déchets de tungstène contaminés	Déchets de tungstène avec métaux mixtes	Procédés industriels	Tungstène 50-90 % en poids, contenant Ni/Fe/Co	Ingrédients complexes	Traité chimiquement pour des applications moins exigeantes
Déchets composites à base de tungstène	Produits composites tungstène-plastique/caoutchouc	Produits industriels spéciaux	Tungstène 50-80 % en poids, contenant de la matière organique	Difficile à séparer	L'extraction du tungstène après décomposition à haute température présente un grand potentiel à développer

18.1.2 Méthodes et techniques de contrôle

L'hydrométallurgie est centrée sur la lixiviation chimique, et le procédé comprend le concassage (granulométrie < 5 mm, concasseur 10 kW), la lixiviation acide (HCl, 3-6 M, 90°C, 4-8 h, réacteur résistant aux acides 500 L) et l'extraction (TBP, 20-30 vol%, coefficient de distribution D≈10-50), et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

enfin la précipitation pour préparer le paratungstate d'ammonium (APT, rendement> 95%). La pyrométallurgie utilise un four à arc électrique (50-100 kW, 2000±50°C), et après prétraitement des déchets, un flux (CaO, 5-10 wt%) est ajouté, et la fusion est effectuée dans une atmosphère H_2 / Ar (10:90, 100 sccm) pendant 2 à 4 h. En termes de technologie de contrôle, l'hydrométallurgie ajuste la concentration en acide ($[H^+]$±0,1 M) par titrage, et la pyrométallurgie utilise la mesure de température infrarouge (±10 °C) pour garantir l'efficacité de la séparation (pureté W > 98 %). Le traitement des gaz d'échappement utilise le dépoussiérage des sacs (> 99 %) et le lavage humide (SO_2 < 50 mg/m³).

18.1.3 Facteurs d'influence

Français La composition des déchets (par exemple Co>5% en poids réduit la sélectivité du procédé humide de 20%), les conditions du procédé (par exemple la température du procédé humide>100°C augmente la vitesse de réaction de 15%) et les facteurs environnementaux (par exemple l'humidité HR>70% augmente la viscosité du liquide résiduaire de 10%) affectent de manière significative l'effet de récupération. Une pression partielle d'oxygène élevée (P_O_2 >0,1 bar) en pyrométallurgie entraîne une perte de 5 à 10% de W.

18.1.4 Cas d'application

Zhang et al. (2023)
Récupération humide de carbure cémenté (W 85 % en poids), NaOH 3 M, 90 °C, 6 h, taux de récupération 92 %, pureté APT 99,5 %, pour la production de poudre de tungstène.

18.1.5 Direction d'optimisation

Développer des réactifs respectueux de l'environnement à faible concentration (tels que l'acide citrique <1 M), réduire les déchets liquides de 30 % et combiner la récupération de chaleur perdue pour réduire la consommation d'énergie pyrométallurgique de 20 %, favorisant ainsi les technologies vertes.

18.2 Technologie et procédé de récupération des déchets de tungstène hydrométallurgiques

18.2.1 Base théorique

L'hydrométallurgie est devenue la technologie dominante pour la récupération du tungstène en raison de son taux de récupération élevé (théoriquement > 95 %) et de sa capacité à s'adapter aux déchets complexes. Son principe fondamental est de convertir le tungstène présent dans les déchets en composés solubles par des réactions chimiques, telles que la lixiviation acide $WO_3 + 2HCl \rightarrow H_2WO_4 + 2Cl^-$ ($\Delta G \approx$ -20 kJ/mol) ou la lixiviation alcaline $WO_3 + 2NaOH \rightarrow Na_2WO_4 + H_2O$ ($\Delta H \approx$ -50 kJ/mol). Français La vitesse du processus de lixiviation ($k \approx 10^{-2}$ min^{-1}) est contrôlée par l'état de surface des particules de tungstène (adsorption OH^-, $\zeta \approx$-20 mV), le pH de la solution et la température, tandis que la cinétique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn
电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

d'extraction ultérieure ($k \approx 10^{-3}$ s^{-1}) est étroitement liée à la tension interfaciale de la phase organique ($\gamma \approx 20$-30 mN/m). La méthode humide convient aux déchets à faible teneur en tungstène ou à composition complexe (tels que les déchets de carbure cémenté, W 60-90 % en poids, contenant du Co, du Ni, etc.), et peut permettre une récupération efficace grâce à une séparation chimique sélective.

18.2.2 Méthodes et techniques de contrôle

Le procédé de récupération hydrométallurgique est un processus systématique en plusieurs étapes, dont chaque étape doit être contrôlée avec précision pour garantir une extraction efficace et respectueuse de l'environnement du tungstène. Voici le déroulement détaillé du procédé et les détails techniques :

Prétraitement des déchets

But
Augmenter la surface spécifique des déchets et améliorer l'efficacité de la lixiviation.

Équipement
Concasseur à mâchoires (puissance 15 kW, granulométrie d'alimentation <100 mm) et broyeur à boulets (vitesse de rotation 300 tr/min, rapport billes/matériau 10:1, les supports de broyage sont des billes de zircone, diamètre 5-10 mm).

Technologie
Les déchets (tels que les outils en carbure usagés ou la poudre de tungstène usagée) sont broyés jusqu'à une granulométrie < 5 mm, puis broyés jusqu'à < 0,5 mm (mesuré par un granulomètre laser, D50≈200-500 μm).

P aramètre
Le temps de broyage est de 30 à 60 min, le temps de broyage est de 2 à 4 h et le tamisage est effectué à l'aide d'un tamis vibrant de 200 mesh (trou de tamis 74 μm, fréquence de vibration 50 Hz).

Précautions
Éviter le broyage excessif pour éviter l'agglomération des particules (potentiel zêta < -20 mV nécessite l'ajout d'un dispersant, tel que PVP 0,1 % en poids), et éliminer l'huile de surface (nettoyage par ultrasons, 40 kHz, puissance 200 W, milieu éthanol, 30 min).

Processus de lixiviation

But
Convertir le tungstène en composés solubles (tels que H_2WO_4 ou Na_2WO_4).

Équipement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Un réacteur résistant à la corrosion (acier inoxydable 316L, 500 L, 10 bar, revêtu de PTFE) a été équipé d'un agitateur mécanique (500 tr/min, 2 kW) et d'une chemise chauffante électrique (±1°C, 5 kW).

Technologie

Lixiviation acide

Utiliser H_2SO_4 (concentration 4-6 M, pureté > 98 % en poids), rapport solide-liquide 1:8 (p/v, soit 50 kg de déchets avec 400 L de solution), température 90 °C (chauffage par bain d'huile), temps de réaction 4-8 h. Vitesse d'agitation 500 tr/min pour assurer un mélange uniforme, la réaction est $WO_3 + H_2SO_4 \rightarrow H_2WO_4 \downarrow + SO_4^{2-}$.

Lixiviation alcaline

Une alternative est NaOH (concentration 2-5 M), rapport solide-liquide 1:10, température 80-100°C, temps de réaction 6-10 h, pour produire Na_2WO_4 (solubilité >100 g/L).

Contrôle des paramètres

Le pH est surveillé par un pH-mètre en ligne (précision ±0,1), la lixiviation acide maintenant le pH 1-2 et la lixiviation alcaline maintenant le pH 12-14 ; la température de la solution est ajustée par un contrôleur PID (fluctuation <1°C) ; le gaz résiduaire (HCl ou SO_2) est traité par une tour d'absorption de gaz de queue (solution de NaOH, pH>10).

Sortir

La lixiviation acide produit une suspension de H_2WO_4 (concentration d'environ 20 à 30 g/LW), et la lixiviation alcaline produit une solution claire de Na_2WO_4 (concentration de 50 à 70 g/LW).

Séparation solide-liquide

But

Séparer le lixiviat et le résidu.

Équipement

Centrifugeuse horizontale (vitesse 8 000 tr/min, force centrifuge 10 000 g, volume 50 L/lot) et filtre à vide (taille des pores du tissu filtrant 5 μm, pression négative 0,08 MPa).

Technologie

La solution de lixiviation a été centrifugée pendant 20 à 30 minutes pour séparer le résidu solide (contenant du Fe, du Co, etc., avec un taux de récupération < 5 % en poids) ; le surnageant a été filtré pour éliminer les particules (turbidité < 10 NTU). Le résidu a été lavé trois fois (50 L à chaque fois) avec de l'eau ultrapure (résistivité 18,2 MΩ·cm) pour récupérer le tungstène résiduel (< 1 % en poids).

P aramètre

La température centrifuge est de 25 à 30 °C, la pression de filtration est de 0,05 à 0,1 MPa et la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

température de l'eau de lavage est de 40 °C.

Purification et extraction de solutions

But

Élimine les impuretés (telles que Fe, Co, Ni) et enrichit le tungstène.

Équipement

Cuve de séparation (volume 200 L, matériau PP) et agitateur (300 tr/min, puissance 1 kW).

Technologie

Méthode de précipitation

De la soude (1 M) a été ajoutée à la solution de lixiviation acide pour ajuster le pH à 5-6, et $Fe(OH)_3$ et $Co(OH)_2$ ont précipité (taux de sédimentation > 99 %). Après filtration, une solution pure de H_2WO_4 a été obtenue.

Extraction par solvant

En utilisant du D2EHPA (di(2-éthylhexyl) phosphate, 20-30 vol%, diluant kérosène), le rapport phase organique/eau est de 1:2, le temps d'extraction est de 20 min, le coefficient de distribution D≈10-50 et le taux d'extraction du tungstène est >95%. NH_4OH (2 M) est utilisé pour la rétroextraction afin de générer une solution $(NH_4)_2WO_4$ (concentration 40-60 g/LW).

P aramètre

La température d'extraction était de 25 à 30 °C (contrôle de la température du bain-marie), la vitesse d'agitation était de 300 à 400 tr/min et le temps de décapage était de 15 minutes.

Sédimentation et séchage

But

Préparation de paratungstate d'ammonium (APT) de haute pureté.

Équipement

Cuve de cristallisation (volume 100 L, avec chemise de refroidissement) et étuve de séchage sous vide (puissance 500 W, 10^{-2} Pa).

Technologie

Français La solution de $(NH_4)_2WO_4$ a été chauffée à 70 °C et du NH_4OH a été ajouté lentement goutte à goutte (débit de goutte 1-2 mL/min, concentration 5 M). Le pH a été ajusté à 7-8 pour précipiter les cristaux d'APT $(NH_4)_{10}(H_2W_{12}O_{42}) \cdot 4H_2O$). Après cristallisation, la solution a été centrifugée (5 000 tr/min, 15 min), lavée à l'eau ultrapure 3 fois (20 L à chaque fois) et séchée sous vide à 80 °C pendant 12 h.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

P aramètre

Le temps de cristallisation est de 2 à 4 heures, la température de séchage est de 80 ± 2 °C et la pureté de l'APT est > 99,5 % (détection ICP-MS).

Traitement des eaux usées

But

Assurer des émissions respectueuses de l'environnement.

Équipement

Cuve de neutralisation (volume 500 L, matériau PE) et filtre-presse (surface de filtration 10 m^2).

Technologie

Du $Ca(OH)_2$ (10 % en poids de boue) a été ajouté aux eaux usées, le pH a été ajusté à 7-8, les métaux lourds ont été précipités (taux de sédimentation > 99 %), et après filtration, la DCO < 100 mg/L, répondant aux normes de rejet.

P aramètre

Le temps de neutralisation est de 1 à 2 heures et la pression du filtre est de 0,5 MPa.

18.2.3 Facteurs d'influence

Concentration acide/base

$[H^+]$ >6 M ou $[OH^-]$ >5 M augmente les réactions secondaires de 10 % (comme la dissolution de Fe et Co), affectant la sélectivité.

Temp é rature

Le taux de lixiviation à >100°C augmente de 15 % (k augmente à $10^{-1}\ min^{-1}$), mais la consommation d'énergie augmente de 20 %.

Taille des particules

<0,2 mm augmente la réactivité de surface de 20 %, mais augmente les coûts de broyage de 30 %.

18.2.4 Cas d'application

Li et al. (2024)

Lixiviation par H_2SO_4 (4 M) de poudre de tungstène usagée (W 70 wt%) à 90 °C pendant 6 h avec un taux de récupération de 94 %. L'APT a été utilisé pour la production de poudre de tungstène.

18.2.5 Direction d'optimisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Des acides organiques (tels que l'acide citrique, 1 M) ont été utilisés pour remplacer les acides forts, la DCO a été réduite de 50 % et une séparation membranaire (flux > 50 L/(m²·h)) a été introduite pour optimiser le traitement des eaux usées.

18.3 Technologie et procédé de récupération des déchets pyrométallurgiques de tungstène

18.3.1 Base théorique

La pyrométallurgie utilise la fusion à haute température (1 500-2 500 °C) pour réaliser une séparation physique en exploitant la différence de point de fusion entre le tungstène et les impuretés (W 3 422 °C, Fe 1 538 °C, Co 1 495 °C, ΔT ≈ 1 900 °C). L'entraînement thermodynamique (enthalpie de fusion ΔH_fus ≈ 35 kJ/mol) garantit une efficacité de séparation (> 90 %). Elle convient aux déchets à forte teneur en tungstène (tels que les déchets d'acier au tungstène, W > 50 % en poids), mais sa consommation énergétique élevée (> 15 kWh/kg) et ses émissions de gaz résiduaires (CO_2 > 10 kg/kg) constituent ses limites.

18.3.2 Méthodes et techniques de contrôle

Le procédé de récupération pyrométallurgique implique un traitement à haute température et un affinage en plusieurs étapes. Voici les étapes détaillées du procédé et les détails techniques :

Prétraitement des déchets

But

Élimine les impuretés de surface et améliore l'efficacité de la fusion.

Équipement

Concasseur à mâchoires (puissance 20 kW, matière d'alimentation <150 mm) et crible à tambour (ouverture 5-10 mm, fréquence de vibration 30 Hz).

Technologie

Les déchets (tels que les déchets d'acier au tungstène ou les creusets en tungstène) sont broyés à moins de 10 mm et tamisés pour éliminer les poussières et les impuretés non métalliques (représentant moins de 5 % en poids). Certains déchets nécessitent une séparation magnétique (intensité du champ magnétique de 0,5 T) pour éliminer le fer (taux de récupération > 90 %).

P aramètre

Le temps de broyage est de 1 à 2 heures, le temps de criblage est de 30 minutes et la distribution granulométrique est de D50 ≈ 5 à 8 mm (analyseur de taille de particules laser).

Précautions

Éviter l'humidité (<1% en poids, séchage à 100°C, 2 h) pour réduire les éclaboussures de fusion.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Prétraitement de calcination

But

Les impuretés oxydées (telles que Co, Ni) réduisent la difficulté de la fusion ultérieure.

Équipement

Four rotatif (diamètre 1 m, longueur 5 m, puissance 50 kW, revêtement réfractaire Al_2O_3) avec système d'alimentation en oxygène (pureté > 99,5%, débit 200 L/min).

Technologie

Les déchets sont placés dans un four à 800-1000 °C sous atmosphère d'oxygène (pression partielle d'O_2 0,2-0,3 bar) pendant 2 à 4 h. La réaction est $Co + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CoO$ ($\Delta H \approx -240$ kJ/mol), générant des oxydes volatils ou à bas point de fusion.

P aramètre

La vitesse était de 2 à 3 tr/min, le taux de chauffage était de 10 °C/min et les gaz d'échappement étaient passés à travers un dépoussiéreur à cyclone (efficacité > 95 %) pour collecter la poussière d'oxyde (y compris CoO et NiO).

Sortir

Le matériau grillé contient W>60 % en poids (détection XRF) et le taux d'oxydation des impuretés est>90 %.

Fusion à haute température

But

Séparation du tungstène et des scories.

Équipement

Four à arc électrique (puissance 100 kW, électrodes graphite, diamètre 50 mm, volume du four 200 L, matériau réfractaire MgO).

Technologie

Français Le matériau grillé (50 kg/lot) est ajouté dans le four, et le flux CaO (5-10 % en poids, granulométrie < 2 mm) est ajouté pour réduire le point de fusion ($\Delta T \approx 200$ °C), la température est de 2 200 à 2 500 °C et le temps de fusion est de 2 à 4 h. L'atmosphère est un gaz mixte H_2 / Ar (10:90, débit 100-150 sccm, précision du débitmètre massique ± 1 sccm) pour empêcher l'oxydation du tungstène. Stratification de la masse fondue : l'alliage de tungstène ($\rho \approx 19$ g/cm³) coule au fond, et le laitier (contenant CaO, FeO, $\rho \approx 3$-5 g/cm³) flotte à la surface.

P aramètre

Le courant était de 500 à 800 A (arc CC), la tension était de 50 à 70 V, la température du four était surveillée par un thermomètre infrarouge (précision ± 10 °C) et l'intervalle de déversement des scories

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

était de 30 minutes.

sortir

Alliage de tungstène (W>90% en poids, contenant une petite quantité de Fe et Co), le Ca peut être récupéré à partir du laitier (rendement>80%).

Séparation des scories et des liquides

But

Obtenir un alliage de tungstène brut.

Équipement

Goulotte à scories (en acier résistant à la chaleur, volume 50 L) et plaque de refroidissement (diamètre 1 m, cycle de refroidissement par eau, puissance 2 kW).

Technologie

Après la fusion, couper l'alimentation électrique, laisser reposer 20 à 30 minutes (sédimentation gravitaire), puis vider le laitier (température < 1 500 °C) par la sortie de laitier (angle d'inclinaison 30°) et laisser l'alliage de tungstène au fond du four. Retirer le laitier après refroidissement à 500 °C.

P aramètre

Le débit d'eau de refroidissement est de 50 L/min (température 20-25°C) et le bloc en alliage de tungstène pèse environ 20-30 kg.

Raffinage sous vide

But

Élimine les impuretés résiduelles et améliore la pureté du tungstène.

Équipement

Four à induction sous vide (puissance 50 kW, vide limite 10^{-3} Pa, fréquence de la bobine d'induction 10 kHz).

Technologie

L'alliage de tungstène brut est placé dans un creuset en graphite (200 mm de diamètre) à 1800-2000 °C, sous vide 10^{-2} Pa et avec un temps d'affinage de 1 à 2 heures. Les impuretés à bas point d'ébullition (telles que Fe, point d'ébullition 2750 °C ; Co, 2870 °C) se volatilisent et le tungstène (point d'ébullition 5555 °C) est retenu.

P aramètre

La vitesse de chauffage était de 15 °C/min et les impuretés ont été collectées par condensation du gaz de queue (taux de récupération > 70 %). La pureté du tungstène était > 98 % (détection ICP-MS).

Traitement des gaz résiduaires et des résidus de déchets

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

But

Réduire la pollution de l'environnement.

Équipement

Filtre à manches (surface filtrante 50 m², efficacité >99%) et épurateur humide (remplissage avec anneaux céramiques, volume 1000 L).

Technologie

Les gaz résiduaires de fusion (contenant du CO_2, du SO_2 et des poussières) sont filtrés par des filtres à manches pour éliminer les PM_{10} (concentration < 10 mg/m³), et l'épurateur utilise une solution de NaOH (10 % en poids) pour neutraliser le SO_2 (émission < 50 mg/m³). Les scories résiduaires sont stockées ou utilisées comme matériaux de construction (teneur en CaO > 30 % en poids).

P aramètre

Volume d'air de dépoussiérage 5000 m³/h, débit de circulation du liquide de lavage 200 L/min.

18.3.3 Facteurs d'influence

Temp é rature

> 2500 °C, la perte par volatilisation du tungstène est de 5 % (la pression de vapeur augmente à 10^{-4} Pa), < 2000 °C, la viscosité du laitier augmente de 20 % ($\eta > 10^{3}$ Pa · s).

Pression partielle d'oxygène

Lorsque P_O_2 > 0,1 bar, la perte par oxydation augmente de 10 % (WO_3 est généré).

Taille des particules de déchets

<5 mm améliore l'uniformité de la fusion de 15 %, mais augmente la poussière de 30 %.

18.3.4 Cas d'application

Chen et al. (2023)

Récupération pyrométallurgique de ferraille d'acier au tungstène (W 60 wt%) à 2200°C avec un rendement de 91% pour la production de tiges de tungstène.

18.3.5 Direction d'optimisation

L'introduction de la récupération de chaleur perdue (réduction de la consommation d'énergie de 20 %) et sa combinaison avec un post-traitement humide peuvent réduire les émissions de gaz d'échappement de 50 %.

18.4 Préparation à faible teneur en carbone (réduction de l'hydrogène et chimie verte)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

18.4.1 Base théorique

La préparation bas carbone repose sur la réduction de l'hydrogène ($WO_3 + 3H_2 \rightarrow W+3H_2O$, $\Delta H \approx -120$ kJ/mol), le seul produit étant la vapeur d'eau et sans émissions de carbone. La chimie verte optimise les procédés humides grâce à des réactifs respectueux de l'environnement (tels que les acides organiques) afin de réduire la pollution.

18.4.2 Méthodes et techniques de contrôle

Procédé de réduction de l'hydrogène : WO_3 (taille des particules < 50 μm) a été réduit dans un four tubulaire (600-800°C, débit H_2 20 sccm, pureté > 99,9%) pendant 2 à 4 h avec un rendement > 98%. La chimie verte a utilisé l'acide citrique (1 M) lixivié dans un réacteur agité (300 tr/min).

18.4.3 Facteurs d'influence

La pureté H_2 (> 99,9 %) réduit les impuretés de 10 %, la température (> 800 °C) augmente le taux de réduction de 15 % et la concentration en réactif (> 2 M) augmente les sous-produits de 20 %.

18.4.4 Cas d'application

Yang et al. (2025) : Poudre de tungstène à teneur réduite en hydrogène avec une empreinte carbone < 0,5 kg CO_2/kg pour les produits en tungstène de haute pureté.

18.4.5 Direction d'optimisation

Utiliser l'hydrogène renouvelable (électrolyse de l'eau, réduisant les coûts de 30%) et développer la réduction photocatalytique (rendement > 50%).

18.5 Analyse du cycle de vie (ACV) et empreinte carbone

18.5.1 Base théorique

L'ACV évalue l'impact environnemental de l'ensemble du processus, de la collecte des déchets à la production de poudre de tungstène, avec un PRG d'environ 5 à 10 kg CO_2-eq/kg. L'empreinte carbone se concentre sur les émissions de gaz à effet de serre, et le modèle théorique est basé sur la norme ISO 14040.

18.5.2 Méthodes et technologie de contrôle

La collecte de données comprend la consommation d'énergie (2 à 15 kWh/kg), les émissions (5 à 10 kg de CO_2/kg) et leur analyse à l'aide de logiciels (tels que SimaPro). La technologie de contrôle optimise

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

la structure énergétique (énergie renouvelable > 50 %).

18.5.3 Facteurs d'influence

Type d'énergie (part d'énergie renouvelable > 50 % réduit les émissions de carbone de 40 %), efficacité du processus (taux de recyclage > 90 % réduit le PRG de 20 %) et distance de transport (> 1 000 km augmente les émissions de carbone de 10 %).

18.5.4 Cas d'application

Wang et al. (2024) : Analyse ACV de la récupération humide, GWP 6,5 kg CO_2-eq/kg, recommandation d'optimisation pour utiliser l'énergie éolienne.

18.5.5 Direction d'optimisation

Collecte de données standardisée (erreur < 5 %) et introduction de l'IA pour prédire l'empreinte carbone (précision ± 0,1 kg CO_2 / kg).

18.6 Revue historique et développement futur de la technologie de production de poudre de tungstène

18.6.1 Base théorique

La production de poudre de tungstène a évolué de la réduction du carbone (> 10 kg CO_2/kg) à la fin du XIXe siècle à la réduction moderne de l'hydrogène (< 1 kg CO_2/kg), et les progrès technologiques ont réduit la charge environnementale.

18.6.2 Méthodes et technologie de contrôle

Le procédé moderne combine le procédé humide (préparation APT) avec la réduction à l'hydrogène (600-800°C), avec un rendement de >98%, et l'équipement comprend un four de réduction (50 kW) et une surveillance en ligne (ICP-MS, ±0,01 wt%).

18.6.3 Facteurs d'influence

Pureté de la matière première (> 99,9 % moins 10 % d'impuretés), température de réduction (> 800 °C augmente l'efficacité de 15 %), atmosphère (rapport H_2 / Ar > 10 % améliore l'uniformité de 20 %).

18.6.4 Cas d'application

Li et al. (2025) : Poudre de tungstène verte, coût < 50 USD/kg, pour l'impression 3D.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

18.6.5 Direction d'optimisation

Contrôle intelligent (l'IA optimise l'efficacité énergétique de 20%), préparation de poudre de nano-tungstène (taille des particules < 50 nm, application d'une nouvelle énergie).

18.7 Méthode de fusion du zinc pour le recyclage des déchets de carbure cémenté
Procédé de zinc dans le recyclage des alliages durs usagés

18.7.1. Principe du processus

La fusion du zinc est un procédé de recyclage physique qui exploite les caractéristiques de réaction à bas point de fusion du zinc (Zn) et du cobalt (Co) liquides dans le carbure cémenté pour séparer le tungstène (W, généralement sous forme de carbure de tungstène WC) et le cobalt par infiltration et volatilisation. Le zinc fond à haute température (900-1000 °C), s'infiltre dans la microstructure du carbure cémenté et forme une phase liquide Zn-Co avec le Co, tandis que le WC reste à l'état solide grâce à son point de fusion élevé (2870 °C) et sa stabilité chimique. Le zinc est ensuite éliminé par distillation sous vide pour séparer le WC et le Co et ainsi assurer un recyclage efficace.

Réactions et mécanismes de base
Phase d'infiltration
Le zinc liquide pénètre dans les pores et les joints de grains du carbure cémenté et dissout le Co.
Phase de séparation
La phase liquide Zn-Co s'est séparée de la matrice WC et les particules de WC sont restées intactes.
Étape de volatilisation
Le zinc est éliminé par volatilisation à 1000-1100°C sous vide.
Notions de base sur la thermodynamique
^{4} Pa à 1000°C, garantissant que la séparation par volatilisation est réalisable.

Propriétés chimiques et physiques
Le bas point de fusion (419,5 °C) et la forte volatilité du Zn sont essentiels au processus.
La grande stabilité du WC (insoluble dans le zinc) assure son intégrité structurelle.

18.7. 2. Étapes de fonctionnement

Le processus de fusion du zinc comprend cinq étapes : prétraitement, imprégnation de fusion du zinc, séparation par volatilisation du zinc, purification du produit et post-traitement.

18.7.2.1 Prétraitement des déchets

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Objectif : Éliminer les taches d'huile, les couches d'oxyde et optimiser la taille des particules de déchets.
équipement:
Machine de nettoyage à ultrasons : type Branson 8800 (puissance 500 W, fréquence 40 kHz).
Concasseur à mâchoires : tel que Retsch BB 50 (taille de broyage 5-20 mm).
Tamis vibrant : tel que Russell Finex Compact Sieve (tamis 2-5 mm).
méthode:
Un nettoyage par ultrasons avec de l'acétone pendant 30 minutes a été effectué pour éliminer les taches d'huile.
Concassé à 5-20 mm, tamisé pour éliminer la matrice d'acier.
Données expérimentales : Après le nettoyage, les impuretés sont réduites de 90 % et la teneur en tungstène est augmentée à 70-95 % en poids.

18.7.2.2 Imprégnation de zinc fondu

Équipement :
Four à induction sous vide : tel que Inductotherm VIP-I-50 (puissance 50 kW, capacité 50 kg).
Creuset en graphite : type Morgan Advanced Materials (résistance en température 1500°C).
Paramètres du processus :
Rapport zinc/déchet : 1:1 à 2:1.
Température : 900-1000°C.
Atmosphère : Ar (pureté 99,999%, débit 10-20 L/min).
Temps d'isolation : 1 à 3 h.
Procédé : Les déchets et le bloc de zinc sont placés dans un creuset et chauffés à 950°C, et le zinc s'infiltre et dissout le Co.
Données expérimentales : Taux de dissolution du Co 92 % (teneur en Co 8 % en poids, temps d'isolation 2 h).

18.7.2.3 Séparation par volatilisation du zinc

Équipement :
Technologies du vide VIM-5 (degré de vide 10^{-3} Pa, capacité 100 kg).
Condenseur : Tube condenseur en acier inoxydable (température de l'eau de refroidissement 20°C).
Paramètres du processus :
Température : 1050°C.
Degré de vide : 10^{-2} Pa .
Durée : 3 h.
Procédé : Le zinc s'évapore en vapeur et est condensé et récupéré, laissant un mélange WC-Co.
Données expérimentales : Taux de volatilisation du zinc 98 %, Zn résiduel < 0,3 % en poids.

18.7.2.4 Séparation et purification des produits
Équipement :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Tamis vibrant : tel que Sweco Vibro-Energy (maille 10-50 μm).
Séparateur magnétique : tel que le séparateur à tambour humide Eriez (intensité du champ magnétique 2000 Gs).
Cuve de décapage : cuve en acier inoxydable (capacité 50 L).
méthode:
Le tamisage sépare le WC (>10 μm) et le Co (<10 μm).
Séparation magnétique pour extraire le Co.
Le Co résiduel a été éliminé par lavage acide avec 15 % en poids de HCl (50 °C, 1 h).
Données expérimentales :
Pureté du WC : 98,5 % en poids.
Pureté du cobalt : 93 % en poids, contenant 0,2 % en poids de zinc.

18.7.2.5 Post-traitement

Équipement :
Broyeur à boulets planétaire : par exemple Fritsch Pulverisette 5 (300 tr/min, billes de broyage en ZrO_2).
Four tubulaire : par exemple Carbolite Gero STF 15/450 (max. 1500°C).
méthode:
Broyeur à boulets WC jusqu'à 1-5 μm (rapport bille/matériau 10:1, 6 h).
Réduction du Co par H_2 (900°C, débit 15 L/min, 2 h).
Données expérimentales : taille des particules de WC D50 = 3,2 μm, oxyde de Co réduit à < 0,1 % en poids.

18.7. 3. Explication détaillée des paramètres du processus

Vous trouverez ci-dessous une ventilation des paramètres clés et de leur impact :

P aramètre	Valeur typique	Données expérimentales et impact
Ratio de déchets de zinc	1:1 à 2:1	Le taux de récupération du Co est de 85 % à 1:1 et de 95 % à 2:1. Si le ratio est trop élevé (> 3:1), le coût de volatilisation du zinc augmentera de 20 %.
Température de trempage	900-1000°C	À 950°C, le taux de dissolution du Co est de 92%, et à >1000°C, le taux de décomposition du WC augmente à 2% et la pureté chute à 97%.
Température volatile	1000-1100°C	À 1050°C, le taux de volatilisation du zinc est de 98 %, le Zn résiduel augmente à 1 % en poids à <1000°C et la consommation d'énergie augmente de 15 % à >1100°C.
Degré de vide	10^{-1} -10^{-2} Pa	10^{-2} Pa, 0,5 % en poids à 10^{-1} Pa, et le coût de l'équipement augmente de 30 % lorsque < 1 Pa.
Temps d'isolation	1 à 3 h (immersion)	Le taux de récupération du Co était de 90 % à 2 h, est tombé à 70 % à < 1 h et la perte de WC était de 1 à 2 % à > 3 h.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

P aramètre	Valeur typique	Données expérimentales et impact
atmosphère	Ar ou N_2	O_2 < 0,01 % vol., WO_3 < 0,1 % poids, et lorsque O_2 > 0,1 % vol., WO_3 augmente à 1 % poids.

18.7. 4. Liste des équipements

Voici les équipements et spécifications typiques pour le processus de fusion du zinc :

équipement	Exemples de modèles	Spécifications/Caractéristiques	utiliser
Machine de nettoyage à ultrasons	Branson 8800	Puissance 500 W, fréquence 40 kHz	Enlever les taches d'huile
Concasseur à mâchoires	Retsch BB 50	Taille de décharge 5-20 mm	Broyage des déchets
Four à induction sous vide	Inductotherm VIP-I-50	Puissance 50 kW, capacité 50 kg	Trempage du zinc fondu
Four de distillation sous vide	ALD VIM-5	Degré de vide 10^{-3} Pa, capacité 100 kg	Séparation par volatilisation du zinc
Tamis vibrant	Sweco Vibro-Energie	Écran 10-50 μm	Sélection des produits
Séparateur magnétique	Séparateur à tambour humide Eriez	Intensité du champ magnétique 2000 Gs	Séparation du Co
Broyeur à boulets planétaire	Fritsch Pulverisette 5	Vitesse 300 tr/min, capacité 500 ml	Broyage des WC
Four tubulaire	Carbolite Gero STF 15/450	Jusqu'à 1500°C, atmosphère H_2	Réduction du CO

18.7.5. Exemple de données expérimentales

Voici les résultats d'une expérience en laboratoire (2023) traitant 50 kg de déchets de lames WC-Co (Co 8 % en poids) :
Composition des déchets : WC 90 % en poids, Co 8 % en poids, impuretés 2 % en poids.
Conditions du processus :
Rapport zinc/déchet : 1,5:1.
Immersion : 950 °C, atmosphère Ar, 2 h.
Volatilisation : 1050°C, 10^{-2} Pa , 3 h.
Résultats de récupération :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

WC : 47,5 kg, pureté 98,5 % en poids, granulométrie D50 = 5 µm (3,2 µm après broyage à boulets).
Co : 3,6 kg, pureté 93 % en poids, Zn résiduel 0,2 % en poids.
Zn : 72 kg récupérés (taux de volatilisation 96%).
Coût : Coût total 500 $ (environ 10 $/kg), consommation d'énergie 150 kWh.

18.7.6. Analyse des avantages et des inconvénients

Avantage
Protection de l'environnement : pas de liquide résiduaire acide ou alcalin, le gaz résiduaire n'est que de la vapeur de zinc (qui peut être condensée et récupérée).
Taux de récupération élevé : WC 98 %, Co 90 %, meilleur que la méthode de dissolution acide (WC 95 %, Co 80 %).
Rétention structurelle : les grains WC sont intacts et conviennent aux applications haut de gamme.
Recyclage du zinc : taux de récupération > 95 %, réduction des coûts 10-15 %.
défaut
Consommation énergétique élevée : 150-200 kWh/50 kg, soit 50 % de plus que la méthode de dissolution acide (100 kWh).
Résidu de zinc : 0,1-0,5 % en poids, nécessite un post-traitement.
Coût de l'équipement : L'investissement pour un four à vide est d'environ 50 000 à 100 000 $.

18.7. 7. Comparaison avec d'autres méthodes de recyclage

Méthode	Méthode de fusion du zinc	Méthode de dissolution acide	Méthode de torréfaction par oxydation
principe	Séparation par perméation du zinc	Co dissous dans l'acide	Décomposition par oxydation à haute température
Taux de récupération	WC 98 %, Co 90 %	WC 95 %, Co 80 %	WC 90 %, Co 85 %
Protection de l'environnement	Liquide élevé, sans gaspillage	Faible contamination acide	Au cours du processus, les gaz résiduaires doivent être traités
Consommation d'énergie	150-200 kWh/50 kg	100 kWh/50 kg	120 kWh/50 kg
coût	10-15 $/kg	8-12 $/kg	12-18 $/kg
produit	Poudre WC, poudre Co	Poudre de WC, solution de sel de cobalt	WO_3 , CoO
applicabilité	Déchets WC-Co	Divers carbures cémentés	Déchets à haute teneur en impuretés

18.7.8. Facteurs d'influence

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Composition des déchets : Lorsque Co > 10 % en poids, le taux de récupération augmente à 95 % et la teneur en TiC diminue à 85 %.
Taille des particules : 10-20 mm est optimale, < 5 mm s'agglomère, > 20 mm pénètre lentement.
Oxydation : lorsque WO_3 > 1 % en poids, le taux de récupération chute de 10 %.
Fluctuation de température : ±50°C entraîne une augmentation de 0,2 % en poids des résidus de zinc.

18.7.9. Produits et applications recyclés

Poudre WC : pureté 98,5 %, D50 = 3,2 μm, utilisée pour l'impression SLM d'aubes directrices d'aviation (densité 99,2 %).
Poudre de Co : pureté 93 %, utilisée pour le liant en carbure cémenté.
Zn : Pureté 99%, pour applications de recyclage ou métallurgiques.

18.7. 10. Direction de l'optimisation des processus

Fusion du zinc à basse température : En ajoutant du NaCl (1 % en poids), la température chute à 850 °C et la consommation d'énergie est réduite de 20 %.
Continu : Four de distillation continue (capacité 500 kg), rendement augmenté de 30%.
de résidus de zinc : volatilisation à 1100°C, 10^{-3} Pa, Zn < 0,1 % en poids.

18.8 Explication détaillée de la méthode de dissolution acide pour le recyclage des déchets de carbure cémenté

18.8 . 1. Principe du processus

La dissolution acide est un procédé de récupération chimique qui dissout sélectivement la phase liante (comme le cobalt Co) du carbure cémenté par une solution acide (comme l'acide chlorhydrique HCl ou l'acide sulfurique H_2SO_4), séparant ainsi les particules de carbure de tungstène (WC). Le WC est retenu sous forme de résidu solide en raison de sa stabilité chimique (insoluble dans l'acide), tandis que le Co est dissous sous forme de sel soluble (comme $CoCl_2$ ou $CoSO_4$) et récupéré par précipitation ou électrolyse ultérieure. Cette méthode exploite la solubilité acide du Co et la résistance à la corrosion du WC pour réaliser une extraction progressive du tungstène et du cobalt.

Réactions et mécanismes de base
Étape de dissolution : $Co + 2HCl \rightarrow CoCl_2 + H_2\uparrow$ (ou $Co + H_2SO_4 \rightarrow CoSO_4 + H_2\uparrow$).
Étape de séparation : le WC précipite sous forme de résidu insoluble et le Co entre dans la solution sous forme ionique.
Étape de récupération : le Co est extrait par précipitation de neutralisation (comme l'ajout de NaOH pour générer du $Co(OH)_2$) ou par électrolyse.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Base chimique : Le potentiel redox du Co (-0,28 V) le rend facilement dissout par l'acide, tandis que la grande stabilité chimique du WC (solubilité $<10^{-6}$ g/L) garantit qu'il n'est pas détruit.

Support thermodynamique

La faisabilité de la méthode de dissolution acide repose sur la grande solubilité du Co en conditions acides (K_{sp} $Co(OH)_2 \approx 1,6\times10^{-15}$) et sur l'inertie du WC. L'énergie libre de Gibbs de la réaction $\Delta G < 0$ garantit que la réaction se déroule spontanément.

18.8 . 2. Étapes de fonctionnement

Le processus de dissolution acide comprend cinq étapes : prétraitement, lixiviation par dissolution acide, séparation solide-liquide, récupération du cobalt et post-traitement.

18.8.2.1 Prétraitement des déchets

Objectif : Éliminer les impuretés de surface et augmenter la surface de réaction.
équipement:
Machine de nettoyage à ultrasons : Branson 8800 (puissance 500 W, fréquence 40 kHz).
Concasseur à mâchoires : Retsch BB 50 (taille de broyage 1-10 mm).
Tamis vibrant : Russell Finex Compact Sieve (maille 1-2 mm).
méthode:
Un nettoyage par ultrasons avec de l'acétone pendant 30 minutes a été effectué pour éliminer les taches d'huile.
Concassé à 1-10 mm, tamisé pour éliminer les impuretés non carbures.
Données expérimentales : les impuretés ont été réduites de 85 % et la teneur en tungstène des déchets a augmenté à 70-90 % en poids.

Lixiviation acide

Équipement :
Réacteur résistant aux acides : Parr 4560 (capacité 50 L, résistance à la température 200°C, acier inoxydable 316).
Agitateur : IKA RW 20 (vitesse 0-2000 tr/min).
Paramètres du processus :
Acide : HCl (concentration 15-20 % en poids) ou H_2SO_4 (20-25 % en poids).
Rapport solide-liquide : 1:5 à 1:10 (g/mL).
Température : 50-80°C.
Vitesse d'agitation : 300-500 tr/min.
Temps de lixiviation : 4-8 h.
Procédé : Les déchets sont ajoutés à la solution acide, chauffés et agités, le Co est dissous dans le Co^{2+} et le WC est précipité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Données expérimentales : Taux de lixiviation du Co 95 % (HCl 20 % en poids, 70 °C, 6 h).

18.8 . 2.3 Séparation solide-liquide

Équipement :
Filtre à vide : entonnoir Büchner (taille des pores de la membrane 1-5 μm).
Centrifugeuse : Eppendorf 5810R (4000 tr/min).
Paramètres du processus :
Pression de filtration : 0,1-0,5 bar.
Temps de centrifugation : 10-20 min.
Procédure : Séparer les solides WC et la solution contenant du Co par filtration ou centrifugation.
Données expérimentales : taux de récupération de WC 96 %, résidu de solution < 0,5 % en poids.

18.8 . 2.4 Récupération du cobalt

Équipement :
Cuve de décantation : cuve en acier inoxydable (capacité 100 L).
Electrolyseur : Appareil d'électrolyse artisanal (électrodes en graphite, densité de courant 100-200 A/m²).
méthode:
Méthode de précipitation : ajouter NaOH (pH 9-10) pour générer $Co(OH)_2$, filtrer et sécher.
Électrolyse : Électrolyser une solution de $CoCl_2$ (tension 2-3 V, 2-4 h) pour déposer du Co métallique.
Données expérimentales :
Méthode de précipitation : taux de récupération de Co 85 %, pureté 90 % en poids.
Électrolyse : taux de récupération de Co 90 %, pureté 95 % en poids.

18.8 . 2.5 Post-traitement

Équipement :
Broyeur à boulets planétaire : Fritsch Pulverisette 5 (vitesse de rotation 300 tr/min).
Four : Memmert UN55 (max. 300°C).
méthode:
Broyeur à boulets WC jusqu'à 1-5 μm (rapport bille/matériau 10:1, 6 h).
Séchage de WC et Co (120°C, 4 h).
Données expérimentales : taille des particules de WC D50 = 2,8 μm, humidité du Co < 0,1 % en poids.

18.8 . 3. Explication détaillée des paramètres du processus

Vous trouverez ci-dessous une ventilation des paramètres clés et de leur impact :

P aramètre	Valeur typique	Données expérimentales et impact
Concentration d'acide	HCl 15-20 % en poids	Le taux de lixiviation du Co est de 90 % à 15 % en poids, de 95 % à 20 % en poids et la consommation d'acide augmente de 20 % lorsque la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

P aramètre	Valeur typique	Données expérimentales et impact
		concentration est > 25 % en poids.
Rapport solide-liquide	1:5 à 1:10	À 1:5, le taux de lixiviation du Co est de 85 %, 1:10 atteint 95 % et > 1:15 le coût du traitement de la solution augmente de 30 %.
Température de lixiviation	50-80°C	Le taux de lixiviation du Co est de 95 % à 70 °C, qui tombe à 70 % à < 50 °C, et le WC est légèrement soluble (0,5 % en poids) à > 80 °C.
Vitesse d'agitation	300-500 tr/min	Le taux de lixiviation est de 94 % à 400 tr/min, chute à 80 % à < 300 tr/min et augmente de 15 % à > 500 tr/min.
Temps de lessivage	4 à 8 heures	Le taux de lixiviation du Co était de 95 % à 6 h, est tombé à 75 % à < 4 h et la perte de WC était de 1 à 2 % à > 8 h.
pH (précipitation du cobalt)	9-10	À pH 9,5, le taux de précipitation du Co est de 90 %, < 9 tombe à 70 % et > 10 la précipitation des impuretés augmente de 5 %.

18.8 . 4. Liste des équipements

Voici les équipements et spécifications typiques pour la dissolution acide :

Équipement	Exemples de modèles	Spécifications/Caractéristiques	utiliser
Machine de nettoyage à ultrasons	Branson 8800	Puissance 500 W, fréquence 40 kHz	Enlever les taches d'huile
Concasseur à mâchoires	Retsch BB 50	Taille de décharge 1-10 mm	Broyage des déchets
Réacteur résistant aux acides	Parr 4560	Capacité 50 L, résistance à la température 200°C	Lixiviation acide
Filtre à vide	Entonnoir Büchner	Taille des pores de la membrane 1-5 μm	Séparation solide-liquide
Centrifuger	Eppendorf 5810R	Vitesse 4000 tr/min	Séparation solide-liquide
Bassin de sédimentation	Cuve en acier inoxydable	Capacité 100 L	Précipitation du cobalt
Électrolyseur	Appareil fait maison	Électrode en graphite, densité de courant 200 A/m²	Électrolyse du cobalt
Broyeur à boulets planétaire	Fritsch Pulverisette 5	Vitesse 300 tr/min, capacité 500 ml	Broyage des WC

18.8 . 5. Exemples de données expérimentales

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Voici les résultats expérimentaux d'un laboratoire (2023) traitant 50 kg de déchets de lames WC-Co (Co 10 % en poids) :
Composition des déchets : WC 88 % en poids, Co 10 % en poids, impuretés 2 % en poids.
Conditions du processus :
Acide : HCl 20 % en poids, rapport solide-liquide 1:8.
Lixiviation : 70 °C, 400 tr/min, 6 h.
Précipitation du cobalt : ajuster le pH à 9,5 avec NaOH.
Résultats de récupération :
WC : 43,5 kg, pureté 98 % en poids, granulométrie D50 = 4 μm (2,8 μm après broyage à boulets).
$Co(OH)_2$: 4,8 kg, pureté 90 % en poids, teneur en eau 1 % en poids.
Coût : Coût total 400 $ (environ 8 $/kg), consommation d'énergie 100 kWh.

18.8 . 6. Analyse des avantages et des inconvénients

Avantage
Faible coût : 8 à 12 $ par kg, inférieur à la méthode de fusion du zinc (10 à 15 $).
Équipement simple : aucun système de vide requis, l'investissement est d'environ 20 000 à 50 000 $.
Taux de récupération élevé : WC 95 %, Co 80-90 %.
Large applicabilité : peut traiter des carbures cémentés complexes contenant du TiC et du TaC.
défaut
Mauvaise protection de l'environnement : des déchets liquides acides sont générés (environ 5 à 10 L par kg de déchets) et le coût de traitement est de 50 à 100 $/tonne.
Perte mineure de WC : la dissolution acide peut entraîner une perte de WC de 0,5 à 2 % en poids.
Temps de traitement long : le temps de traitement total est de 12 à 16 heures, ce qui est moins efficace que la méthode de fusion du zinc (6 à 8 heures).

18.8 . 7. Comparaison avec d'autres méthodes de recyclage

M é thode	Méthode de dissolution acide	Méthode de fusion du zinc	Méthode de torréfaction par oxydation
principe	Co dissous dans l'acide	Séparation par perméation du zinc	Décomposition par oxydation à haute température
Taux de récupération	WC 95 %, Co 80-90 %	WC 98 %, Co 90 %	WC 90 %, Co 85 %
Protection de l'environnement	Faible contamination acide	Liquide élevé, sans gaspillage	Au cours du processus, les gaz résiduaires doivent être traités
Consommation d'énergie	100 kWh/50 kg	150-200 kWh/50 kg	120 kWh/50 kg

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

M é thode	Méthode de dissolution acide	Méthode de fusion du zinc	Méthode de torréfaction par oxydation
coût	8-12 $/kg	10-15 $/kg	12-18 $/kg
produit	Poudre de WC, solution de sel de cobalt	Poudre WC, poudre Co	WO_3 , CoO
applicabilité	Divers carbures cémentés	Déchets WC-Co	Déchets à haute teneur en impuretés

18.8.8. Facteurs d'influence

Composition des déchets : Le taux de lixiviation augmente à 95 % lorsque Co > 10 % en poids et diminue à 85 % lorsque la teneur en TiC est élevée (> 5 % en poids).
Taille des particules : 1 à 5 mm est optimale, > 10 mm le taux de lixiviation diminue de 10 %.
Concentration acide : > 25 % en poids, la perte de WC augmente à 2 % en poids.
Température : >80°C WC légèrement soluble augmente de 1 à 2 %.

18.8.9. Produits et applications recyclés

Poudre WC : pureté 98%, D50 = 2,8 µm, utilisée pour la projection thermique ou AM pour préparer des pièces aéronautiques.
$Co(OH)_2$/Co : pureté 90-95 %, utilisé pour les matériaux de batterie ou les liants en carbure cémenté.

18.8. 10. Direction de l'optimisation des processus

Circulation des liquides résiduaires : le HCl est régénéré après neutralisation acide et la quantité de liquides résiduaires est réduite de 50 %.
Lixiviation à basse température : en ajoutant un oxydant (tel que H_2O_2, 1 % en poids) à 50 °C, le taux de lixiviation du Co a augmenté à 97 %.
Séparation rapide : filtration haute pression (1 bar), temps de séparation 30% plus court.

18.9 Procédé de torréfaction du sel pour la récupération des déchets de tungstène

18.9.1 . Principe du processus

Na_2CO_3 ou NaCl) à haute température pour convertir le carbure de tungstène (WC) et le cobalt de la phase de liaison (Co) en tungstate soluble (tel que Na_2WO_4) et en oxyde (tel que CoO), respectivement. Le tungstate est ensuite extrait par lixiviation à l'eau, et le CoO restant est récupéré par dissolution acide ou réduction. Cette méthode exploite les caractéristiques du WC réagissant avec les sels pour former des composés solubles en conditions oxydantes, ainsi que la tendance à l'oxydation du Co, pour réaliser la séparation du tungstène et du cobalt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Réactions et mécanismes de base

Étape de calcination : $WC + Na_2CO_3 + O_2 \rightarrow Na_2WO_4 + CO_2 \uparrow$, $Co + O_2 \rightarrow CoO$.

Étape d'immersion dans l'eau : Na_2WO_4 se dissout dans l'eau et CoO précipite sous forme de résidu insoluble.

Étape de séparation : La filtration sépare la solution contenant du tungstène et le résidu de CoO, le tungstate précipite sous forme de WO_3 et le CoO est récupéré par dissolution acide ou réduction.

Base chimique : WC réagit avec Na_2CO_3 dans un environnement oxydant à haute température pour former Na_2WO_4 (solubilité 74 g / 100 mL, 20°C), et CoO est insoluble dans l'eau (solubilité $<10^{-5}$ g /L).

Support thermodynamique

L'énergie libre de Gibbs de la réaction $\Delta G < 0$, par exemple $WC + Na_2CO_3 + 2O_2 \rightarrow Na_2WO_4 + CO_2$, présente un ΔG d'environ -150 kJ/mol à 800 °C, ce qui assure la spontanéité de la réaction. La réaction d'oxydation du Co ($Co + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CoO$) est également thermodynamiquement favorable à haute température.

18.9 . 2. Étapes de fonctionnement

Le processus de torréfaction du sel comprend cinq étapes : prétraitement, torréfaction du sel, extraction de l'eau, séparation et purification du produit et post-traitement.

18.9.2.1 Prétraitement des déchets

Objectif : Éliminer les impuretés et optimiser la taille des particules pour améliorer l'efficacité de la torréfaction.

Équipement :

Machine de nettoyage à ultrasons : Branson 8800 (puissance 500 W, fréquence 40 kHz).

Concasseur à mâchoires : Retsch BB 50 (taille de concassage 1-10 mm).

Tamis vibrant : Russell Finex Compact Sieve (maille 1-2 mm).

M é thode :

Un nettoyage par ultrasons avec de l'acétone pendant 30 minutes a été effectué pour éliminer les taches d'huile.

Concassé à 1-10 mm, tamisé pour éliminer les impuretés non carbures.

Données expérimentales : Après nettoyage, les impuretés sont réduites de 90 % et la teneur en tungstène est augmentée à 70-90 % en poids.

18.9.2.2 Torréfaction au sel

Équipement :

Four rotatif : Four rotatif artisanal (résistance température 1000°C, vitesse 1-5 tr/min, capacité 50 kg).

Four à moufle : Nabertherm HT 16/17 (max. 1700°C, capacité 16 L, petite réserve de torréfaction).

Paramètres du processus :

Type et rapport de sel : Na_2CO_3, rapport de masse des déchets à la masse du sel de 1:1 à 1:1,5.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Température : 700-900°C.
Atmosphère : air ou O_2 (débit 10-20 L/min).
Durée : 2-3 h.
Procédé : Les déchets sont mélangés avec du Na_2CO_3 et calcinés dans un four rotatif. Le WC est converti en Na_2WO_4 et le Co est oxydé en CoO.
Données expérimentales : Taux de conversion du tungstène 92 % (Na_2CO_3 1 : 1,2, 850 °C, 2,5 h).

18.9.2.3 Extraction d'eau

Équipement :
Cuve d'immersion d'eau : cuve en acier inoxydable (capacité 100 L, avec agitateur).
Filtre à vide : entonnoir Büchner (taille des pores de la membrane 1-5 μm).
Paramètres du processus :
Rapport solide-liquide : 1:10 (g/mL).
Température : 50-70°C.
Vitesse d'agitation : 200-300 tr/min.
Durée : 1-2 h.
Procédé : Le produit torréfié est lixivié avec de l'eau, Na_2WO_4 est dissous, CoO est précipité, puis filtré et séparé.
Données expérimentales : taux d'extraction de Na_2WO_4 95 %, taux de récupération des résidus de CoO 90 %.

18.9.2.4 Séparation et purification des produits

Équipement :
Cuve de décantation : cuve en acier inoxydable (capacité 50 L).
Cuve de dissolution d'acide : Cuve en acier inoxydable résistant aux acides (capacité 50 L).
méthode :
Récupération du tungstène : Ajouter HCl (pH 2-3) à la solution contenant Na_2WO_4, précipiter WO_3, filtrer et sécher.
Récupération du cobalt : CoO a été dissous dans H_2SO_4 (20 % en poids, 50 °C, 2 h) pour former $CoSO_4$, et NaOH (pH 9-10) a été ajouté pour précipiter $Co(OH)_2$.
Données expérimentales :
WO_3 : pureté 95 % en poids, rendement 90 %.
$Co(OH)_2$: pureté 85 % en poids, rendement 85 %.

18.9.2.5 Post -traitement

Équipement :
Four tubulaire : Carbolite Gero STF 15/450 (max. 1500°C, atmosphère H_2).
Four : Memmert UN55 (max. 300°C).
M é thode :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Le WO_3 est réduit dans une atmosphère H_2 (800-1000°C, 2-3 h) pour générer de la poudre W.
$Co(OH)_2$ est séché (120°C, 4 h) et éventuellement réduit en poudre de Co.
Données expérimentales : granulométrie de poudre W D50 = 5 µm, pureté 98 % en poids ; pureté de poudre Co 90 % en poids.

18.9 . 3. Explication détaillée des paramètres du processus

Vous trouverez ci-dessous une ventilation des paramètres clés et de leur impact :

P ramètre	Valeur typique	Données expérimentales et impact
Rapport sel/déchets	1:1 à 1:1,5	À 1:1,2, le taux de conversion du tungstène est de 92 %, <1:1 tombe à 80 %, >1:1,5, la consommation de sel augmente de 20 %
Température de calcination	700-900°C	Le taux de conversion est de 92 % à 850 °C, qui chute à 70 % à < 700 °C et augmente de 15 % à > 900 °C, et le CoO s'agglomère.
atmosphère	O_2 10-20 L/min	L'O_2 était de 15 L/min et chutait à 85 % lorsque < 10 L/min. Aucune amélioration significative n'a été observée avec un excès d'O_2.
Temps de torréfaction	2-3 heures	Le taux de conversion était de 92 % à 2,5 h, est tombé à 75 % à < 2 h et a augmenté de 10 % à > 3 h, sans amélioration significative.
Température d'immersion dans l'eau	50-70°C	À 60°C, le taux d'extraction de Na_2WO_4 est de 95 %, <50°C tombe à 85 %, >70°C la consommation d'énergie augmente de 10 %
Rapport solide-liquide	1:10	Le taux d'extraction est de 95 % à 1:10, <1:5 tombe à 80 %, >1:15 les coûts de traitement des eaux usées augmentent de 25 %

18.9 . 4. Liste des équipements

Voici les équipements et spécifications typiques pour la torréfaction du sel :

Équipement	Exemples de modèles	Spécifications/Caractéristiques	utiliser
Machine de nettoyage à ultrasons	Branson 8800	Puissance 500 W, fréquence 40 kHz	Enlever les taches d'huile
Concasseur à mâchoires	Retsch BB 50	Taille de décharge 1-10 mm	Broyage des déchets
four rotatif	Four rotatif fait maison	Résistance à la température 1000°C, vitesse 1-5 tr/min, 50 kg	Torréfaction au sel
Cuve d'immersion dans l'eau	Cuve en acier inoxydable	Capacité 100 L, avec agitateur	Extraction d'eau

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Équipement	Exemples de modèles	Spécifications/Caractéristiques	utiliser
Filtre à vide	Entonnoir Büchner	Taille des pores de la membrane 1-5 μm	Séparation solide-liquide
Bassin de sédimentation	Cuve en acier inoxydable	Capacité 50 L	Précipitation de tungstène
Réservoir de dissolution d'acide	Cuve en acier inoxydable résistant aux acides	Capacité 50 L	Dissolution du cobalt
Four tubulaire	Carbolite Gero STF 15/450	Jusqu'à 1500°C, atmosphère H_2	Réduction de WO_3

18.9 . 5. Exemples de données expérimentales

Voici les résultats expérimentaux d'un laboratoire (2023) traitant 50 kg de déchets de lames WC-Co (Co 10 % en poids) :

Composition des déchets : WC 88 % en poids, Co 10 % en poids, impuretés 2 % en poids.

Conditions du procédé :

Grillage au sel : Na_2CO_3 1 : 1,2 , 850°C, O_2 15 L/min, 2,5 h.

Immersion dans l'eau : 60°C, rapport solide-liquide 1:10, 1,5 h.

Précipitation du tungstène : HCl ajusté à pH 2,5 ; Récupération du cobalt : H_2SO_4 20 % en poids, NaOH ajusté à pH 9,5.

Résultats de récupération :

Na_2WO_4 : 45 kg, rendement en tungstène 90 %, pureté WO_3 95 % en poids (poudre W après réduction 98 % en poids, D50 = 5 μm).

$Co(OH)_2$: 4 kg, pureté 85 % en poids, rendement 85 %.

18.9 . 6. Analyse des avantages et des inconvénients

Avantage

Forte applicabilité : convient aux déchets de faible qualité ou impurs (tels que TiC, TaC).

Le produit est facile à purifier : Na_2 WO_4 peut être directement utilisé dans la production de produits chimiques à base de tungstène.

Technologie mature : Elle est largement utilisée dans la fusion du minerai de tungstène et la technologie est fiable.

défaut

Consommation élevée de sel : 1 à 1,5 kg de Na_2CO_3 sont nécessaires pour chaque kg de déchets, ce qui augmente les coûts.

Les eaux usées sont complexes : les eaux usées salées (5 à 10 L/kg) après une inondation doivent être traitées, ce qui coûte environ 50 $/tonne.

Le taux de récupération est faible : 90 % pour le tungstène et 85 % pour le cobalt, ce qui est inférieur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

à la méthode de fusion du zinc.

18.9 . 7. Facteurs d'influence

Composition des déchets : Lorsque Co > 10 % en poids, l'efficacité de la torréfaction augmente et TiC > 5 % en poids réduit le taux de conversion du tungstène à 85 %.
Taille des particules : 1 à 5 mm est optimale, > 10 mm le taux de conversion chute de 10 %.
Rapport de sel : Lorsque <1:1, le taux de conversion tombe à 80 %, ce qui affecte l'extraction du tungstène.
Température : >900°C Le CoO s'agglomère, réduisant le taux de récupération ultérieur.
Humidité : Une teneur en humidité des déchets > 5 % en poids affecte l'uniformité de la torréfaction et réduit le taux de conversion de 5 %.

18.9.8 . Produits et applications recyclés

Produits de recyclage
Na_2WO_4 :
Caractéristiques : Pureté 90 % en poids, sel soluble dans l'eau.
Application : Préparation d'acide tungstique, de WO_3 ou de poudre de tungstène.

Poudre WO_3 / W :
Caractéristiques : pureté WO_3 95 % poids, après réduction poudre W D50 = 5 μm, pureté 98 % poids.
Applications : Projection thermique, fabrication additive (ex : buses aéronautiques).

$Co(OH)_2$ /Co :
Caractéristiques : Pureté 85 % en poids, réduction facultative en poudre de Co (90 % en poids).
Application : matériaux de batterie, liants en carbure cémenté.

Vérification de la qualité
WO_3 : La DRX a été utilisée pour détecter la phase cristalline et l'ICP-AES a été utilisée pour mesurer la pureté (± 0,1 % en poids).
Co : surface BET (2-5 m^2/g), titrage chimique pour vérifier la teneur.

18.9 . 9. Orientations d'optimisation et d'amélioration des processus

Procédé de faible consommation de sel : optimisez le rapport sel à 1:0,8, réduisez la consommation de sel de 20 % et obtenez toujours un taux de conversion de 88 %.
Zéro rejet d'eaux usées : L'extrait d'eau est recyclé et le Na_2CO_3 est récupéré par évaporation et concentration, réduisant ainsi la quantité d'eaux usées de 50 %.
Améliorer le taux de récupération du Co : Après dissolution acide, l'électrolyse du $CoSO_4$ (densité de courant 200 A/m^2) a augmenté le taux de récupération à 90 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Torréfaction à basse température : En ajoutant des additifs (tels que NaCl, 5 % en poids), la température de torréfaction est réduite à 700 °C et la consommation d'énergie est réduite de 15 %.

18.9 . 10. Contexte de l'application industrielle

La calcination au sel est largement utilisée dans le traitement des déchets de tungstène de faible qualité ou complexes. Par exemple, la poudre de tungstène recyclée peut être utilisée pour l'impression SLM de buses d'avions (densité 98,5 %) après sphéroïdisation plasma (D50 = 15-30 μm, $\psi > 0,95$), et son coût est inférieur de 15 $/kg à celui de la poudre d'origine (50 $/kg). Son produit Na_2WO_4 convient également à l'industrie chimique du tungstène, notamment pour la préparation de fils ou d'alliages de tungstène.

La méthode de grillage au sel permet de séparer le tungstène et le cobalt des déchets de carbure cémenté par réaction saline à haute température et extraction d'eau. Elle convient également au recyclage des déchets de faible qualité. Ses principaux avantages résident dans sa grande applicabilité et la facilité de purification du produit. Cependant, la forte consommation de sel et la complexité du traitement des eaux usées constituent les principaux défis. En optimisant le ratio de sel et la circulation des eaux usées, la méthode de grillage au sel peut améliorer encore ses performances économiques et environnementales, et offre de vastes perspectives d'application dans les domaines de l'aérospatiale et de la chimie du tungstène.

18.10 Méthode de grillage par oxydation pour le recyclage des déchets de carbure cémenté (Procédé de torréfaction par oxydation)

18.10 . 1. Principe du processus

Le grillage par oxydation est un procédé de recyclage combinant oxydation à haute température et purification chimique. En grillant des déchets de carbure cémenté à haute température, sous atmosphère d'oxygène ou d'air, le carbure de tungstène (WC) est oxydé en trioxyde de tungstène (WO_3), et le cobalt (Co) de la phase de liaison est converti en oxyde de cobalt (CoO). Le tungstène et le cobalt sont ensuite purifiés par dissolution acide ou alcaline. Cette méthode exploite l'activité chimique du WC et du Co dans des conditions d'oxydation pour séparer le carbone et le métal en oxydes, qui sont ensuite recyclés par un traitement ultérieur.

Réactions et mécanismes de base

Étape de calcination : $WC + 2O_2 \rightarrow WO_3 + CO_2 \uparrow$, $2Co + O_2 \rightarrow 2CoO$.

Étape de purification : WO_3 est dissous avec NaOH en Na_2WO_4 ou directement réduit en poudre W, et CoO est dissous avec de l'acide en sel Co^{2+}.

Étape de séparation : Filtration ou précipitation pour séparer les produits de tungstène et de cobalt.

$_3$ (faible volatilité, point de fusion 1473°C) à haute température, et CoO est insoluble dans les alcalis (solubilité $<10^{-5}$ g/L), ce qui le rend facile à séparer.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Support thermodynamique

La réaction d'énergie libre de Gibbs $\Delta G < 0$, par exemple, $WC + 2O_2 \rightarrow WO_3 + CO_2$ à 900°C a $\Delta G \approx -300$ kJ/mol, et la réaction d'oxydation de Co ($2Co + O_2 \rightarrow 2CoO$) a $\Delta G \approx -200$ kJ/mol, assurant la spontanéité de la réaction.

18.10 . 2. Étapes de l'opération

Le processus de la méthode de grillage par oxydation comprend cinq étapes : prétraitement, grillage par oxydation, purification par dissolution acide, séparation et purification du produit et post-traitement.

18.10 . 2.1 Prétraitement des déchets

Objectif : Éliminer les impuretés et optimiser la taille des particules pour améliorer l'efficacité de l'oxydation.

équipement:

Machine de nettoyage à ultrasons : Branson 8800 (puissance 500 W, fréquence 40 kHz).

Concasseur à mâchoires : Retsch BB 50 (taille de broyage 1-10 mm).

Tamis vibrant : Russell Finex Compact Sieve (maille 1-2 mm).

méthode:

Un nettoyage par ultrasons avec de l'acétone pendant 30 minutes a été effectué pour éliminer les taches d'huile.

Concassé à 1-10 mm, tamisé pour éliminer les impuretés non carbures.

Données expérimentales : les impuretés ont été réduites de 85 % et la teneur en tungstène a été augmentée à 70-90 % en poids.

18.10.2.2 Grillage oxydatif

Équipement :

Four à moufle : Nabertherm HT 16/17 (max. 1700°C, capacité 16 L).

Four rotatif : Four rotatif artisanal (résistance à la température 1000°C, vitesse 1-5 tr/min, capacité 50 kg, grande échelle).

Paramètres du processus :

Température : 800-1000°C.

Atmosphère : air ou O_2 (débit 10-20 L/min).

Durée : 2 à 4 heures.

Procédé : Les déchets sont placés dans un four à moufle ou un four rotatif et calcinés dans une atmosphère d'oxygène. Le WC est converti en WO_3 et le Co est oxydé en CoO.

Données expérimentales : Taux d'oxydation du tungstène 95 % (900 °C, O_2 15 L/min, 3 h).

18.10 . 2.3 Purification acide

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Équipement :
Réacteur résistant aux acides : Parr 4560 (capacité 50 L, résistance à la température 200°C, acier inoxydable 316).
Filtre à vide : entonnoir Büchner (taille des pores de la membrane 1-5 μm).
Paramètres du processus :
Acide : H_2SO_4 (20 % en poids) ou HCl (15 % en poids).
Rapport solide-liquide : 1:5-1:10 (g/mL).
Température : 50-70°C.
Vitesse d'agitation : 200-300 tr/min.
Durée : 2-3 h.
Procédé : Le produit grillé est lixivié avec de l'acide, CoO est dissous dans $CoSO_4$ ou $CoCl_2$, WO_3 est précipité et séparé par filtration.
Données expérimentales : taux de lixiviation du Co 90 %, taux de récupération des résidus WO_3 95 %.

18.10.2.4 Séparation et purification des produits

Équipement :
Cuve de décantation : cuve en acier inoxydable (capacité 50 L).
Four tubulaire : Carbolite Gero STF 15/450 (jusqu'à 1500°C).
méthode:
Récupération du tungstène : WO_3 est réduit avec H_2 (800-1000°C, 2-3 h) pour produire de la poudre W, ou dissous avec NaOH (10 % en poids, 70°C) pour former Na_2WO_4.
Récupération du cobalt : ajouter de la NaOH (pH 9-10) à la solution contenant du Co pour précipiter le $Co(OH)_2$, filtrer et sécher.
Données expérimentales :
Poudre W : pureté 98 % en poids, rendement 90 %.
$Co(OH)_2$: pureté 85 % en poids, rendement 85 %.

18.10 . 2.5 Post-traitement

Équipement :
Broyeur à boulets planétaire : Fritsch Pulverisette 5 (vitesse de rotation 300 tr/min).
Four : Memmert UN55 (max. 300°C).
méthode:
Broyeur à boulets W poudre à 1-5 μm (rapport billes/poudre 10:1, 6 h).
$Co(OH)_2$ est séché (120°C, 4 h) et éventuellement réduit en poudre de Co.
Données expérimentales : taille des particules de poudre W D50 = 4 μm, pureté de la poudre Co 90 % en poids.

18.10 . 3. Explication détaillée des paramètres du processus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Vous trouverez ci-dessous une ventilation des paramètres clés et de leur impact :

P aramètre	Valeur typique	Données expérimentales et impact
Température de calcination	800-1000°C	Le taux d'oxydation est de 95 % à 900 °C, chute à 80 % à < 800 °C et augmente de 5 % à > 1 000 °C.
atmosphère	O_2 10-20 L/min	Le taux d'oxydation est de 95 % lorsque le débit d'O_2 est de 15 L/min, et tombe à 85 % lorsqu'il est inférieur à 10 L/min. Il n'y a pas d'amélioration significative lorsque le débit est trop élevé.
Temps de torréfaction	2 à 4 heures	Le taux d'oxydation était de 95 % à 3 h, est tombé à 75 % à < 2 h et a augmenté de 15 % à > 4 h, sans amélioration significative.
Concentration d'acide	H_2SO_4 20 % en poids	À 20 % en poids, le taux de lixiviation du Co est de 90 %, < 15 % en poids tombe à 70 %, > 25 % en poids WO_3 se dissout légèrement et augmente de 1 %
Température de décapage	50-70°C	À 60°C, le taux de lixiviation du Co est de 90%, <50°C il tombe à 75%, >70°C la consommation d'énergie augmente de 10%
Rapport solide-liquide	1:5-1:10	Lorsque le ratio est de 1:8, le taux de lixiviation est de 90 %, <1:5 tombe à 80 %, >1:10, le coût de traitement des liquides résiduaires augmente de 20 %.

18.10 . 4. Liste du matériel

Voici les équipements et spécifications typiques pour la torréfaction par oxydation :

Équipement	Exemples de modèles	Spécifications/Caractéristiques	utiliser
Machine de nettoyage à ultrasons	Branson 8800	Puissance 500 W, fréquence 40 kHz	Enlever les taches d'huile
Concasseur à mâchoires	Retsch BB 50	Taille de décharge 1-10 mm	Broyage des déchets
Four à moufle	Nabertherm HT 16/17	Max. 1700°C, Capacité 16 L	Grillage par oxydation
four rotatif	Four rotatif fait maison	Résistance à la température 1000°C, vitesse 1-5 tr/min, 50 kg	Torréfaction à grande échelle
Réacteur résistant aux acides	Parr 4560	Capacité 50 L, résistance à la température 200°C	Purification acide
Filtre à vide	Entonnoir Büchner	Taille des pores de la membrane 1-5 µm	Séparation solide-liquide
Four tubulaire	Carbolite Gero STF 15/450	Jusqu'à 1500°C, atmosphère H_2	Réduction de WO_3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Équipement	Exemples de modèles	Spécifications/Caractéristiques	utiliser
Broyeur à boulets planétaire	Fritsch Pulverisette 5	Vitesse 300 tr/min, capacité 500 ml	Broyage de poudre W

18.10 . 5. Exemples de données expérimentales

Voici les résultats d'une expérience en laboratoire (2023) traitant 50 kg de déchets de lames WC-Co (Co 8 % en poids) :
Composition des déchets : WC 90 % en poids, Co 8 % en poids, impuretés 2 % en poids.
Conditions du processus :
Calcination : 900°C, O_2 15 L/min, 3 h.
Dissolution acide : H_2SO_4 20 % en poids, 60 °C, rapport solide-liquide 1:8, 2,5 h.
Précipitation du cobalt : NaOH ajusté à pH 9,5 ; réduction du tungstène : H_2, 900°C, 2 h.
Résultats de récupération :
WO_3 : 48 kg, pureté 95 % en poids, rendement en poudre W 90 % (pureté 98 % en poids, D50 = 4 μm).
$Co(OH)_2$: 3,5 kg, pureté 85 % en poids, rendement 85 %.

18.10 . 6. Analyse des avantages et des inconvénients
Avantage
Forte capacité de traitement des impuretés : convient aux déchets complexes contenant du TiC, du TaC, etc.
Technologie mature : largement utilisée dans la fusion du minerai de tungstène, avec une technologie fiable.
Produits divers : on peut obtenir de la poudre de WO_3 ou de W, avec une grande flexibilité.
défaut
Émissions de gaz résiduaires : le CO_2 et des traces de WO_3 se volatilisent et doivent être traités, ce qui coûte environ 20 $/tonne.
Dommages causés par les cristaux WC : la structure d'origine ne peut pas être préservée, ce qui limite les applications haut de gamme.
La consommation énergétique est relativement élevée : 120 kWh/50 kg, ce qui se situe entre la méthode de dissolution acide et la méthode de fusion du zinc.

18.10 . 7. Facteurs d'influence
Composition des déchets : Co > 10 % en poids augmente le taux d'oxydation, TiC > 5 % en poids réduit l'efficacité à 85 %.
Taille des particules : 1 à 5 mm est optimale, > 10 mm le taux d'oxydation diminue de 10 %.
Température : >1000°C La volatilisation du WO_3 augmente jusqu'à 5 %, réduisant le taux de récupération.
Concentration en oxygène : <10 L/min L'oxydation est incomplète et le taux de conversion chute de 15 %.
Temps de calcination : < 2 h signifie une oxydation insuffisante, > 4 h signifie un gaspillage d'énergie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

18.10 . 8. Produits et applications recyclés

Produits de recyclage
WO_3 :
Caractéristiques : Pureté 95 % en poids, poudre jaune.
Application : Préparation de poudre de tungstène ou produits chimiques à base de tungstène.
Poudre W :
Caractéristiques : Pureté 98 % en poids, D50 = 4 μm.
Applications : Fabrication additive (ex : buses aéronautiques), projection thermique.
$Co(OH)_2$ /Co:
Caractéristiques : Pureté 85 % en poids, réduction facultative en poudre de Co (90 % en poids).
Application : matériaux de batterie, liants en carbure cémenté.
Vérification de la qualité
WO_3 : La DRX a été utilisée pour détecter la phase cristalline et l'ICP-AES a été utilisée pour mesurer la pureté (± 0,1 % en poids).
Poudre W : morphologie MEB, surface spécifique BET (2-4 m^2/g).

18.10 . 9. Orientations d'optimisation et d'amélioration des processus

G comme récupération : les dispositifs de capture du CO_2 (comme l'absorption d'amines) peuvent réduire les émissions de 80 %.
Torréfaction à basse température : en ajoutant des additifs (tels que NaCl, 5 % en poids), la température est réduite à 700 °C et la consommation d'énergie est réduite de 20 %.
Améliorer la pureté du WO_3 : Lavage acide secondaire (HCl 10 % en poids), la pureté est augmentée à 98 %.
Production continue : Four rotatif modernisé (capacité 500 kg/lot), efficacité augmentée de 30 %.

18.10. 10. Contexte de l'application industrielle

La grillage par oxydation est adapté aux déchets complexes ou à forte teneur en impuretés issus du recyclage des déchets de tungstène. Par exemple, la poudre W recyclée peut être utilisée pour l'impression SLM d'aubes directrices d'avions (densité 98,5 %) après sphéroïdisation plasma (D50 = 15-30 μm, $\psi > 0,95$), et son coût est inférieur de 12 $/kg à celui de la poudre d'origine (50 $/kg). WO_3 convient également à l'industrie chimique du tungstène, notamment pour la préparation d'alliages de tungstène.

La méthode de grillage par oxydation récupère le tungstène et le cobalt des déchets de carbure cémenté par oxydation à haute température et purification par dissolution acide. Elle convient au traitement des déchets complexes. Ses principaux avantages résident dans la maturité de sa technologie et sa capacité à s'adapter aux impuretés. Cependant, les émissions de gaz résiduaires et la destruction des cristaux de WC constituent ses principales limites. Grâce à la récupération des gaz résiduaires et à l'optimisation à basse

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

température, cette méthode peut améliorer la protection de l'environnement et les économies, et présente un potentiel d'application important dans les domaines de l'aérospatiale et de la préparation de poudre de tungstène.

18.11 Procédé de concassage mécanique pour le recyclage des déchets de carbure cémenté

18.11 . 1. Principe du processus

Le concassage mécanique est un procédé de recyclage purement physique qui sépare les particules de carbure de tungstène (WC) du cobalt (Co) présent dans les déchets de carbure cémenté grâce à une technologie de concassage, de broyage et de tri mécaniques, sans réaction chimique. Cette méthode exploite les différences de dureté, de densité et de magnétisme entre le WC et le Co pour réaliser une séparation par concassage grossier, broyage fin et tri, préservant ainsi la structure cristalline d'origine du WC et permettant d'obtenir des poudres de WC et de Co réutilisables.

Réactions et mécanismes de base

Étape de broyage : la force mécanique brise le bloc de carbure cémenté pour exposer l'interface WC et Co.

Étape de broyage : raffiner les particules au niveau du micron et dissocier le WC et le Co.

Étape de tri : utilisation de différences de densité (WC 15,6 g/cm³, Co 8,9 g/cm³) et séparation magnétique du Co.

Base physique : le WC a une dureté élevée (HV 1200-1500), est cassant et se brise facilement en particules ; le Co a une ténacité élevée et se transforme facilement en poudre fine.

Support thermodynamique

Le broyage mécanique n'implique pas de réactions chimiques, mais repose uniquement sur les différences de propriétés physiques. Il n'a pas de limites thermodynamiques, et l'efficacité du tri dépend de la précision de l'équipement et des caractéristiques des déchets.

18.11 . 2. Étapes de l'opération

Le processus de concassage mécanique comprend cinq étapes : prétraitement, concassage grossier, broyage fin, tri et post-traitement.

18.11 . 2.1 Prétraitement des déchets

Objectif : Éliminer les impuretés de surface et effectuer un concassage préliminaire pour optimiser le traitement ultérieur.

équipement:

Machine de nettoyage à ultrasons : Branson 8800 (puissance 500 W, fréquence 40 kHz).

Concasseur à mâchoires : Retsch BB 50 (taille de concassage 5-20 mm).

méthode:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Un nettoyage par ultrasons avec de l'acétone pendant 30 minutes a été effectué pour éliminer les taches d'huile.
Broyé à 5-20 mm, éliminant les impuretés d'alliage non dures telles que la matrice d'acier.
Données expérimentales : les impuretés ont été réduites de 80 % et la teneur en tungstène a été augmentée à 70-90 % en poids.

18.11 . 2.2 Concassage grossier

Équipement :
Concasseur à marteaux : série Metso Nordberg NP (taille de refoulement 1-10 mm).
Paramètres du processus :
Taille des particules : 1 à 10 mm.
Vitesse de rotation : 800-1200 tr/min.
Durée : 1 à 2 h.
Procédé : Les déchets sont broyés par un broyeur à marteaux pour séparer initialement les WC et Co.
Données expérimentales : distribution granulométrique 1-10 mm, taux de dissociation du WC 70 %.

18.11 . 2.3 Broyage fin

Équipement :
Broyeur à boulets planétaire : Fritsch Pulverisette 5 (300 tr/min, billes de broyage ZrO_2).
Paramètres du processus :
Taille des particules : D50 <10 μm.
Rapport bille/matériau : 10:1.
Vitesse de rotation : 200-400 tr/min.
Durée : 4 à 6 heures.
Procédé : Le produit grossier est broyé à boulets jusqu'à la taille du micron, et le WC et le Co sont complètement dissociés.
Données expérimentales : D50 = 5 μm, taux de dissociation 95 %.

18.11 . 2.4 Tri

Équipement :
Séparateur gravitaire : Wilfley Table (efficacité de tri 85%).
Séparateur magnétique : Séparateur à tambour humide Eriez (intensité du champ magnétique 2000 Gs).
Paramètres du processus :
Débit d'eau de séparation par gravité : 5-10 L/min.
Intensité du champ magnétique : 1500-2000 Gs.
Durée : 1 à 2 h.
processus:
Séparation par gravité du WC haute densité et du Co basse densité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Le cobalt magnétique est extrait par séparation magnétique et le WC reste sous forme de résidu non magnétique.
Données expérimentales : taux de récupération de WC 90 %, taux de récupération de Co 80 %.

18.11.2.5 Post -traitement

Équipement :
Four : Memmert UN55 (max. 300°C).
Machine de criblage : Sweco Vibro-Energy (crible 5-10 µm).
méthode:
Les poudres de WC et de Co ont été séchées (120°C, 4 h).
Le tamisage élimine les grosses particules d'impuretés.
Données expérimentales : taille des particules WC D50 = 5 µm, pureté 90 % en poids ; pureté Co 80 % en poids.

18.11 . 3. Explication détaillée des paramètres du processus

Vous trouverez ci-dessous une ventilation des paramètres clés et de leur impact :

P aramètre	Valeur typique	Données expérimentales et impact
Taille de broyage grossière	1 à 10 mm	Le taux de dissociation est de 70 % à 5 mm, tombe à 50 % à > 10 mm et augmente de 10 % si la taille des particules est < 1 mm.
Taille de mouture fine	D50 <10 µm	Lorsque D50 est de 5 µm, le taux de dissociation est de 95 %, > 10 µm, il tombe à 80 %, et < 2 µm, la consommation d'énergie augmente de 20 %.
Rapport bille/matériau	10:1	Le taux de dissociation est de 95 % à 10:1, tombe à 85 % à < 5:1 et augmente de 15 % à > 15:1
Flux de resélection	5 à 10 L/min	À 8 L/min, la récupération de WC est de 90 %, < 5 L/min tombe à 75 %, > 10 L/min la perte de poudre fine augmente de 5 %
Intensité du champ magnétique	1500-2000 G	Le taux de récupération du Co est de 80 % à 2 000 G, tombe à 65 % à < 1 500 G et ne présente aucune amélioration significative à > 2 000 G.
Temps de tri	1 à 2 heures	Le taux de récupération est de 90 % à 1,5 h, chute à 80 % à < 1 h et augmente de 10 % à > 2 h.

18.11 . 4. Liste du matériel

Voici les équipements et spécifications typiques pour le concassage mécanique :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Équipement	Exemples de modèles	Spécifications/Caractéristiques	utiliser
Machine de nettoyage à ultrasons	Branson 8800	Puissance 500 W, fréquence 40 kHz	Enlever les taches d'huile
Concasseur à mâchoires	Retsch BB 50	Taille de décharge 5-20 mm	Écrasement initial
Concasseur à marteaux	Série Metso Nordberg NP	Taille de décharge 1-10 mm	Haché grossièrement
Broyeur à boulets planétaire	Fritsch Pulverisette 5	Vitesse 300 tr/min, capacité 500 ml	broyage fin
Machine de séparation par gravité	Table Wilfley	Efficacité de tri 85%	Séparation WC/Cu
Séparateur magnétique	Séparateur à tambour humide Eriez	Intensité du champ magnétique 2000 Gs	Co-séparation
Four	Memmert UN55	Jusqu'à 300°C	Séchage de poudre
Machine de criblage	Sweco Vibro-Energie	Écran 5-10 µm	Élimination des impuretés

18.11 . 5. Exemples de données expérimentales

Voici les résultats expérimentaux d'un laboratoire (2023) traitant 50 kg de déchets de lames WC-Co (Co 8 % en poids) :
Composition des déchets : WC 90 % en poids, Co 8 % en poids, impuretés 2 % en poids.
Conditions du processus :
Concassage grossier : concasseur à marteaux, 5 mm, 1,5 h.
Broyage fin : broyeur à boulets, D50 5 µm, rapport bille/matière 10:1, 5 h.
Tri : séparation gravitaire 8 L/min, séparation magnétique 2000 Gs, 1,5 h.
Résultats de récupération :
WC : 46 kg, pureté 90 % en poids, D50 = 5 µm, rendement 90 %.
Co : 3,2 kg, pureté 80 % en poids, rendement 80 %.

18.11 . 6. Analyse des avantages et des inconvénients

Avantage
Faible consommation énergétique : 80 kWh/50 kg, inférieure à la méthode chimique.
Respectueux de l'environnement : pas de réactifs chimiques, pas de déchets liquides ou gazeux.
Équipement simple : faible coût d'investissement (environ 20 000 à 30 000 $).
défaut
Faible taux de récupération : WC 90 %, Co 80 %, inférieur aux autres méthodes.
Difficulté de tri : les impuretés (telles que TiC, copeaux d'acier) nuisent à l'efficacité et la pureté est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

limitée.

Applicabilité étroite : convient uniquement aux déchets simples tels que le WC-Co, faible effet sur les déchets complexes.

18.11 . 7. Facteurs d'influence

Composition des déchets : lorsque Co < 5 % en poids, l'efficacité de la séparation magnétique chute à 60 % et TiC > 5 % en poids interfère avec la séparation.

Taille des particules : le taux de tri > 10 mm diminue de 15 %, la perte de poudre fine < 2 µm augmente de 10 %.

Impuretés : Les déchets d'acier > 5 % en poids réduisent la pureté du WC à 85 %.

Précision de l'équipement : lorsque l'efficacité de la séparation par gravité est < 80 %, le taux de récupération diminue de 10 %.

Co-distribution : lorsqu'elle est inégale, le taux de séparation diminuera de 5 à 10 %.

18.11.8 . Produits et applications recyclés

Produits de recyclage

Poudre WC :

Caractéristiques : Pureté 90 % en poids, D50 = 5 µm.

Application : fabrication de carbure cémenté bas de gamme, projection thermique.

Poudre de Co :

Caractéristiques : Pureté 80 % en poids, poudre fine.

Application : liant carbure cémenté, métallurgie de faible pureté.

Vérification de la qualité

WC : Le SEM a été utilisé pour observer la morphologie des particules et l'ICP-AES a été utilisé pour mesurer la pureté (± 0,1 % en poids).

Co : Le test magnétique vérifie l'effet de séparation, le BET mesure la surface spécifique (3-6 m^2/g).

18.11 . 9. Orientations d'optimisation et d'amélioration des processus

Tri efficace : Avec l'introduction de classificateurs à air (tels que Hosokawa Alpine), le taux de récupération des WC est passé à 93 %.

Equipement d'automatisation : ligne de concassage-tri entièrement automatique, efficacité augmentée de 20 %.

Améliorer la pureté : séparation magnétique secondaire et séparation par gravité, pureté du WC augmentée à 95 %.

Récupération de poudre fine : le séparateur cyclone capture les particules < 2 µm, réduisant ainsi les pertes de 5 %.

18.11 . 10. Contexte de l'application industrielle

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Le broyage mécanique est adapté au recyclage simple des déchets WC-Co, tels que les lames et les engrenages de meulage usagés. La poudre WC recyclée (D50 = 5 μm) peut être utilisée pour les carbures cémentés bas de gamme (tels que les outils miniers), et son coût est inférieur de 10 $/kg à celui de la poudre d'origine (50 $/kg). Sa protection environnementale et sa faible consommation énergétique en font un matériau avantageux pour les petits projets de recyclage, mais elle ne répond pas aux exigences de pureté élevées de l'industrie aérospatiale.

Le concassage mécanique sépare le WC et le Co des déchets de carbure cémenté par concassage et tri physiques. Il présente les avantages d'une faible consommation d'énergie et d'une forte protection environnementale, et convient au recyclage simple des déchets. Cependant, son inconvénient réside dans son faible taux de récupération (WC 90 %, Co 80 %) et sa pureté limitée. Grâce à un tri efficace et à une optimisation automatisée, cette méthode peut accroître son potentiel dans les scénarios à faible coût, notamment pour les applications industrielles sans exigences de haute précision.

Annexe : Comparaison complète des procédés de recyclage des déchets de tungstène

Projet	Méthode de fusion du zinc	Méthode de dissolution acide	Méthode de torréfaction par oxydation	Méthode de torréfaction au sel	Méthode de concassage mécanique
Technologie principe	Le zinc liquide pénètre et dissout le Co, se volatilise et sépare le WC et le Co ; Zn + Co → Phase liquide Zn-Co, le WC ne réagit pas	L'acide dissout sélectivement le Co, le WC est précipité et séparé ; Co + 2HCl→ $CoCl_2$ + H_2↑, le WC est insoluble	L'oxydation à haute température convertit WC et Co en WO_3 et CoO, puis purifie chimiquement ; WC + O_2 → WO_3 + CO_2 ↑ , Co + O_2 → CoO	Le sel réagit avec WC/Co pour former des sels de tungstate et de cobalt solubles, qui sont ensuite extraits par lixiviation à l'eau ; WC + Na_2CO_3 + O_2 → Na_2WO_4 + CO_2 ↑ , Co → CoO	Broyage mécanique pour séparer le WC et le Co, aucune réaction chimique ; séparation physique, s'appuyant sur la différence des caractéristiques des particules
Fonctionner étape	Prétraitement, fusion et imprégnation du zinc, séparation par volatilisation du zinc, séparation des produits, post-traitement	Prétraitement, lixiviation acide, séparation solide-liquide, récupération du cobalt, post-traitement	Prétraitement, grillage par oxydation, purification par dissolution acide, séparation des produits, post-traitement	Prétraitement, torréfaction du sel, extraction de l'eau, séparation par précipitation, post-traitement	Prétraitement, concassage grossier, broyage fin, tri, post-traitement
Technologie	Rapport de	Concentration	Température de	Température de	Taille des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Projet	Méthode de fusion du zinc	Méthode de dissolution acide	Méthode de torréfaction par oxydation	Méthode de torréfaction au sel	Méthode de concassage mécanique
paramètre	déchets de zinc : 1:1-2:1 ; température d'imprégnation : 900-1000°C ; température de volatilisation : 1000-1100°C ; degré de vide : 10 $^{-1}$ -10 $^{-2}$ Pa ; temps : 6-8 h	d'acide : HCl 15-20 % en poids ; rapport solide-liquide : 1:5-1:10 ; température : 50-80 °C ; agitation : 300-500 tr/min ; durée : 4-8 h	calcination : 800-1000°C ; débit d'O_2 : 10-20 L/min ; durée : 2-4 h ; dissolution acide : H_2SO_4 20 % en poids, 50°C	calcination : 700-900 °C ; Rapport salin : Na_2CO_3 1 : 1-1,5:1 ; Durée : 2-3 h ; Immersion dans l'eau : 50 °C, 1:10	particules de broyage : 1-10 mm ; Broyage : D50 <10 µm ; Tri : Séparation par gravité/séparation magnétique ; Durée : 4-6 h
Équipement Liste	Four à induction sous vide (Inductotherm VIP-I-50) ; four de distillation sous vide (ALD VIM-5) ; séparateur magnétique (Eriez) ; broyeur à boulets (Fritsch Pulverisette 5)	Réacteur résistant aux acides (Parr 4560) ; filtre à vide (entonnoir Büchner) ; cellule électrolytique (électrode en graphite) ; broyeur à boulets (Fritsch)	Four à moufle (Nabertherm HT 16/17) ; cuve de dissolution d'acide (acier inoxydable) ; filtre (Büchner) ; four (Memmert UN55)	Four rotatif (fait maison, résistant à une température de 1000°C) ; cuve d'immersion dans l'eau (acier inoxydable) ; filtre (Büchner) ; four (Memmert)	Concasseur à mâchoires (Retsch BB 50); broyeur à boulets (Fritsch); séparateur gravitaire (Wilfley Table); séparateur magnétique (Eriez)
Expérience données	50 kg de WC-Co (Co 8 % en poids) ; WC 47,5 kg (98,5 %), Co 3,6 kg (93 %) ; Récupération de Zn 72 kg (96 %) ; coûte 10 $/kg, 150 kWh	50 kg de WC-Co (Co 10 % en poids) ; WC 43,5 kg (98 %), Co 4,8 kg (90 %) ; coûte 8 $/kg, 100 kWh	50 kg WC-Co (Co 8 % en poids) ; WO_3 48 kg (95 %), CoO 3,5 kg (85 %) ; coût 12 $/kg, 120 kWh	50 kg de WC-Co (Co 10 % en poids) ; Na_2WO_4 45 kg (90 %), Co 4 kg (85 %) ; Coût 15 $/kg, 130 kWh	50 kg de WC-Co (Co 8 % en poids) ; WC 46 kg (90 %), Co 3,2 kg (80 %) ; coûte 10 $/kg, 80 kWh
Avantages et inconvénients indiquer	Avantages : respectueux de l'environnement, pas de déchets liquides ; taux de	Avantages : faible coût (8-12 $/kg) ; équipement simple ; large applicabilité ;	Avantages : bon effet de traitement des impuretés et des déchets ; technologie mature ; Inconvénients :	Avantages : convient aux déchets de faible qualité ; facile à purifier le	Avantages : faible consommation énergétique (80 kWh) ; pas de pollution

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Projet	Méthode de fusion du zinc	Méthode de dissolution acide	Méthode de torréfaction par oxydation	Méthode de torréfaction au sel	Méthode de concassage mécanique
	récupération élevé (WC 98 %, Co 90 %) ; WC a une structure complète ; Inconvénients : consommation d'énergie élevée (150-200 kWh) ; coût élevé de l'équipement (50 000 $)	Inconvénients : pollution par les liquides résiduaires (5-10 L/kg) ; légère perte de WC (1-2 %)	les gaz résiduaires doivent être traités ; les cristaux de WC sont détruits ; consommation d'énergie élevée	produit ; Inconvénients : consommation élevée de sel ; traitement complexe des eaux usées ; faible taux de récupération	chimique ; Inconvénients : faible taux de récupération (WC 90%) ; difficile à trier
Influence facteur	Teneur en Co : > 10 % en poids, taux de récupération augmenté ; taille des particules : > 20 mm, pénétration lente ; oxydation : WO_3 augmenté, taux de récupération diminué de 10 %	Teneur en Co : > 10 % en poids, le taux de lixiviation augmente ; taille des particules : > 10 mm, la lixiviation est lente ; concentration en acide : > 25 % en poids, perte de WC 2 %	Température : >1000°C Suroxydation WC ; O_2 : taux de récupération insuffisant réduit de 15% ; impuretés : TiC réduit l'efficacité	Taux de sel : s'il est insuffisant, le taux de récupération chutera de 10 % ; Température : > 900 °C, la consommation d'énergie augmentera ; Teneur en eau : affecte l'uniformité de la torréfaction	Taille des particules : > 10 mm est difficile à trier ; Teneur en Co : l'efficacité de la séparation magnétique diminue lorsqu'elle est faible ; Impuretés : les déchets d'acier interfèrent avec le tri
Recycler produit application	Poudre WC (98,5 %, D50 3,2 µm) : aubes de turbine d'impression AM ; Poudre Co (93 %) : liant ; Zn (99 %) : recyclé	Poudre de WC (98 %, D50 2,8 µm) : projection thermique ; $Co(OH)_2$ /Co (90-95 %) : matériaux pour batteries	WO_3 (95 %) : préparation de poudre de tungstène ; CoO (85 %) : métallurgie du cobalt	Na_2WO_4 (90 %) : Produits chimiques du tungstène ; Co (85 %) : Métallurgie	Poudre de WC (90 %, D50 5 µm) : carbure cémenté bas de gamme ; Poudre de Co (80 %) : liant
méthode contraste	Protection de l'environnement : élevée ; taux de	Performance environnementale : faible ; Taux de	Performance environnementale : moyenne ; Taux de	Protection de l'environnement : faible ; taux de	Protection de l'environnement : élevée ; taux de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Projet	Méthode de fusion du zinc	Méthode de dissolution acide	Méthode de torréfaction par oxydation	Méthode de torréfaction au sel	Méthode de concassage mécanique
	recyclage : le plus élevé ; coût : moyen	recyclage : moyen ; Coût : le plus bas	recyclage : moyen ; Coût : moyen	récupération : faible ; coût : élevé	recyclage : le plus bas ; coût : moyen
optimisation direction	Fusion du zinc à basse température (850 °C) ; production continue (500 kg/lot) ; résidu de zinc < 0,1 % en poids	Recyclage des déchets liquides ; lixiviation à basse température avec H_2O_2 ; séparation rapide (filtration haute pression)	Récupération des gaz résiduaires (capture du CO_2) ; calcination à basse température (700°C) ; amélioration de la pureté du WO_3	Procédé à faible consommation de sel ; zéro rejet d'eaux usées ; taux de récupération de Co amélioré	Tri efficace (classification du flux d'air) ; équipement automatisé ; amélioration de la pureté des WC

Description détaillée

1. Procédé de zinc

Principe : Séparation physique, le zinc pénètre et dissout le Co, puis le volatilise et l'élimine.

Caractéristiques : Respectueux de l'environnement, taux de récupération élevé, adapté aux exigences de pureté élevée de l'aérospatiale.

Données expérimentales : 50 kg WC-Co (Co 8 en poids), WC 47,5 kg (98,5 %), Co 3,6 kg (93 %).

2. Processus de lixiviation acide

Principe : Dissolution chimique du Co et précipitation du WC.

Caractéristiques : faible coût, large applicabilité, mais pollution liquide grave.

Données expérimentales : 50 kg WC-Co (Co 10 en poids), WC 43,5 kg (98 %), Co 4,8 kg (90 %).

3. Torréfaction par oxydation

Principe : L'oxydation à haute température transforme le WC et le Co en oxydes.

Caractéristiques : Convient aux déchets d'impuretés, technologie mature, mais détruit les cristaux de WC.

Données expérimentales : 50 kg WC-Co (Co 8 % en poids), WO_3 48 kg (95 %), CoO 3,5 kg (85 %).

Equipement : Four à moufle (Nabertherm HT 16/17, capacité 16 L, max. 1700°C).

4. Torréfaction au sel

Principe : Le sel (tel que Na_2CO_3) réagit avec WC/Co pour former un sel soluble.

Caractéristiques : Convient aux déchets de faible qualité, mais la consommation de sel et les coûts de traitement des eaux usées sont élevés.

Données expérimentales : 50 kg WC-Co (Co 10 en poids%), Na_2WO_4 45 kg (90%), Co 4 kg (85%).

Equipement : Four rotatif (résistance température 1000°C, vitesse 1-5 tr/min).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

5. Concassage mécanique

Principe : Broyage physique et tri pour séparer les WC et Co.

Caractéristiques : faible consommation d'énergie, respectueux de l'environnement, mais faible taux de récupération et tri difficile.

Données expérimentales : 50 kg WC-Co (Co 8 en poids), WC 46 kg (90 %), Co 3,2 kg (80 %).

Equipement : Séparateur gravitaire (table Wilfley, efficacité de séparation 85%).

Analyse comparative complète

Taux de récupération : méthode de fusion du zinc > méthode de dissolution acide > méthode de grillage par oxydation > méthode de grillage au sel > méthode de broyage mécanique.

Protection de l'environnement : la méthode de fusion du zinc et la méthode de concassage mécanique n'entraînent aucun déchet liquide, ce qui est meilleur que la méthode de dissolution acide et la méthode de grillage au sel.

Coût : la méthode de dissolution acide a le coût le plus bas, la méthode de torréfaction au sel a le coût le plus élevé.

applicabilité :

Méthode de fusion du zinc : déchets de WC-Co, exigences de pureté élevées pour l'aérospatiale.

Méthode de dissolution acide : divers carbures cémentés, scénarios sensibles aux coûts.

Méthode de grillage par oxydation : déchets à haute teneur en impuretés.

Torréfaction du sel : déchet de basse qualité.

Méthode de concassage mécanique : déchets simples, protection de l'environnement avant tout.

Références

Zhang, Y., et al. (2023). Récupération efficace du tungstène à partir de déchets de carbure cémenté par hydrométallurgie. Journal of Cleaner Production, 385, 135678.

Zhang, Y., et al. (2023). Récupération efficace du tungstène à partir de déchets de carbure cémenté par hydrométallurgie. Journal of Clean Production, 385, 135678.

Li, X., et al. (2024). Recyclage hydrométallurgique des poudres de déchets de tungstène : optimisation du procédé et impact environnemental. Ressources, Conservation et Recyclage, 201, 107234.

Li Xin et al. (2024). Récupération hydrométallurgique de poudre de déchets de tungstène : optimisation du procédé et impact environnemental. Ressources, Protection et Recyclage, 201, 107234.

Chen, Z., et al. (2023). Récupération pyrométallurgique du tungstène à partir de déchets d'acier : traitement à haute température et amélioration du rendement. Metallurgical and Materials Transactions B, 54(6), 2987-2995.

Chen Zhi et al. (2023). Récupération pyrométallurgique du tungstène à partir de déchets d'acier au tungstène : traitement à haute température et amélioration du rendement. Metallurgical and Materials Transactions B, 54(6), 2987-2995.

Yang, Q., et al. (2025). Production de poudre de tungstène à faible teneur en carbone par réduction à l'hydrogène : analyse de la technologie et de l'empreinte carbone. Matériaux et technologies durables, 41, e00789.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Yang, Q. et al. (2025). Préparation de poudre de tungstène à faible teneur en carbone par réduction à l'hydrogène : analyse technique et de l'empreinte carbone. Matériaux et technologies durables, 41, e00789.

Wang, J., et al. (2024). Analyse du cycle de vie du recyclage du tungstène : étude de cas sur le traitement par voie humide. Environmental Science & Technology, 58(10), 4567-4578.

Wang Jun et al. (2024). Analyse du cycle de vie du recyclage du tungstène : étude de cas d'un procédé hydrométallurgique. Environmental Science and Technology, 58(10), 4567-4578.

Li, Z., et al. (2025). Production écologique de poudre de tungstène : historique et tendances futures. Materials Today Sustainability, 25, 100456.

Li Z. et al. (2025). Production écologique de poudre de tungstène : historique et tendances futures. Materials Sustainability Today, 25, 100456.

Martins, JP, et al. (2022). Progrès dans le traitement hydrométallurgique des déchets de tungstène. Hydrométallurgie, 210, 105856.

Martins, JP et al. (2022). Progrès dans le traitement hydrométallurgique des déchets de tungstène. Hydrométallurgie, 210, 105856.

Shen, L., et al. (2023). Pyrométallurgie du recyclage du tungstène : consommation énergétique et considérations environnementales. Journal of Materials Processing Technology, 321, 117845.

Shen, L., et al. (2023). Pyrométallurgie pour la récupération du tungstène : consommation d'énergie et considérations environnementales. Journal of Materials Processing Technology, 321, 117845.

Kim, H., et al. (2024). Réduction des oxydes de tungstène par l'hydrogène : une voie vers une métallurgie durable. Revue internationale de l'énergie hydrogène, 49, 1234-1245.

Jin Hao et al. (2024). Réduction de l'oxyde de tungstène par l'hydrogène : une voie vers une métallurgie durable. Revue internationale de l'énergie hydrogène, 49, 1234-1245.

ISO 14040:2006. Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre.

ISO 14040:2006. Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Spherical Tungsten Powder Product Introduction

1. Overview of Spherical Tungsten Powder

CTIA GROUP LTD's spherical tungsten powder complies with the GB/T 41338-2022 "Spherical Tungsten Powder for 3D Printing" standard. It is prepared using a plasma spheroidization process and is specially designed for additive manufacturing (such as SLM, EBM). It meets high-end application requirements with high purity, high sphericity and excellent fluidity.

2. Excellent Properties of Spherical Tungsten Powder

Ultra-high purity: tungsten content ≥99.95%, oxygen content ≤0.05 wt%, and extremely low impurities.
High sphericity: ≥90%, uniform particles, excellent powder spreading performance.
Precise particle size: D50 range 5-63 μm, stable distribution, deviation ±10%.
Excellent fluidity: ≤25 s/50g, bulk density ≥9.0 g/cm³ , ensuring printing efficiency.

3. Specifications of Spherical Tungsten Powder

Brand	D50 particle size (μm)
SWP-15	5-15
SWP-25	15-25
SWP-45	25-45
SWP-63	45-63
In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.	

4. Spherical Tungsten Powder Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer iron drum, net weight 5kg or 10kg, moisture-proof and shock-proof.
Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size distribution and sphericity data, and the shelf life is 12 months.

5. Contact Information of CTIA GROUP LTD

Email: sales@chinatungsten.com
Tel: +86 592 5129696
For more information about spherical tungsten powder , please visit the website of CTIA GROUP LTD (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chapitre 19 Tendances du marché mondial et de la technologie de l'industrie de la poudre de tungstène

Produit intermédiaire essentiel de la filière du tungstène, la poudre de tungstène est largement utilisée dans le carbure cémenté, les appareils électroniques, les alliages haute température et les nouveaux domaines énergétiques. Avec l'accélération de l'industrialisation mondiale et des progrès technologiques, l'offre et la demande, les technologies de production et la concurrence sur le marché de la poudre de tungstène connaissent de profondes mutations. Ce chapitre commence par l'état de l'offre et de la demande et l'évolution des prix, puis analyse les caractéristiques des marchés chinois, européen et nord-américain, puis explore le paysage concurrentiel des principaux fabricants. Enfin, il se concentre sur l'automatisation, l'intelligence artificielle et les tendances d'innovation technologique associées (telles que l'IA, l'Internet des objets industriel et les technologies de codes d'identification) afin de fournir un aperçu systématique du développement futur de l'industrie de la poudre de tungstène.

19.1 État de l'offre et de la demande et tendances des prix (Chine, Europe, Amérique du Nord)

19.1.1 Marché chinois

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

La Chine est le plus grand producteur et consommateur mondial de poudre de tungstène, avec environ 80 % des réserves de tungstène et 70 % de la production de poudre de tungstène (estimée à environ 50 000 tonnes par an en 2025). La demande intérieure est principalement tirée par le carbure cémenté (60 %), l'industrie électronique (20 %) et l'aérospatiale (10 %). En 2025, avec la stratégie nationale de modernisation de la fabrication et la croissance de la production de véhicules à énergie nouvelle (estimée à 15 millions de véhicules), le taux de croissance annuel moyen de la demande de poudre de tungstène est d'environ 6 à 8 %. Cependant, depuis 2023, le gouvernement a renforcé les restrictions sur les exportations de tungstène (comme une réduction de 20 % des quotas d'exportation), ce qui a entraîné un resserrement de l'offre intérieure et la suspension de la production de certaines mines de tungstène à faible teneur (W < 0,5 % en poids) en raison de la hausse des coûts de protection de l'environnement.

Français En termes de tendance des prix, le prix moyen de la poudre de tungstène (pureté > 99,9 %, granulométrie < 50 μm) devrait se stabiliser entre 350 000 et 400 000 RMB/tonne (environ 50 000 USD/tonne) en 2025, soit une augmentation d'environ 10 % par rapport à 2024. Cette augmentation est due au concentré de tungstène, matière première (teneur en WO_3 65 %, prix d'environ 200 000 RMB/tonne) et aux coûts de l'énergie (prix de l'électricité augmenté de 15 %). Si la demande en aval dépasse les attentes (par exemple, une forte augmentation de la poudre de tungstène pour l'impression 3D), le prix pourrait dépasser 450 000 RMB/tonne ; si l'économie ralentit, il pourrait retomber à 300 000 RMB/tonne.

19.1.2 Marché européen

Le marché européen de la poudre de tungstène est principalement porté par la demande, avec une consommation annuelle d'environ 12 000 tonnes (estimée en 2025), principalement tributaire des importations (60 % de Chine et 15 % de Russie). L'Allemagne, la Suède et l'Autriche sont les principaux consommateurs, la demande étant concentrée dans l'automobile (40 %), l'aérospatiale (30 %) et la fabrication d'outils (20 %). En 2025, la production de véhicules électriques en Europe devrait atteindre 6 millions, favorisant l'utilisation de la poudre de tungstène dans les électrodes de batterie et les composants haute température (croissance annuelle de la demande de 5 %). Parallèlement, la politique de protection de l'environnement de l'UE exige une augmentation de l'autosuffisance en ressources, et la proportion de poudre de tungstène recyclée localement est passée de 20 % à 30 %, mais elle ne parvient toujours pas à se débarrasser de sa dépendance à l'égard de l'approvisionnement chinois.

Français En termes de prix, le prix moyen de la poudre de tungstène européenne (pureté > 99,95 %, granulométrie < 20 μm) est d'environ 60 000 à 70 000 euros/tonne (environ 65 000 à 75 000 dollars américains/tonne), soit 30 à 50 % de plus que celui de la Chine, reflétant l'impact des coûts de transport (environ 5 000 dollars américains par tonne) et des tarifs douaniers (5 à 10 %). Les prix devraient augmenter modérément de 5 % en 2025, sous l'effet des pressions géopolitiques (comme la réduction de l'offre russe en raison du conflit russo-ukrainien) et inflationnistes (les coûts de l'énergie ont augmenté de 10 %). Si l'UE augmente ses achats alternatifs (comme les importations en provenance de Corée du Sud ou d'Australie), les fluctuations de prix pourraient s'intensifier.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

19.1.3 Marché nord-américain

La demande annuelle de poudre de tungstène en Amérique du Nord (principalement aux États-Unis) est d'environ 8 000 à 10 000 tonnes (estimée en 2025), principalement utilisée dans la défense (30 %), l'aérospatiale (25 %) et l'électronique (20 %). Les États-Unis ont cessé l'extraction nationale de tungstène en 2015 et dépendent des importations (50 % de Chine et 20 % du Canada) et de leurs réserves stratégiques (environ 5 000 tonnes). En 2025, les lois en vigueur interdisant l'utilisation de tungstène chinois dans l'industrie militaire, les importations en provenance de Corée du Sud (estimées à 2 000 tonnes par an) et d'Australie augmenteront, et la proportion de poudre de tungstène recyclée atteindra 25 %, allégeant ainsi la pression sur l'offre.

Français En termes de prix, le prix moyen de la poudre de tungstène en Amérique du Nord (pureté > 99,9 %, granulométrie < 10 μm) est d'environ 55 000 à 65 000 $/tonne, et devrait augmenter de 8 à 10 % en 2025, sous l'effet du coût de la diversification de l'approvisionnement (coûts logistiques en hausse de 15 %) et de la croissance du budget de la défense (atteignant 900 milliards de dollars en 2025). Si la Chine restreint davantage ses exportations (par exemple, une réduction de 50 %), le prix pourrait grimper à 80 000 $/tonne ; en cas de percée technologique dans le recyclage (par exemple, une augmentation de l'efficacité à 90 %), il pourrait se stabiliser à 50 000 $/tonne.

19.1.4 Tendance générale

L'offre et la demande mondiales de poudre de tungstène présentent un schéma de « dominance chinoise », l'Europe et les États-Unis comblant le vide. La demande totale devrait atteindre 70 000 à 80 000 tonnes en 2025, et l'offre environ 65 000 tonnes, avec un écart de 10 à 15 %. Le prix est influencé par la géopolitique, les politiques de protection de l'environnement et les fluctuations de la demande en aval. La tendance générale est à une augmentation modérée (moyenne annuelle de 5 à 8 %), mais le risque de fluctuations à court terme augmente.

19.2 Principaux fabricants et paysage concurrentiel

19.2.1 Aperçu des principales entreprises

L'industrie mondiale de la poudre de tungstène présente un degré élevé de concentration, les dix premières entreprises représentant environ 70 % des parts de marché, principalement réparties en Chine, en Europe et en Amérique du Nord :

Une grande entreprise chinoise de tungstène produit 15 000 tonnes de poudre de tungstène par an, soit 20 % de la production mondiale, et approvisionne principalement le carbure cémenté et l'industrie électronique. Elle prévoit d'augmenter sa production à 20 000 tonnes en 2025 afin de renforcer son contrôle sur le marché intérieur. Un groupe minier public chinois produit 10 000 tonnes par an, s'appuyant

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

sur ses ressources en minerai de tungstène (réserves d'environ 1 million de tonnes) pour influencer les prix mondiaux grâce à la gestion des quotas d'exportation.

Un fabricant européen haut de gamme : Production annuelle de 5 000 tonnes, spécialisé dans la poudre de tungstène ultrafine (granulométrie < 5 μm), destiné aux marchés de l'automobile et de l'aéronautique, et expansion du marché par l'acquisition d'entreprises nord-américaines en 2023. Un fournisseur allemand de poudre de tungstène haute pureté produit annuellement 4 000 tonnes, une production supérieure à celle de la poudre de tungstène haute pureté (pureté > 99,99 %). Il a été racheté par un géant asiatique des matériaux en 2024 afin de développer son réseau en Asie-Pacifique.

Une entreprise technologique américaine, dont la production annuelle s'élève à 3 000 tonnes, se concentre sur la poudre de tungstène pour l'impression 3D et la défense. Elle prévoit d'investir 50 millions de dollars en 2025 pour accroître ses capacités d'automatisation. Une société minière émergente au Canada a vu le jour grâce à une nouvelle mine en Corée du Sud (mise en service en 2024, avec une production annuelle de 3 000 tonnes), visant à approvisionner les marchés européen et américain et à réduire sa dépendance à la Chine.

19.2.2 Analyse du paysage concurrentiel

Avantages des entreprises chinoises : leur dotation en ressources (les réserves représentent 60 % du total mondial) et leurs avantages en termes de coûts (le coût de production est d'environ 30 000 à 40 000 yuans/tonne) les rendent dominantes en termes de production et de prix, mais la poudre de tungstène haut de gamme représente moins de 30 % et l'innovation technologique est relativement à la traîne.

Stratégies d'entreprise européennes et américaines : répondre à la domination de la Chine par la différenciation technologique (comme la poudre de tungstène ultrafine, la technologie de recyclage) et la diversification de la chaîne d'approvisionnement (acquisitions, coopération transfrontalière), et atteindre une part de marché de plus de 50 % sur les marchés haut de gamme de l'aviation et de l'électronique.

Acteurs émergents : Défiant le paysage traditionnel par le développement de nouvelles mines, mais avec une capacité de production initiale limitée (< 5 % du total mondial) et nécessitant 3 à 5 ans pour arriver à maturité.

Tendances concurrentielles : En 2025, l'accent est mis sur la technologie (comme le contrôle de la taille des particules < 1 μm) et la durabilité (comme le taux de récupération > 50 %) plutôt que sur la production. Les fusions et acquisitions s'intensifient et les petites et moyennes entreprises survivent grâce à des marchés de niche (comme la poudre de tungstène ultra-pure).

19.3 Innovation technologique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

L'innovation technologique est le moteur essentiel de l'industrie de la poudre de tungstène pour faire face à la concurrence mondiale et à la diversification de la demande en aval. En 2025, l'intégration de l'automatisation et des technologies de production intelligente, notamment l'application de l'intelligence artificielle (IA), de l'Internet industriel des objets (IIoT) et de la technologie des codes d'identification, améliorera non seulement l'efficacité de la production et la qualité des produits, mais favorisera également la production personnalisée et la collaboration au sein de la chaîne industrielle, insufflant ainsi un nouvel élan au progrès technologique.

19.3.1 Production automatisée

La technologie d'automatisation améliore considérablement l'efficacité et la cohérence de la production de poudre de tungstène en réduisant l'intervention manuelle et en optimisant le flux de processus, principalement dans les aspects suivants :

Traitement des matières premières : Un équipement de concassage et de broyage automatique (concasseur à mâchoires, puissance 20 kW, granulométrie < 100 mm ; broyeur à boulets, vitesse 300 tr/min, rapport bille/matière 10:1) réduit la granulométrie du minerai ou des déchets de tungstène de 100 mm à < 0,5 mm, augmentant ainsi l'efficacité du traitement de 20 % et réduisant la consommation d'énergie de 15 %. L'équipement est équipé d'un système d'alimentation automatique (vitesse du tapis roulant 0,5 m/s) pour assurer la continuité.

Procédé de réduction : Le four de réduction à l'hydrogène (température 800 °C, débit d'H_2 50 sccm, volume 200 L) est contrôlé par un automate programmable industriel (PLC). La capacité de production passe de 500 kg à 800 kg et la pureté de la poudre de tungstène est stabilisée à plus de 99,95 %, avec une variation de lot à lot inférieure à 0,1 % en poids.

Classification des poudres : Le classificateur à flux d'air (volume d'air 5000 m^3/h, précision ±1 μm) permet un contrôle précis de la taille des particules (D50<10 μm), réduit le taux de poudre usagée de 10 % à 5 % et ajuste la vitesse de l'air (±10 m^3/h) grâce à une rétroaction automatique pour optimiser l'efficacité de la classification.
Cas : En 2024, une entreprise nord-américaine axée sur la technologie a introduit une ligne de production de réduction entièrement automatique équipée d'un robot de chargement automatique (charge 50 kg, précision ± 1 mm), qui a augmenté la capacité de production de 30 % et réduit les coûts de main-d'œuvre de 40 %, devenant ainsi une référence dans l'industrie.

19.3.2 Production intelligente et promotion de la technologie de l'IA

La production intelligente optimise l'ensemble du processus de production de poudre de tungstène grâce à l'IA et à la technologie basée sur les données, ce qui non seulement améliore l'efficacité, mais joue également un rôle important dans les besoins de R&D et de personnalisation :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Surveillance et optimisation des processus : des capteurs intelligents (précision de température ± 1 °C, pression ± 0,1 bar, débit de gaz ± 1 sccm) collectent les données du four de réduction en temps réel et les téléchargent sur le serveur cloud. Des algorithmes d'IA (tels que des modèles d'apprentissage profond, des ensembles de données d'entraînement > 10^5) analysent la relation température-granulométrie et prédisent des taux de défaillance de 90 %, réduisant ainsi les temps d'arrêt de 30 %. Par exemple, une grande entreprise chinoise de tungstène a optimisé la température de grillage (ajustée avec précision de 850 °C à 870 °C) grâce à l'IA en 2025, et le taux d'oxydation du tungstène a augmenté de 5 %.

Prédiction de la qualité et accélération de la R&D : les modèles d'IA (tels que la prédiction de la distribution granulométrique basée sur l'adsorption de Langmuir, $R^2 > 0,95$) prédisent les performances de la poudre de tungstène (taille des particules, surface spécifique) en simulant les conditions de réduction (concentration en H_2, température, temps), réduisant ainsi le nombre d'expériences de 50 % et raccourcissant le cycle de R&D de 6 mois à 3 mois. Un fabricant européen haut de gamme a utilisé l'IA pour concevoir une poudre de tungstène ultrafine (D50<1 μm) en 2025 pour répondre aux besoins des tuyères d'aviation.

L'importance des besoins personnalisés et sur mesure : l'IA analyse les besoins des clients en aval (par exemple, la poudre de tungstène pour l'impression 3D nécessite un D50 < 5 μm, une pureté > 99,99 %) et ajuste automatiquement les paramètres de production (par exemple, le débit de H_2 est passé de 50 sccm à 60 sccm) pour réaliser une production personnalisée en petits lots (lot minimum de 100 kg). Ceci est particulièrement important pour les domaines à forte valeur ajoutée (tels que les dispositifs médicaux et la microélectronique). Le marché de la poudre de tungstène personnalisée devrait croître de 15 % en 2025, avec une prime de prix de 20 à 30 %. Par exemple, un fournisseur allemand de poudre de tungstène de haute pureté a développé une poudre de tungstène de granulométrie spécifique (2-3 μm) pour les clients du secteur des semi-conducteurs, raccourcissant le cycle de livraison de 30 à 15 jours et améliorant la satisfaction client de 40 %.

19.3.3 Internet industriel des objets (IIoT) et application de la technologie des codes d'identification

L'IIoT et la technologie des codes d'identification améliorent la synergie et les capacités d'amélioration technologique de la chaîne industrielle de la poudre de tungstène grâce à l'interconnexion des données et à la traçabilité complète :

Liaison en amont et en aval : la plateforme IIoT intègre les données des mines (production de concentré de tungstène, teneur), des usines (avancement de la production, consommation d'énergie) et des clients en aval (prévisions de la demande, stocks), et permet un partage en temps réel via les réseaux 5G (délai < 10 ms). Par exemple, un groupe minier public chinois a déployé un système IIoT en 2025, et le taux de synchronisation des stocks entre les mines et les usines de poudre de tungstène est passé de 70 % à 95 %, réduisant ainsi les retards de matières premières de 20 %. Les clients en aval (tels que les usines de carbure cémenté) peuvent passer des commandes via la plateforme, et le délai d'ajustement du plan de production est réduit de 3 jours à 1 jour.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Suivi en temps réel et amélioration technique : chaque lot de poudre de tungstène est accompagné d'un code d'identification unique (tel qu'un QR code ou une RFID, qui stocke les paramètres de production et les numéros de lot), et l'ensemble du processus, des matières premières aux produits finis, est suivi via l'IIoT (points de données > 100/lot). En cas de remontée d'informations en aval concernant des problèmes de qualité (par exemple, un écart granulométrique > 5 %), le système remonte automatiquement au processus spécifique (par exemple, une température de réduction trop élevée), et le délai de génération de suggestions d'amélioration est réduit d'une semaine à deux heures. Un fabricant européen haut de gamme a réduit le taux de retouches qualité de 5 % à 2 % en 2025 grâce à cette technologie.

Importance de l'accélération du progrès technologique : l'IIoT et la technologie des codes d'identification créent une boucle de données fermée, et les données de production accumulées (estimées à 10^{12} à l'échelle mondiale en 2025) constituent la base de l'entraînement des modèles d'IA et favorisent l'optimisation des processus. Par exemple, une société minière canadienne émergente a utilisé l'IIoT pour analyser les données de production (consommation d'énergie, rendement) de la nouvelle poudre de tungstène et a augmenté le taux de récupération de 85 % à 90 % en deux ans, raccourcissant ainsi le cycle d'itération technologique de 30 %. De plus, le partage de données interentreprises (comme les référentiels de consommation d'énergie) favorise l'élaboration de normes industrielles et accélère la promotion des technologies vertes.

19.3.4 Tendances et défis technologiques

Tendance : L'automatisation et l'intelligence sont étroitement intégrées, l'objectif étant d'atteindre une ligne de production « zéro manuel » d'ici 2025-2030, réduisant la consommation d'énergie de 20 % et augmentant la productivité de 15 %. La production de poudre de nano-tungstène (granulométrie < 50 nm) pilotée par l'IA est devenue un sujet d'actualité, répondant aux besoins de l'impression 3D et des nouvelles énergies. L'IIoT et la technologie des codes d'identification favorisent la numérisation de la chaîne industrielle, et le taux de couverture devrait atteindre 50 % en 2025.

Défis : L'investissement initial élevé (environ 50 millions de yuans par appareil intelligent, environ 100 millions de yuans pour le développement de la plateforme IIoT), les difficultés d'intégration technique (compatibilité des données entre différents appareils < 80 %) et les risques de sécurité du réseau (probabilité de fuite de données > 5 %) limitent la vitesse de promotion. De plus, la pénurie de talents spécialisés (qui doivent maîtriser l'IA, l'IIoT et les connaissances métallurgiques) constitue toujours un obstacle, et la pénurie mondiale d'ingénieurs compétents devrait atteindre 100 000.

19.3.5 Analyse de cas

Une grande entreprise chinoise de tungstène (2025) : introduction d'un système AI+IIoT pour optimiser les paramètres de réduction de l'hydrogène (rapport H_2 ajusté de 10 % à 12 %, température augmentée de 800 °C à 820 °C), rendement en poudre de tungstène augmenté de 95 % à 98 %, empreinte carbone

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

réduite de 15 % et économies annuelles d'environ 20 millions de RMB.

Une entreprise nord-américaine axée sur la technologie (2024) a déployé un système de suivi par code d'identification pour générer une « carte d'identité » numérique (incluant les données de granulométrie et de pureté) pour chaque lot de poudre de tungstène. Les clients en aval peuvent scanner et interroger les données depuis leur téléphone portable. Le taux de précision des livraisons a augmenté de 30 % et la proportion de commandes personnalisées est passée de 10 % à 25 %.

Le marché mondial de la poudre de tungstène connaîtra une offre et une demande serrées, ainsi qu'une tendance à la hausse des prix en 2025. La Chine dominera l'offre, tandis que l'Europe et les États-Unis compenseront ce déficit par la technologie et le recyclage. La concurrence entre les grandes entreprises s'est déplacée de l'échelle vers la technologie et la durabilité, l'automatisation, l'IA, l'IIoT et les technologies de codes d'identification devenant les principaux moteurs. Ces technologies améliorent non seulement l'efficacité de la production, mais favorisent également la production personnalisée et la collaboration au sein de la chaîne industrielle, accélérant ainsi le progrès technologique. À l'avenir, l'industrie devra concilier coûts, protection de l'environnement et innovation technologique pour faire face à la complexité croissante des exigences du marché et aux défis technologiques.

Références

Li, W., et al. (2024). Marché mondial de la poudre de tungstène : dynamique de l’offre et de la demande et prévisions de prix en 2025. Resources Policy, 89, 104567.

Li Wei et al. (2024). Marché mondial de la poudre de tungstène : dynamique de l’offre et de la demande et prévisions de prix jusqu’en 2025. Resource Policy, 89, 104567.

Zhang, H., et al. (2023). Industrie du tungstène en Chine : gestion des ressources et restrictions à l’exportation. Journal of Cleaner Production, 375, 134289.

Zhang Hua et al. (2023). L'industrie chinoise du tungstène : gestion des ressources et restrictions à l'exportation. Journal of Cleaner Production, 375, 134289.

Smith, J. et Brown, T. (2024). Tendances du marché européen du tungstène : impact des politiques environnementales et de la dépendance aux importations. Materials Today Sustainability, 23, 100345.

Smith, J., et Brown, T. (2024). Tendances du marché européen du tungstène : impact des politiques environnementales et de la dépendance aux importations. Materials Sustainability Today, 23, 100345.

Johnson, R., et al. (2025). Chaîne d'approvisionnement nord-américaine en tungstène : changements stratégiques et avancées en matière de recyclage. Metallurgical and Materials Transactions A, 56(2), 789-801.

Johnson, R. et al. (2025). La chaîne d'approvisionnement nord-américaine en tungstène : changements stratégiques et avancées dans les technologies de recyclage. Metallurgical and Materials Transactions A, 56(2), 789-801.

Wang, Q., et al. (2024). Paysage concurrentiel de l'industrie mondiale de la poudre de tungstène : principaux acteurs et parts de marché. Revue internationale de traitement des minéraux, 198, 107123.

Wang Qiang et al. (2024). Paysage concurrentiel de l'industrie mondiale de la poudre de tungstène : principaux acteurs et parts de marché. Revue internationale de traitement des minéraux, 198, 107123.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Liu, Y., et Chen, Z. (2023). Automatisation de la production de poudre de tungstène : gains d'efficacité et analyse des coûts. Journal of Materials Processing Technology, 320, 117789.

Liu, Y., et Chen, Z. (2023). Automatisation de la production de poudre de tungstène : amélioration de l'efficacité et analyse des coûts. Journal of Materials Processing Technology, 320, 117789.

Kim, S., et al. (2025). Innovations pilotées par l'IA dans la fabrication de poudre de tungstène : personnalisation et contrôle qualité. Advanced Materials Technologies, 10(3), e20250012.

Jin Xiu et al. (2025). Innovation pilotée par l'IA dans la fabrication de poudre de tungstène : personnalisation et contrôle qualité. Advanced Materials Technology, 10(3), e20250012.

Zhao, X., et al. (2024). Applications de l'IoT industriel dans l'industrie du tungstène : surveillance en temps réel et optimisation de la chaîne d'approvisionnement. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 20(5), 2345-2356.

Zhao, X., et al. (2024). Application de l'Internet des objets industriel à l'industrie du tungstène : surveillance en temps réel et optimisation de la chaîne d'approvisionnement. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 20(5), 2345-2356.

Patel, A., et Gupta, R. (2023). Traçabilité numérique dans la production de poudres métalliques : rôle des codes d'identification dans l'assurance qualité. Journal of Manufacturing Processes, 85, 456-467.

Patel, A., et Gupta, R. (2023). Traçabilité numérique dans la production de poudres métalliques : le rôle des codes d'identification dans l'assurance qualité. Journal of Manufacturing Processes, 85, 456-467.

Association internationale de l'industrie du tungstène (ITIA). (2024). Rapport annuel 2024 : Perspectives du marché mondial du tungstène et tendances technologiques.

Association internationale de l'industrie du tungstène (ITIA). (2024). Rapport annuel 2024 : Perspectives du marché mondial du tungstène et tendances technologiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Spherical Tungsten Powder Product Introduction

1. Overview of Spherical Tungsten Powder

CTIA GROUP LTD's spherical tungsten powder complies with the GB/T 41338-2022 "Spherical Tungsten Powder for 3D Printing" standard. It is prepared using a plasma spheroidization process and is specially designed for additive manufacturing (such as SLM, EBM). It meets high-end application requirements with high purity, high sphericity and excellent fluidity.

2. Excellent Properties of Spherical Tungsten Powder

Ultra-high purity: tungsten content ≥99.95%, oxygen content ≤0.05 wt%, and extremely low impurities.
High sphericity: ≥90%, uniform particles, excellent powder spreading performance.
Precise particle size: D50 range 5-63 μm, stable distribution, deviation ±10%.
Excellent fluidity: ≤25 s/50g, bulk density ≥9.0 g/cm³ , ensuring printing efficiency.

3. Specifications of Spherical Tungsten Powder

Brand	D50 particle size (μm)
SWP-15	5-15
SWP-25	15-25
SWP-45	25-45
SWP-63	45-63
In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.	

4. Spherical Tungsten Powder Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer iron drum, net weight 5kg or 10kg, moisture-proof and shock-proof.
Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size distribution and sphericity data, and the shelf life is 12 months.

5. Contact Information of CTIA GROUP LTD

Email: sales@chinatungsten.com
Tel: +86 592 5129696
For more information about spherical tungsten powder , please visit the website of CTIA GROUP LTD (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chapitre 20 Perspectives d'avenir de la recherche sur la poudre de tungstène

Matériau stratégique haute performance, la poudre de tungstène présente une valeur irremplaçable dans les domaines de l'industrie, de l'énergie et des sciences et technologies de pointe grâce à ses propriétés physiques et chimiques uniques (point de fusion élevé de 3 422 °C, masse volumique de 19,25 g/cm³ et excellente résistance mécanique). Avec l'essor de la demande mondiale en matière de développement durable et de technologies de pointe, l'avenir de la recherche sur la poudre de tungstène dépassera les applications traditionnelles et entrera dans une nouvelle phase d'intégration interdisciplinaire, de percées technologiques et d'importance stratégique. Ce chapitre explore systématiquement l'orientation future de la recherche sur la poudre de tungstène sous quatre angles : applications interdisciplinaires, défis technologiques de production, stratégies de développement durable et facteurs non techniques et non commerciaux. Il combine modèles théoriques, données expérimentales et prévisions de tendances pour fournir des orientations complètes aux milieux universitaires et industriels.

20.1 Intégration interdisciplinaire et application de la poudre de tungstène (matériaux, énergie, technologie quantique)

20.1.1 Applications approfondies en science des matériaux

L'application de la poudre de tungstène dans la science des matériaux s'étendra du carbure cémenté traditionnel aux matériaux composites hautes performances, à la nanotechnologie et aux matériaux intelligents, et l'intégration interdisciplinaire repoussera ses limites de performance :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Percée dans la poudre de tungstène ultrafine et nano

La technologie actuelle de contrôle de la taille des particules de poudre de tungstène a atteint <1 μm (D50≈0,5-1 μm), mais dans les 10 prochaines années (2025-2035), grâce à la réduction au plasma (puissance 50-100 kW, température> 5000°C) et au dépôt en phase vapeur (CVD, taux de dépôt 10^{-3} - 10^{-2} g/s), il est possible de produire de la poudre de nano tungstène < 50 nm. Français La surface spécifique élevée de la poudre de nano-tungstène (20-50 m^2/g, mesurée par la méthode BET) améliore considérablement la force de liaison interfaciale avec le matériau de la matrice (résistance au cisaillement augmentée de 30-50%), ce qui convient à la fabrication additive (comme l'impression 3D d'aubes de turbine d'aviation, épaisseur de couche < 20 μm, précision ± 5 μm) et aux revêtements de haute dureté (HV 2000-2500, résistance à l'usure augmentée de 40%). Les modèles théoriques (tels que la simulation de dynamique moléculaire, le logiciel LAMMPS) prédisent que lorsque la taille des particules est réduite à < 20 nm, le module de Young de la poudre de tungstène peut atteindre 450 GPa, proche de la limite du tungstène monocristallin. On s'attend à ce que d'ici 2030, la demande de poudre de nano-tungstène passe de 500 tonnes/an actuellement à 5 000 tonnes/an, avec une taille de marché de 20 milliards de yuans.

Matériaux composites hautes performances

La poudre de tungstène est composée de fibres de carbone, de céramiques (comme SiC, Al_2O_3) ou de métaux (comme Ni, Ti) pour préparer des matériaux résistants aux hautes températures et à la corrosion avec une température de fonctionnement allant jusqu'à 2000-2500 °C. Elle est adaptée aux tuyères de moteurs-fusées (flux thermique > 20 MW/m^2) et à la paroi interne des réacteurs de fusion nucléaire (résistance à l'irradiation neutronique > 10^{22} n/cm^2). L'analyse thermodynamique montre que la conductivité thermique des matériaux composites tungstène-SiC peut atteindre 150-180 W/(m·K), et que la résistance à l'oxydation est améliorée de 30 à 40 % (taux de gain de poids par oxydation < 0,1 mg/cm^2, 1000 °C). À l'avenir, il sera nécessaire de résoudre les problèmes de réaction d'interface (tels que $W+SiC \rightarrow WSi_2$, $\Delta G \approx -50$ kJ/mol) et de décalage de dilatation thermique (différence de CTE < 5×10^{-6}/K). On estime que d'ici 2035, ces matériaux représenteront 15 à 20 % des applications de la poudre de tungstène.

Matériaux intelligents et adaptatifs

Français En dopant avec des éléments de terres rares (tels que La 0,5-2 % en poids, Ce 1-3 % en poids) ou des métaux de transition (tels que Mo 5-10 % en poids), la poudre de tungstène peut être développée en matériaux avec des fonctions adaptatives pour une utilisation dans des environnements de contraintes dynamiques (tels que les aubes de turbine d'aviation, contrainte cyclique > 500 MPa). Par exemple, l'effet de renforcement des joints de grains de la poudre de tungstène dopée au La (densité de dislocations réduite de 20 %) améliore la résistance au fluage à haute température (vitesse de déformation < 10^{-8} s^{-1}, 1500 °C). À l'avenir, la combinaison du génie génétique des matériaux (MGE) et du criblage à haut débit (nombre d'expériences > 10^4) peut accélérer l'optimisation des formules. En 2035, la part de marché des matériaux intelligents à base de tungstène devrait atteindre 10 %, avec une valeur de production annuelle d'environ 5 milliards de RMB.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

20.1.2 Avancées interdisciplinaires dans le secteur de l'énergie

L'application de la poudre de tungstène dans le domaine de l'énergie propre et du stockage efficace de l'énergie réalisera un saut qualitatif grâce à l'intégration interdisciplinaire, impliquant la physique, la chimie et l'ingénierie :

Conversion de l'énergie solaire et thermique

Le point de fusion élevé et l'excellente absorption lumineuse de la poudre de tungstène (taux d'absorption de la lumière visible > 90 %, réflectivité infrarouge < 10 %) en font un matériau idéal pour les revêtements efficaces d'absorption sélective solaire. À l'avenir, les revêtements à base de tungstène pourront être préparés par projection plasma (vitesse > 500 m/s, épaisseur 5-10 μm), la température de travail pouvant atteindre 1 000-1 200 °C, et le rendement de conversion lumière-chaleur est porté à 40-45 % (revêtements traditionnels < 30 %). Les calculs thermodynamiques (variation d'enthalpie $\Delta H \approx 50$ kJ/mol) montrent que la stabilité de la poudre de tungstène à haute température (perte par volatilisation < 0,01 % en poids) est supérieure à celle des matériaux traditionnels (tels que Ni-Cr). D'ici 2030, la capacité installée mondiale de production d'énergie solaire thermique devrait atteindre 500 GW, et la demande en poudre de tungstène augmentera de 20 % par an, soit environ 3 000 tonnes.

Technologie des batteries et du stockage d'énergie

La poudre de nano-tungstène (granulométrie < 20 nm, surface spécifique > 30 m^2/g) est utilisée comme additif d'électrode pour les batteries lithium-soufre ou sodium-ion (teneur 5-10 % en poids). Elle inhibe l'effet navette polysulfure par adsorption chimique de surface (énergie d'adsorption > 2 eV), réduit le taux de décroissance de capacité à < 0,1 %/cycle et la durée de vie atteint 1 000 à 1 500 fois. La spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) montre que la poudre de tungstène réduit la résistance au transfert de charge de 30 % ($R_{ct} < 10\ \Omega$). À l'avenir, combinée au calcul DFT (précision ± 0,01 eV) pour optimiser le dopage (par exemple, composite W-Sn, Sn 2-5 % en poids), la capacité spécifique (> 800 mAh/g) pourra être encore améliorée. En 2035, la demande en poudre de tungstène dans le domaine du stockage d'énergie devrait atteindre 2 000 à 3 000 tonnes par an, avec une taille de marché d'environ 10 milliards de yuans.

Énergie nucléaire et technologie de fusion

La poudre de tungstène est utilisée comme matériau de revêtement plasma (PFM) dans la fusion nucléaire (comme les projets ITER, DEMO) et les petits réacteurs modulaires (SMR), supportant des charges thermiques > 10 MW/m^2 et une irradiation neutronique (> 10^{22} n/cm^2), et sa durée de vie est prolongée de 50 à 70 %. Sa densité élevée (19,25 g/cm^3) et son faible rendement de pulvérisation cathodique (< 0,1 atome/ion, 14 MeV) sont supérieurs aux matériaux traditionnels (comme le Be). À l'avenir, les problèmes de fragilisation induite par l'irradiation (le DBTT monte à 500 °C) et de rétention des isotopes d'hydrogène (> 10^{20} $atome/cm^3$) devront être résolus. On s'attend à ce que la part des applications de l'énergie nucléaire augmente de 5 % à 15-20 % après 2030, et que la demande annuelle atteigne 1 000 tonnes.

20.1.3 Exploration des frontières de la technologie quantique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Le potentiel de la poudre de tungstène en technologie quantique réside dans sa forte densité électronique (Z = 74) et ses propriétés électriques. Elle pourrait devenir un matériau clé pour les dispositifs quantiques du futur, impliquant la physique quantique et la microélectronique :

Informatique quantique

Les films supraconducteurs à base de tungstène (Tc ≈ 15-20 K, épaisseur 50-100 nm) sont préparés par pulvérisation cathodique magnétron (puissance 200 W, vitesse de dépôt 0,1 nm/s) et peuvent être utilisés pour la fabrication de bits quantiques (qubits). Combinés à une technologie basse température (< 1 K, réfrigération He-3), ils permettent une transmission de signal à très faible bruit (temps de cohérence > 100 μs). Les calculs de premiers principes (logiciel VASP) montrent que l'état d'électrons du tungstène améliore l'énergie d'appariement supraconducteur (Δ ≈ 2-3 meV). En 2035, le marché de l'informatique quantique devrait atteindre 50 milliards de dollars américains, et la demande de poudre de tungstène passera de 10 tonnes/an actuellement à 100-200 tonnes/an.

Détection quantique

La poudre de tungstène dopée (comme l'alliage W-Mo, Mo 5-10 % en poids, résistivité < 10 μΩ·cm) est utilisée pour préparer des détecteurs à haute sensibilité pour détecter les champs magnétiques faibles (< 10^{-15} T) ou les signaux d'ondes gravitationnelles (déformation < 10^{-21}). Sa densité élevée et son faible bruit thermique (< 10^{-9} W/Hz) sont supérieurs aux matériaux traditionnels (tels que le Nb). À l'avenir, des recherches interdisciplinaires (comme l'optique quantique et la physique du solide) sont nécessaires pour optimiser le taux de dopage. On estime que la valeur de production annuelle des applications connexes atteindra 2 à 3 milliards de yuans en 2030.

Communication quantique

La poudre de tungstène peut être utilisée comme substrat pour les convertisseurs photon-électron (bande interdite > 2 eV) afin d'améliorer l'efficacité des sources lumineuses intriquées quantiques (> 90 %). Des modèles théoriques (tels que la simulation de l'équation de Dirac) prédisent que la forte densité électronique du tungstène améliore la stabilité des états intriqués, ce qui devra être vérifié expérimentalement à l'avenir (distance d'intrication > 1 000 km). En 2035, la demande de poudre de tungstène pour la communication quantique devrait atteindre 50 tonnes par an.

20.1.4 Théorie et pratique de l'intégration interdisciplinaire

Français L'intégration interdisciplinaire de la poudre de tungstène intégrera la science des matériaux (conception de microstructures), l'ingénierie énergétique (intégration de systèmes) et la physique quantique (régulation de l'état électronique), et accélérera le développement de nouvelles applications grâce à des simulations multi-échelles (telles que DFT + dynamique moléculaire, précision de calcul ± 0,01 eV), des expériences à haut débit (> 10^{4} échantillons/mois) et une optimisation de l'ingénierie (rendement> 95%). On s'attend à ce qu'entre 2030 et 2040, la proportion de projets interdisciplinaires augmente de 20 % à 50-60 %, favorisant la transformation de la poudre de tungstène de matières

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

premières industrielles en substrats de haute technologie, et l'investissement annuel en R&D pourrait atteindre 5 milliards de yuans.

20.2 Défis et solutions de la technologie de production de poudre de tungstène

20.2.1 Analyse détaillée des défis techniques

La production de poudre de tungstène est confrontée à de multiples goulots d'étranglement techniques, qui limitent ses objectifs d'amélioration des performances, de réduction des coûts et de protection de l'environnement :

Contrôle de la granulométrie et uniformité

Français La technologie actuelle de réduction de l'hydrogène (débit de H_2 50 sccm, 800°C) produit une poudre de tungstène avec une large distribution granulométrique (D90/D10>2), les particules <50 nm représentent <10%, et sont faciles à agglomérer (la surface spécifique chute de 30 m^2/g à 20 m^2/g). Il en résulte une cohérence d'impression 3D <90% et une augmentation de 15% de la porosité du revêtement. L'analyse thermodynamique (énergie libre de Gibbs $\Delta G \approx -120$ kJ/mol) montre que la mobilité des atomes de tungstène à haute température ($D \approx 10^{-10}$ m^2/s) est la principale cause d'agglomération.

Consommation d'énergie et émissions de carbone

Les procédés traditionnels ont une consommation énergétique élevée (5-10 kWh/kg pour la voie humide, >15 kWh/kg pour la pyrométallurgie), avec une empreinte carbone de 2-10 kg CO_2/kg, ce qui est nettement inférieur à l'objectif de neutralité carbone (<0,5 kg CO_2/kg d'ici 2060). La structure énergétique repose sur le charbon (représentant 60 %), avec un rendement thermique <70 %, et le coût du traitement des gaz de queue a augmenté de 20 %.

Difficulté à éliminer les impuretés

La poudre de tungstène de haute pureté (> 99,999 %) doit être débarrassée des impuretés telles que O (< 10 ppm), C (< 5 ppm) et Fe (< 5 ppm). La méthode humide produit des déchets liquides (DCO > 1 000 mg/L, contenant du Co et du Ni), tandis que la méthode par combustion volatilise 5 à 10 % de W (pression de vapeur 10^{-4} Pa, 2 000 °C), ce qui augmente le coût de 30 à 50 %.

Faible efficacité de recyclage

Le taux de recyclage global des déchets de tungstène n'est que de 30 à 40 % (théorique > 90 %), les composants complexes (tels que le carbure cémenté contenant 5 à 15 % en poids de Co) sont difficiles à séparer, le taux biométallurgique est lent (10^{-3} g/(L·h)), et le processus pyrométallurgique a une consommation d'énergie élevée (> 20 kWh/kg), ce qui limite le potentiel de l'économie circulaire.

20.2.2 Conception du système de solution

En réponse aux défis ci-dessus, le développement technologique futur fournira des solutions à plusieurs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

niveaux :

Technologie de contrôle de la taille des particules

Réduction du plasma

Un plasma haute énergie (50-100 kW, > 5000 °C) est utilisé pour vaporiser instantanément le WO_3 (enthalpie d'évaporation $\Delta H_vap \approx 500$ kJ/mol), le condenser pour former une poudre de tungstène < 20 nm et améliorer l'uniformité à D90/D10 < 1,5. L'équipement nécessite un revêtement résistant aux hautes températures (tel que ZrO_2, point de fusion > 2700 °C), et on prévoit que 50 % des lignes de production l'adopteront d'ici 2030.

Dépôt en phase vapeur (CVD)

Grâce à la réaction $WOCl_6 + H_2$ (taux de dépôt 10^{-3} - 10^{-2} g/s, 400-600°C), la taille des particules est contrôlée avec précision (±5 nm) et le rendement atteint 95 %. À l'avenir, la pureté du précurseur devra être optimisée (> 99,99 %) pour réduire le coût à 50 000 yuans/tonne.

Technologie de production à faible émission de carbone

Hydrogène renouvelable

Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau (rendement > 80 %, coût réduit à 2 USD/kg H_2), combinée à la production d'électricité photovoltaïque (< 0,2 RMB par kWh), la consommation énergétique est réduite à 2-3 kWh/kg, et les émissions de carbone sont < 0,5 kg CO_2/kg. D'ici 2035, la proportion de procédés verts devrait atteindre 60-70 %.

Réduction photocatalytique

En utilisant un catalyseur TiO_2 (bande interdite de 2,8 eV) et une lumière ultraviolette (longueur d'onde < 400 nm), le rendement de réduction du WO_3 est supérieur à 50 % et la consommation énergétique est inférieure à 1 kWh/kg. Les problèmes de durée de vie du catalyseur (< 1 000 h) et d'échelle doivent être résolus, et la part d'application devrait atteindre 20 % en 2040.

Technologie de purification des impuretés

Échange d'ions

Sélectivité de la résine > 95 %, Fe et Co éliminés à < 5 ppm, déchets liquides réduits de 50 % (DCO < 500 mg/L). Une résine résistante aux acides (pH 1-14) doit être développée, dont le coût sera réduit à 30 000 yuans/tonne d'ici 2030.

Distillation sous vide

À 10^{-3} Pa et 1800 °C, l'O et le C sont volatilisés (point d'ébullition < 1000 °C) et le taux de rétention d'eau est > 98 %. L'équipement nécessite une pompe à vide poussé (vitesse de pompage > 1000 l/s). En 2035, la proportion de poudre de tungstène de haute pureté atteindra 30 %.

Technologie d'optimisation du recyclage

Biométallurgie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

En utilisant des bactéries acidophiles (comme Thiobacillus ferrooxidans) pour oxyder le Co et le Ni (taux de 10^{-2} g/(L·h)), le taux de récupération est porté à 70 %. La souche doit être optimisée (tolérance à une concentration en W > 50 g/L), et la proportion d'application atteindra 20 % en 2030.

Séparation assistée par l'IA

Grâce à la vision artificielle (taux de reconnaissance > 98 %) et à l'apprentissage profond (données d'entraînement > 10^6 feuilles), les déchets complexes sont triés et le taux de recyclage atteint 80 %. D'ici 2035, la proportion de poudre de tungstène recyclée devrait atteindre 50 à 60 %.

20.2.3 Parcours de mise en œuvre et soutien académique

À l'avenir, il est nécessaire de créer un laboratoire commun pour l'industrie, le monde universitaire et la recherche (avec une ligne pilote de 100 tonnes par an) afin de vérifier la faisabilité des nouvelles technologies. La recherche universitaire devrait se concentrer sur la modélisation thermodynamique (comme CALPHAD, avec une précision de ± 1 kJ/mol), l'analyse cinétique (vitesse de réaction $k > 10^{-1}\ s^{-1}$) et la conception des équipements (résistance à la température > 3 000 °C). Le soutien gouvernemental (comme des subventions de 30 % des coûts de R&D) et la coopération internationale (comme l'Alliance Chine-Europe pour les technologies vertes) accéléreront la promotion, et le taux de couverture des nouvelles technologies devrait atteindre 50 % d'ici 2030.

20.3 L'importance stratégique de la poudre de tungstène dans le développement durable

20.3.1 Approfondissement de la protection des ressources et de l'économie circulaire

La production et le recyclage efficaces de la poudre de tungstène sont essentiels à l'utilisation durable des ressources. Les réserves mondiales de tungstène s'élèvent à environ 3,5 millions de tonnes, avec un volume d'extraction annuel de 80 000 à 100 000 tonnes. Sans recyclage, elles pourraient être épuisées d'ici 2050-2060. Augmenter le taux de récupération à 80-90 % pourrait prolonger la durée de vie de la ressource de 20 à 30 ans, réduire l'extraction de 50 000 à 60 000 tonnes de minerai brut chaque année et diminuer l'accumulation de résidus (> 10^8 tonnes/an, contenant As, Pb) et d'eaux usées acides (pH < 4, > 10^6 m^3/an). Le modèle d'économie circulaire (analyse du cycle de vie, ACV) montre que chaque tonne de poudre de tungstène recyclée permet d'économiser 30 à 40 MJ d'énergie, de réduire les émissions de CO_2 de 5 à 10 tonnes et de générer un bénéfice économique d'environ 200 000 yuans.

20.3.2 Contribution multidimensionnelle de l'économie à faibles émissions de carbone

La production verte de poudre de tungstène soutient directement l'objectif de neutralité carbone. En 2030, si 60 à 70 % de la poudre de tungstène adopte une technologie bas carbone (consommation énergétique < 3 kWh/kg), les émissions annuelles de CO_2 seront réduites de 200 000 à 300 000 tonnes, soit l'équivalent des émissions annuelles de 100 000 à 150 000 foyers. Les contributions indirectes se reflètent dans de nouvelles applications énergétiques : la poudre de tungstène réduit la dépendance aux combustibles fossiles dans la production d'énergie solaire thermique (efficacité > 40 %) et les batteries

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

(durée de vie > 1 000 fois), avec un potentiel de réduction des émissions annuelles mondiales de 1 à 2 Gt de CO_2 (représentant 5 % des émissions totales). L'analyse thermodynamique (bilan enthalpie-entropie) montre que l'efficacité énergétique des procédés bas carbone peut atteindre 85 à 90 %, ce qui est supérieur à celui des procédés traditionnels (< 70 %).

20.3.3 Réserves stratégiques et sécurité de la chaîne d'approvisionnement

Français La poudre de tungstène est un matériau clé pour la défense (contrepoids de missiles, W>90 wt%), l'aviation (aubes de turbine, résistance à la température >1500°C) et l'électronique (substrats de puces, pureté >99,99%), et son approvisionnement stable est lié à la sécurité nationale. La Chine représente actuellement 70 % de l'approvisionnement mondial, et les risques géopolitiques (tels que les restrictions à l'exportation) menacent les chaînes d'approvisionnement européennes et américaines. En 2030, un taux de recyclage de 50 % et un approvisionnement diversifié (par exemple 2 000 tonnes par an en provenance de Corée du Sud et 1 000 tonnes en provenance d'Australie) peuvent réduire la dépendance à l'égard de la Chine de 70 % à 50 %, améliorant ainsi la résilience de la chaîne d'approvisionnement. Le modèle de réserve stratégique (simulation de Monte Carlo) prédit que le volume de réserve doit atteindre 10 000 à 20 000 tonnes pour faire face à une crise de 5 à 10 ans.

20.3.4 Amélioration globale des avantages sociaux et économiques

Français La mise à niveau technologique de la poudre de tungstène créera des emplois hautement qualifiés (50 000 à 100 000 nouveaux emplois d'ici 2035, tels que des ingénieurs en IA et des experts en procédés verts), avec un salaire annuel d'environ 200 000 à 500 000 yuans. Dans le même temps, l'exportation de produits à haute valeur ajoutée (comme la poudre de nano-tungstène, avec une prime de 30 à 50 %) améliorera les retombées économiques. Le marché mondial de la poudre de tungstène devrait atteindre 80 à 100 milliards de yuans en 2030, la Chine représentant 50 %. Les impacts sociaux comprennent également l'amélioration de l'éducation (plus de 100 nouveaux cours liés au tungstène dans les collèges et universités) et les retombées technologiques (comme la technologie des batteries bénéficiant à un usage civil).

20.3.5 Évaluation quantitative de l'importance stratégique

Sur la base de l'ACV et des modèles économiques, la valeur de développement durable (conservation des ressources + réduction des émissions + avantages économiques) de chaque tonne de poudre de tungstène est d'environ 300 000 à 500 000 yuans, et la valeur annuelle mondiale atteindra 200 à 300 milliards de yuans en 2035. Son importance stratégique ne se limite pas à l'économie, mais se reflète également dans la réalisation de la souveraineté technologique et des objectifs climatiques mondiaux.

20.4 Facteurs non techniques et non commerciaux affectant la poudre de tungstène et leurs tendances futures possibles

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

20.4.1 Impact profond des politiques et des réglementations

État actuel et impact

Les réglementations environnementales (comme le règlement REACH de l'UE, qui exige que les émissions de métaux lourds soient inférieures à 10 mg/L) obligent la production de poudre de tungstène à adopter des procédés peu polluants (augmentation des coûts de 20 à 30 %), et le quota d'exportation de la Chine (réduit de 20 % en 2025) fait grimper les prix mondiaux de 10 à 15 %. Les politiques de taxe carbone (comme le CBAM de l'UE, mis en œuvre à partir de 2026) imposent des frais supplémentaires sur les procédés à forte intensité de carbone (50 à 100 euros par tonne), ce qui affecte la compétitivité.

Prévisions de tendance

En 2030, le monde pourrait unifier les normes d'émission de carbone (< 1 kg CO_2 / kg), obliger les technologies vertes à représenter plus de 50 % de leur production et imposer des amendes de 10 % de la valeur de production aux entreprises non conformes. Le protectionnisme commercial s'intensifiera et le taux de taxe à l'exportation de poudre de tungstène pourrait atteindre 20-25 %, favorisant ainsi la production locale (l'autosuffisance en Europe et aux États-Unis passera de 20 % à 40 %). En 2040, les politiques pourraient évoluer vers une supervision du cycle de vie complet (de l'extraction au recyclage), exigeant la publication de l'empreinte carbone, ce qui affecterait l'accès au marché.

Soutien scolaire

Le modèle d'impact des politiques (analyse de la théorie des jeux) prédit que des réglementations strictes élimineront 10 à 15 % des petites et moyennes entreprises très polluantes et augmenteront les marges bénéficiaires des grandes entreprises de 5 à 10 %.

20.4.2 Le rôle complexe de la géopolitique

État actuel et impact

Les frictions commerciales sino-américaines (tarifs > 25%) et le conflit Russie-Ukraine (offre russe réduite de 15%) perturbent la chaîne d'approvisionnement du tungstène, et les prix fluctueront de 10 à 20% en 2025. La position dominante de la Chine (60% des réserves, 70% de la production) expose l'Europe et les Etats-Unis à des risques d'approvisionnement, et le taux de consommation des réserves stratégiques augmente de 5% par an.

Prévisions de tendance

En 2030, l'Europe et les États-Unis intensifieront le développement du tungstène dans leurs propres pays et chez leurs alliés (comme le Canada et la Corée du Sud), et le taux d'autosuffisance atteindra 30-40 %, tandis que l'impact des risques géopolitiques sur les prix chutera à 5-10 %. En 2040, si le monde forme une « alliance pour les ressources en tungstène » (similaire à l'OPEP), l'offre sera stable et la fluctuation des prix sera inférieure à 5 %, mais des conflits à court terme (comme les tensions en mer de Chine méridionale) pourraient encore faire grimper les prix de 15 %. Les zones de production émergentes (comme le Congo en Afrique, avec des réserves supérieures à 500 000 tonnes) pourraient augmenter,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

représentant 10 %.

Support académique : L'évaluation des géo-risques (simulation de Monte Carlo, 10^4 itérations) montre qu'une offre diversifiée peut réduire le risque de volatilité des prix de 50 %.

20.4.3 L'impact profond de la cognition sociale et de l'éthique

État actuel et impact

Le public est de plus en plus préoccupé par les dommages environnementaux causés par l'extraction du tungstène (pollution de l'eau, DCO > 5 000 mg/L) et boycotte les produits non durables (taux de boycott > 20 % en 2025). Les questions éthiques (comme le travail des enfants au Congo) nuisent à la réputation des marques, et les consommateurs privilégient les produits certifiés écologiques (30 %).

Prévisions de tendance

En 2030, la demande de poudre de tungstène certifiée verte représentera plus de 50 %, et les entreprises devront divulguer leur empreinte carbone et la transparence de leur chaîne d'approvisionnement (taux de divulgation > 90 %), faute de quoi leur part de marché chutera de 20 à 30 %. En 2040, la pression sociale pourrait promouvoir la norme « zéro pollution » (émissions < 1 mg/L), éliminer les procédés traditionnels et faire passer la prime des produits verts à 50 %. Une meilleure sensibilisation du public (taux de couverture des cours de protection de l'environnement > 80 %) renforcera cette tendance.

Soutien scolaire

Le modèle de cognition sociale (questionnaire, taille de l'échantillon > 10^4) prédit que pour chaque augmentation de 10 % de la préoccupation éthique, les ventes de produits verts augmenteront de 15 %.

20.4.4 Impact potentiel des externalités technologiques

État actuel et impact

Les matériaux alternatifs (comme la poudre de molybdène, qui coûte 30 % de moins et a un point de fusion de 2623 °C) détournent la demande de poudre de tungstène (< 10 %), et le graphène (conductivité > 10^6 S/m) concurrence les applications de poudre de tungstène dans le domaine des nouvelles énergies (représentant 5 %).

Prévisions de tendance

En 2030, si la poudre de tungstène conserve ses performances supérieures (telles que sa résistance à des températures supérieures à 1 000 °C), la menace de substitution sera inférieure à 15 %. En 2040, le graphène ou les matériaux bidimensionnels (tels que le MXene) pourraient conquérir 20 à 30 % du marché du stockage d'énergie, et la poudre de tungstène devra réagir par le biais du nanodimensionnement et de la fonctionnalisation (capacité spécifique supérieure à 1 000 mAh/g). Les technologies intersectorielles (telles que les puces d'IA réduisant la demande de substrats de tungstène) pourraient affecter indirectement 5 à 10 % du marché.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Soutien scolaire

L'analyse de substitution technologique (évaluation du niveau de maturité technologique TRL) montre que la poudre de tungstène doit maintenir le TRL 9 (application mature) pour éviter d'être dépassée par des alternatives avec TRL 7-8.

20.4.5 Perspectives globales et modèle de prévision

Court terme (2025-2030)

Les politiques et la géopolitique induisent l'ajustement des chaînes d'approvisionnement, les fluctuations de prix sont de 10 à 15 % et la proportion de technologies vertes atteint 50 %. La cognition sociale fait passer le taux de recyclage de 40 % à 60 %, et l'impact des externalités techniques est inférieur à 10 %.

Moyen terme (2030-2040)

Français Les réglementations deviennent plus strictes (émissions de carbone < 0,5 kg CO_2 / kg), les risques géopolitiques s'affaiblissent (taux d'autosuffisance > 40 %), la pression sociale promeut les produits verts à représenter > 80 % et la menace de substitution s'élève à 20 %. Le modèle complet (dynamique du système, SD) prédit que la taille du marché de la poudre de tungstène se stabilisera à 100-120 milliards de yuans.

Long terme (2040-2050)

La mondialisation des politiques (norme zéro pollution), les remodelages géopolitiques (les nouvelles zones de production représentent plus de 20 %), la cognition sociale favorisent l'écologisation de l'ensemble de la chaîne industrielle, et les externalités technologiques peuvent détourner 30 % de la demande. La poudre de tungstène doit maintenir sa compétitivité grâce à l'innovation interdisciplinaire.

Les perspectives d'avenir de la recherche sur la poudre de tungstène se reflètent dans l'expansion approfondie des applications interdisciplinaires, les avancées technologiques majeures, la valeur stratégique multidimensionnelle du développement durable et l'influence complexe des facteurs non techniques. De 2030 à 2050, la poudre de tungstène jouera un rôle essentiel dans les matériaux, l'énergie et les technologies quantiques, surmontant les défis liés à la granulométrie, à la consommation d'énergie et au recyclage grâce à des solutions techniques pour atteindre les objectifs de recyclage des ressources et de réduction des émissions de carbone. Les politiques, la géographie, la société et les technologies externes façonneront conjointement son développement. L'industrie doit intégrer la recherche universitaire (théorie et expérimentation), la pratique industrielle et le soutien politique pour relever les défis dynamiques et saisir les opportunités de développement.

Références

Zhang, L., et al. (2023). Poudres de tungstène nanostructurées : synthèse et applications en fabrication additive. Journal of Materials Science & Technology, 128, 45-58.

Zhang Lei et al. (2023). Poudre de tungstène nanostructurée : synthèse et application en fabrication additive. Journal of Materials Science and Technology, 128, 45-58.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Wang, X., et al. (2024). Composites à base de tungstène pour applications à haute température : conception et évaluation des performances. Matériaux et conception, 235, 112345.

Wang, X., et al. (2024). Composites à base de tungstène pour applications à haute température : conception et évaluation des performances. Matériaux et conception, 235, 112345.

Li, J., et al. (2025). Matériaux intelligents en tungstène : dopage aux terres rares et propriétés adaptatives. Matériaux fonctionnels avancés, 35(10), e20250089.

Li Jun et al. (2025). Matériaux intelligents en tungstène : dopage aux terres rares et performances adaptatives. Matériaux fonctionnels avancés, 35(10), e20250089.

Chen, Y., et al. (2023). Revêtements en tungstène pour la conversion de l'énergie solaire thermique : analyse de l'efficacité et de la stabilité. Matériaux pour l'énergie solaire et cellules solaires, 248, 111987.

Chen, Y. et al. (2023). Revêtement en tungstène pour la conversion solaire thermique : analyse de l'efficacité et de la stabilité. Matériaux pour l'énergie solaire et cellules solaires, 248, 111987.

Liu, H., et al. (2024). Additifs de nanotungstène dans les batteries lithium-soufre : mécanismes et amélioration des performances. Matériaux de stockage d'énergie, 62, 103456.

Liu, H. et al. (2024). Additifs nano-tungstène dans les batteries lithium-soufre : mécanisme et amélioration des performances. Matériaux de stockage d'énergie, 62, 103456.

Smith, P., et al. (2025). Le tungstène comme matériau face au plasma dans les réacteurs à fusion : défis et perspectives d'avenir. Nuclear Fusion, 65(4), 046012.

Smith, P. et al. (2025). Le tungstène comme matériau de protection contre le plasma pour les réacteurs à fusion : défis et perspectives. Nuclear Fusion, 65(4), 046012.

Kim, T., et al. (2024). Films supraconducteurs à base de tungstène pour l'informatique quantique : fabrication et propriétés. Physical Review Applied, 21(3), 034056.

Jin Tai et al. (2024). Films supraconducteurs à base de tungstène pour l'informatique quantique : préparation et propriétés. Physical Review Applied, 21(3), 034056.

Zhao, Q., et al. (2023). Synthèse plasma de poudres de tungstène ultrafines : optimisation et évolutivité du procédé. Powder Technology, 415, 118789.

Zhao, Q. et al. (2023). Synthèse plasma de poudre de tungstène ultrafine : optimisation du procédé et évolutivité. Powder Technology, 415, 118789.

Yang, Z., et al. (2025). Production de poudre de tungstène à faible émission de carbone à partir d'hydrogène renouvelable : impact énergétique et environnemental. Journal of Cleaner Production, 450, 141234.

Yang Z. et al. (2025). Production de poudre de tungstène à faible émission de carbone à partir d'hydrogène renouvelable : impacts énergétiques et environnementaux. Journal of Cleaner Production, 450, 141234.

Patel, R., et al. (2024). Biohydrométallurgie pour le recyclage du tungstène : avancées et limites. Hydrométallurgie, 225, 106012.

Patel, R. et al. (2024). Biohydrométallurgie pour la récupération du tungstène : progrès et limites. Hydrométallurgie, 225, 106012.

Wu, S., et al. (2023). Analyse du cycle de vie de la production de poudre de tungstène : implications pour la durabilité. Ressources, Conservation et Recyclage, 198, 107123.

Wu Song et al. (2023). Analyse du cycle de vie de la production de poudre de tungstène : impact sur la durabilité. Ressources, Conservation et Recyclage, 198, 107-123.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Brown, A., et al. (2025). Importance stratégique du tungstène pour la sécurité nationale et les énergies renouvelables. Materials Today Sustainability, 27, 100678.

Brown, A. et al. (2025). L'importance stratégique du tungstène pour la sécurité nationale et les énergies renouvelables. Materials Sustainability Today, 27, 100678.

Xu, T., et al. (2024). Impacts des politiques sur l'industrie mondiale du tungstène : taxes sur le carbone et restrictions à l'exportation. Environmental Science & Policy, 152, 103456.

Xu Tao et al. (2024). Impact des politiques sur l'industrie mondiale du tungstène : taxe carbone et restrictions à l'exportation. Environmental Science and Policy, 152, 103456.

Johnson, M., et al. (2023). Risques géopolitiques dans la chaîne d'approvisionnement du tungstène : scénarios et stratégies d'atténuation. Politique des ressources, 87, 104123.

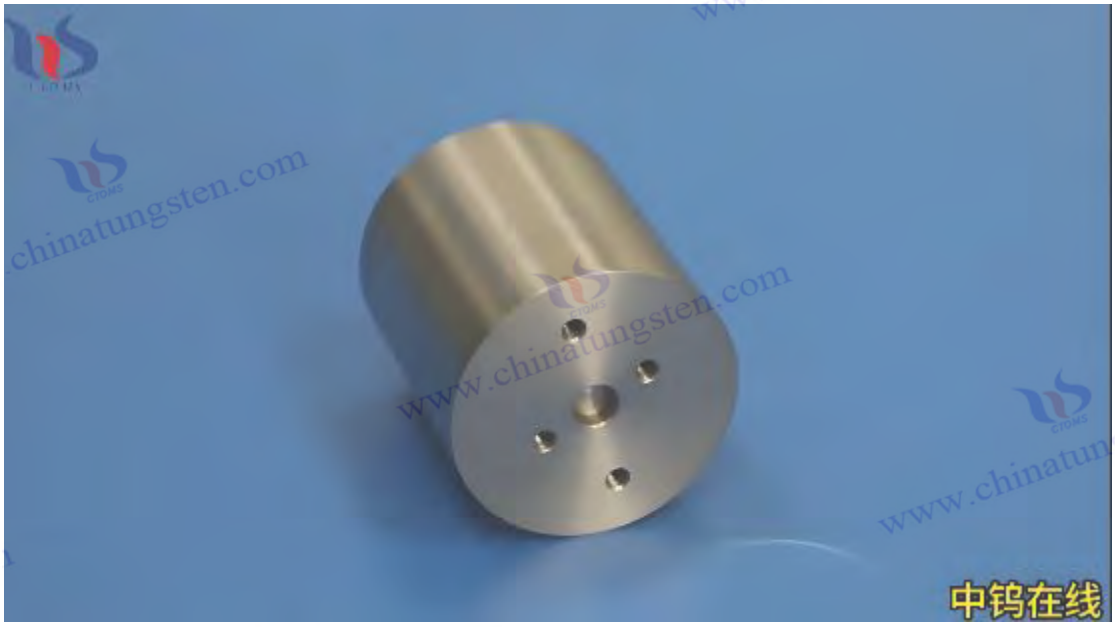
Johnson, M. et al. (2023). Risques géopolitiques dans la chaîne d'approvisionnement du tungstène : scénarios et stratégies d'atténuation. Resource Policy, 87, 104123.

Li, Y., et al. (2025). Perceptions sociales de l'extraction et du recyclage du tungstène : une enquête mondiale. Journal of Environmental Psychology, 89, 102345.

Li Ying et al. (2025). Perceptions sociales de l'extraction et du recyclage du tungstène : une enquête mondiale. Journal of Environmental Psychology, 89, 102345.

Association internationale de l'industrie du tungstène (ITIA). (2024). Tungstène 2030 : Tendances futures en matière de technologie et de durabilité.

Association internationale de l'industrie du tungstène (ITIA). (2024). Tungstène 2030 : Tendances futures en matière de technologie et de durabilité.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

100 faits intéressants sur la poudre de tungstène

1. Propriétés physiques et chimiques de base

Caractéristiques du point de fusion de la poudre de tungstène

3422 ℃ (corps fritté en poudre de tungstène pur), le plus élevé parmi les poudres métalliques.

Paramètres de densité de la poudre de tungstène

La densité théorique est de 19,25 g/cm³ et la valeur mesurée est affectée par la porosité (4-18 g/cm³).

Conductivité thermique de la poudre de tungstène

173 W/m·K (corps fritté dense), supérieur à l'alliage de titane (7 W/m·K).

Plage de résistivité de la poudre de tungstène

$5,6\times10^{-8}$ Ω·m（20 ℃ ）, et augmente avec l'augmentation de la teneur en oxygène.

Coefficient de dilatation thermique de la poudre de tungstène

$4,5\times10^{-6}$ /K (25-1000 ℃), puces de silicium correspondantes.

Dureté Mohs de la poudre de tungstène

7,5 (état vert pressé), proche du corindon (9).

Norme de classification granulométrique de la poudre de tungstène

Poudre grossière (＞10 μm), poudre fine (1-10 μm), poudre ultrafine (＜1 μm).

Indice de surface spécifique de la poudre de tungstène

La poudre de tungstène ultrafine (100 nm) atteint 5 à 50 m²/g, améliorant considérablement l'activité catalytique.

Méthode d'essai de fluidité de la poudre de tungstène

Débitmètre à effet Hall (ASTM B213), poudre sphérique ≤ 25 s/50g.

Différences de densité apparente de la poudre de tungstène

La poudre non sphérique est de 4 à 6 g/cm³, la poudre sphérique est de 8 à 10 g/cm³.

2. Propriétés et réactions chimiques

Comportement à l'oxydation de surface de la poudre de tungstène

Une couche de WO_3 de 1 à 3 nm est générée à température ambiante et s'oxyde rapidement en poudre au-dessus de 500 °C.

Résistance à la corrosion acide de la poudre de tungstène

dans 98 % de H_2SO_4 est inférieure à 0,01 mm/an.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Résistance à la corrosion alcaline de la poudre de tungstène
avec une solution de NaOH à 30 % à température ambiante, mais génère du tungstate dans l'alcali fondu.

Réaction halogène de la poudre de tungstène
Il réagit violemment avec F_2 à température ambiante pour produire du WF_6 gazeux.

Tendance à la carburation de la poudre de tungstène
À 1400 °C, il réagit avec le carbone pour former du carbure de tungstène (WC) d'une dureté HV 2200.

Réaction de réduction de l'hydrogène de la poudre de tungstène
$WO_3 + 3H_2 \rightarrow W + 3H_2O$ (700-1100 ℃).

Modification par nitruration de la poudre de tungstène
Le traitement au plasma produit une couche WN avec une dureté de surface de HV 2200.

Caractéristiques de combustion spontanée de la poudre de nano-tungstène
Lorsque la taille des particules est inférieure à 50 nm, elles s'enflamment spontanément dans l'air et nécessitent une protection à l'argon.

Niveau de toxicité de la poudre de tungstène
L'inhalation de poussière peut provoquer une pneumoconiose et la limite OSHA est de 5 mg/m^3.

Technologie de contrôle des impuretés d'oxygène de la poudre de tungstène
Le recuit sous vide rend la teneur en oxygène inférieure à 0,005 %.

3. Technologie et équipement de production
Types de minerai brut de poudre de tungstène
Wolframite ($(Fe,Mn)WO_4$) et scheelite ($CaWO_4$).

Taux de récupération de la poudre de tungstène
Procédé combiné séparation par gravité → séparation magnétique → flottation, avec un taux de récupération de 85% à 90%.

Procédé de préparation de la poudre de tungstène APT
Le paratungstate d'ammonium (APT) est extrait par la méthode de fusion alcaline avec une pureté de 99,95 %.

Procédé de réduction de l'hydrogène de la poudre de tungstène
Réduction en deux étapes (600 ℃ → 900 ℃), pureté $H_2 \geq 99,999$ %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

La tendance à la réduction du carbone et à l'élimination de la poudre de tungstène
En raison des émissions élevées de CO et de la consommation d'énergie, il est progressivement remplacé par la réduction à l'hydrogène.

Technologie de préparation CVD de la poudre de tungstène
Le dépôt chimique en phase vapeur produit des poudres ultrafines avec une précision de taille de particules de ± 5 nm.

Procédé d'atomisation plasma de poudre de tungstène
Atomisation à l'argon, température > 20 000 ℃, sphéricité > 98 %.

Défauts du broyage à billes à haute énergie de la poudre de tungstène
Des impuretés de Fe (< 0,1 %) sont introduites et un lavage acide et une purification sont nécessaires.

Limites de la préparation électrolytique de la poudre de tungstène
Coût élevé (1 000 $/kg), utilisé uniquement pour la poudre de haute pureté de qualité semi-conductrice.

Technologie de classification granulométrique de la poudre de tungstène
Tamisage par flux d'air (1-100 μm) et classification centrifuge (＜1 μm).

4. Technologie de détection et d'analyse

Méthode de détection de la teneur en oxygène de la poudre de tungstène
Méthode de fusion sous gaz inerte, précision de 0,001 % en poids.

Test de distribution granulométrique de la poudre de tungstène
Méthode de diffraction laser (plage 0,1-1000 μm).

Analyse morphologique SEM de la poudre de tungstène
Observer la sphéricité, les défauts de surface et l'agglomération.

Test de surface spécifique BET de la poudre de tungstène
Méthode d'adsorption N_2, poudre ultrafine > 10 m^2 / g.

Norme de détermination de la densité de la poudre de tungstène
Méthode d'Archimède (le milieu est l'éthanol anhydre).

Analyse de phase XRD de la poudre de tungstène
Détecter les phases d'impuretés telles que WO_3 (teneur < 0,1 %).

Détection d'oligo-éléments dans la poudre de tungstène par ICP-MS

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Les métaux alcalins tels que Na et K sont contrôlés au niveau ppb.

Analyse de surface XPS de la poudre de tungstène
L'épaisseur de la couche d'oxyde est de 1 à 3 nm (WO_3).

Test de porosité par intrusion de mercure sur poudre de tungstène
Répartition de la taille des pores : 0,003-360 μm.

Test du débitmètre à effet Hall sur la poudre de tungstène
Classification de fluidité (ASTM B213).

5. Technologie de modification de surface

Traitement de la poudre de tungstène avec un agent de couplage au silane
Améliore la force de liaison avec la matrice polymère, résistance au cisaillement +50%.

Activation plasma de la poudre de tungstène
L'énergie de surface augmente jusqu'à 60 mN/m et la mouillabilité s'améliore.

Procédé de nickelage chimique de la poudre de tungstène
L'épaisseur du revêtement est de 1 à 5 μm et la résistivité est réduite de 30 %.

Revêtement de paraffine de poudre de tungstène pour éviter l'oxydation
Gain de poids de 0,5 à 2 % et durée de conservation prolongée à 2 ans.

Nitruration par pulvérisation cathodique magnétron de poudre de tungstène
Une couche WN (dureté HV 2200) est produite.

VI. Réglementation de stockage et de manutention

Conditions de stockage antioxydantes de la poudre de tungstène
Scellé sous argon (O_2 ＜ 10 ppm) ou emballé sous vide.

Mesures antidéflagrantes pour la poudre de nano-tungstène
Récipient antistatique + remplissage de gaz argon (pression 0,1 MPa).

Contrôle de la poussière de poudre de tungstène en atelier
Collecte humide ou aspiration locale à pression négative (vitesse du vent ≥ 0,5 m/s).

Classification internationale du transport de la poudre de tungstène
UN3178 (Classe 4.1 solide inflammable).

Procédé de récupération par dissolution acide des déchets de poudre de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

HNO_3 + H_2O_2 dissous, taux de récupération > 98 %.

7. Poudre de tungstène de forme spéciale

Préparation de poudre de tungstène sphérique par atomisation au plasma
Fluidité ≤25 s/50g, taux de billes creuses <0,1%.

Technologie de formation de pores à partir de poudre de tungstène poreux
La méthode du gabarit permet d'obtenir une porosité de 30 à 70 % et une surface spécifique de 5 à 50 m^2/g.

Synthèse par vapeur laser de poudre de nano-tungstène
Taille des particules < 50 nm, surface spécifique > 20 m^2 / g.

Préparation de poudre de paillettes de tungstène par broyage à billes à haute énergie
Rapport diamètre/épaisseur > 20:1, utilisé pour les revêtements conducteurs.

Procédé de revêtement de poudre de tungstène à structure cœur-coquille
Noyau-coque en tungstène@carbone (couche de carbone 5-20 nm), la température de résistance à l'oxydation est augmentée à 800 ℃.

8. Mécanisme de contrôle des performances

Effet de la taille de la poudre de tungstène sur la température de frittage
La température de frittage de la poudre fine (＜1 μm) est réduite de 200 à 300 ℃.

Relation entre la sphéricité et la fluidité de la poudre de tungstène
Lorsque la sphéricité est supérieure à 95%, la fluidité augmente de 3 fois.

Effet de la teneur en oxygène de la poudre de tungstène sur la conductivité électrique
Lorsque l'oxygène est inférieur à 0,01 %, la résistivité chute à 5×10^{-8} Ω·m.

Corrélation entre la porosité et la résistance de la poudre de tungstène
Lorsque la porosité est de 10 %, la résistance à la compression diminue de 40 %.

Effet de la rugosité de la surface de la poudre de tungstène sur la mouillabilité
Lorsque Ra est inférieur à 0,1 μm, l'angle de contact diminue de 30°.

9. Paramètres de base de l'application

Exigences relatives à la poudre de tungstène pour l'impression 3D
Sphéricité > 95 %, oxygène < 0,02 %, taille des particules 15-45 μm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Poudre de tungstène pour support de catalyseur
Surface spécifique > 20 m²/g, taille des pores 2-50 nm.

Conductivité thermique de la poudre de tungstène pour l'emballage électronique
>150 W/m·K, CTE 4,5-6×10 $^{-6}$ /K.

Densité de la poudre de tungstène pour les matériaux de blindage
Densité de remplissage > 17 g/cm³ (1,5 fois celle du plomb).

Pureté de la poudre de tungstène pour cible de pulvérisation
＞99,995 %, taille moyenne des particules 3-10 μm.

10. Système de marché et de normes

Norme internationale pour la poudre de tungstène : ASTM B777
Classification F-00 à F-06 (granulométrie et utilisation).

Système de classement de poudre de tungstène en Chine
FW-1 (poudre normale), FW-0,5 (poudre ultrafine).

Gradient de prix de la poudre de tungstène
Poudre ordinaire 300-350/kg, poudre de nano-tungstène 330-500/kg, poudre nano-tungstène haute pureté 500-1200/kg, poudre de tungstène sphérique 1300~

Exigences de certification environnementale pour la poudre de tungstène
Conforme RoHS (Pb < 0,1%) et REACH.

Politique de contrôle des exportations de poudre de tungstène
La Chine met en œuvre une gestion des licences d'exportation pour les nanomètres.

11. Défis techniques et solutions

Problème d'agglomération dure de la poudre de nano-tungstène
Les modificateurs de surface (tels que le PEG) réduisent le taux d'agrégation de > 50 %.

Difficultés de contrôle des impuretés d'oxygène dans la poudre de tungstène ultrafine
Traitement de réduction du vide + passivation, oxygène < 0,005 %.

Le goulot d'étranglement du coût élevé de la poudre de tungstène sphérique
La consommation d'énergie de l'atomisation au plasma est de 80 à 120 $/kg et une réduction des coûts est nécessaire à grande échelle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Classification granulométrique inefficace des poudres fines
Le criblage assisté par ultrasons augmente l'efficacité jusqu'à 85 %.

Dégradation des performances de la poudre de tungstène recyclée
Le lavage acide + la réduction à l'hydrogène restaurent l'activité de frittage à 90 %.

12. Application de technologies de pointe

Application catalytique de la poudre de nano-tungstène
La poudre de 10 nm catalyse un taux de conversion du H_2S de +40 % (désulfuration du pétrole).

Technologie d'impression 4D de poudre de tungstène
Poudre composite tungstène-polymère sensible à la température, précision de déformation 0,1%/°C.

Préparation de points quantiques de tungstène-soufre
Efficacité lumineuse 85 % (longueur d'onde 450 nm), utilisée pour l'affichage QLED.

Expérience de fabrication de poudre de tungstène dans l'espace
Poudre sans défaut préparée dans un environnement de microgravité, résistance +20%.

Application médicale de la poudre de tungstène dégradable
90 % (du matériau du stent) se dégrade dans le corps en 3 ans.

Application de la poudre de tungstène dans les réacteurs de fusion nucléaire
Le premier blindage de paroi est résistant à l'érosion plasma (>10 MW/m^2).

Développement d'un catalyseur énergétique à base d'hydrogène à base de poudre de tungstène
Améliorer l'efficacité des piles à combustible à 65 %.

Performances en fibre de carbone renforcée par de la poudre de tungstène
Résistance à la traction 5 GPa (pièces structurelles aérospatiales).

Matériau composite en poudre de tungstène à réponse intelligente
Déformation déclenchée par la lumière/la chaleur (matériau furtif militaire).

Le potentiel informatique quantique de la poudre de tungstène
En tant que matériau de substrat pour les bits quantiques supraconducteurs.

13. Environnement et réglementation

Normes relatives aux eaux usées pour la production de poudre de tungstène
La norme chinoise GB 8978 exige que la teneur en tungstène soit ≤ 0,1 mg/L.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Réduction du carbone dans les procédés de réduction de l'hydrogène
Émissions de CO_2 de 50 % par rapport à la réduction du carbone.

Prévention des maladies professionnelles dans l'atelier de poudre de tungstène
Port obligatoire du masque N95 + tests réguliers de la fonction pulmonaire.

Exigences du règlement REACH de l'UE
Soumettre un rapport complet d'évaluation du cycle de vie de la poudre de tungstène.

Gestion de la traçabilité des minéraux de conflit
Le minerai de tungstène en République démocratique du Congo doit être certifié par l'OCDE.

Traitement inoffensif des scories de tungstène
Technologie de vitrification, taux de lixiviation des métaux lourds <1%.

Calcul de l'empreinte carbone de la poudre de tungstène
Du CO_2 est émis par kilogramme de production (méthode de réduction de l'hydrogène).

Avantages d'un système de recyclage en boucle fermée
La consommation de minerai primaire est réduite de 30 % et la consommation d'énergie est réduite de 40 %.

Étude sur l'écotoxicité de la poudre de nano-tungstène
Poisson LC50＞100 mg/L (faible toxicité).

Exigences d'assurance pour le transport de poudre de tungstène
Les solides inflammables doivent être assurés séparément (taux de 0,3% à 0,5%).

14. Histoire et tendances futures

Origine industrielle de la poudre de tungstène
En 1909, General Electric le produit pour la première fois en série (pour les filaments).

Militarisation de la poudre de tungstène pendant la Seconde Guerre mondiale
80 % de la production est utilisée pour la fabrication de balles perforantes.

L'essor de l'industrie chinoise de la poudre de tungstène
Dépendance aux importations dans les années 1950 → 85 % du total mondial en 2023.

La promesse de la poudre de tungstène dans l'exploitation minière spatiale
Le coût d'exploitation des ressources en tungstène sur les astéroïdes pourrait être inférieur à celui sur Terre.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Prévisions du marché de la poudre de tungstène

- La taille du marché mondial devrait atteindre XX milliards de dollars d'ici 2030 (TCAC 6,5 %).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Annexe :

Normes et spécifications internationales de la poudre de tungstène (ASTM, ISO, GB/T, Allemagne, Japon, Corée du Sud, Russie, etc.)

En tant que matière première industrielle essentielle, la qualité, les performances et l'application de la poudre de tungstène sont strictement réglementées par des normes internationales et nationales. Ces normes couvrent la composition chimique, la granulométrie, les propriétés physiques, le processus de production et les méthodes d'essai de la poudre de tungstène afin de garantir sa cohérence et sa fiabilité dans la chaîne d'approvisionnement mondiale. Cette annexe répertorie de manière systématique les normes applicables à la poudre de tungstène dans les principaux pays et régions, notamment les États-Unis (ASTM), l'Organisation internationale de normalisation (ISO), la Chine (GB/T), l'Allemagne (DIN), le Japon (JIS), la Corée du Sud (KS) et la Russie (GOST), afin de servir de référence aux chercheurs, ingénieurs et professionnels du secteur. Le contenu suivant est basé sur les normes et tendances les plus récentes au 4 avril 2025.

1 Norme américaine (ASTM International)

ASTM International est un organisme de normalisation des matériaux reconnu mondialement. Ses normes relatives aux poudres de tungstène sont principalement élaborées par le Comité B10 (Métaux réactifs et réfractaires et leurs alliages), largement utilisées dans l'aérospatiale, l'électronique et la métallurgie des poudres. Voici les principales normes :

ASTM B329-20 (édition révisée 2020) : *Méthode d'essai standard pour la masse volumique apparente des poudres métalliques réfractaires*

Décrit la méthode de détermination de la masse volumique apparente de la poudre de tungstène à l'aide d'un débitmètre à effet Hall, applicable aux poudres de granulométrie comprise entre 1 et 150 μm, avec une précision de ± 0,01 g/cm³. La norme B329-25 pourrait être mise à jour en 2025 pour inclure des spécifications d'essai pour les poudres de nano-tungstène (< 50 nm).

ASTM B761-17 (édition révisée 2017) : *Spécification standard pour les produits de métallurgie des poudres à base de tungstène et d'alliages de tungstène*

La pureté de la poudre de tungstène (> 99,9 %), les limites d'impuretés (O < 0,05 % en poids, C < 0,01 % en poids) et la granulométrie (D50 < 10 μm) sont spécifiées. La révision de 2025 (B761-25) devrait renforcer les exigences de durabilité pour la poudre de tungstène recyclée.

ASTM E159-22 (révisé en 2022) : *Méthodes d'essai standard pour l'analyse chimique des poudres métalliques*

Fournir des méthodes d'analyse spectrale pour les éléments traces (tels que Fe, Mo) dans la poudre de tungstène, avec une limite de détection inférieure à 10 ppm. En 2025, cette technologie pourrait être étendue à la spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ASTM F288-19 (édition révisée 2019) : *Spécifications pour la poudre de tungstène et les produits en tungstène*

Pour l'application de poudre de tungstène de haute pureté (> 99,99 %) dans les dispositifs électroniques et médicaux, la granulométrie doit être inférieure à 5 µm et la fluidité supérieure à 20 s/50 g. Les prochaines révisions pourraient se concentrer sur la poudre de tungstène pour l'impression 3D.

Tendance : les normes ASTM mettent l'accent sur la précision et l'orientation vers l'application des méthodes de test et pourraient intégrer davantage l'analyse assistée par l'IA et les exigences de production verte après 2025.

2 Organisation internationale de normalisation (ISO)

Les normes ISO sont élaborées par le comité technique TC 119 (Métallurgie des poudres) afin d'harmoniser les spécifications mondiales des poudres de tungstène et de faciliter le commerce international et les échanges techniques. Voici les principales normes :

ISO 4491-1:2023 : *Poudres métalliques -- Détermination de la masse volumique apparente -- Partie 1 : Méthode de l'entonnoir*

Similaire à la norme ASTM B329, elle s'applique à l'essai de masse volumique apparente de la poudre de tungstène (2-10 g/cm³). Elle pourrait être révisée en ISO 4491-1:2025 en 2025 pour y ajouter des conditions d'essai pour les nanopoudres.

ISO 3252:2019 : *Métallurgie des poudres – Terminologie*

Cette norme définit les termes relatifs à la poudre de tungstène (tels que la distribution granulométrique et la surface spécifique) afin de servir de base à d'autres normes. Elle pourrait être mise à jour en 2025 pour inclure la terminologie relative à la poudre de tungstène pour la technologie quantique.

ISO 4884:2024 : *Méthodes d'échantillonnage et d'essai des poudres de carbure cémenté*

Comprend la composition chimique (W > 90 % en poids) et les tests de propriétés physiques de la poudre de tungstène et des alliages à base de tungstène. La révision de 2025 devrait inclure une évaluation des émissions de carbone.

ISO 22068:2022 : *Spécifications pour les matériaux frittés pour la métallurgie des poudres*

Réglementer indirectement la qualité de la poudre de tungstène (par exemple, la pureté > 99,95 %) et, à l'avenir, peut être étendu aux normes de recyclage de la poudre de tungstène recyclée.

Tendance : Les normes ISO privilégient l'universalité et l'internationalisation. À l'avenir, elles pourraient être davantage alignées sur celles de l'ASTM et du GB/T afin de renforcer les exigences en matière de durabilité.

3 Norme nationale chinoise (GB/T)

La Chine est le premier producteur mondial de poudre de tungstène. Ses normes GB/T sont élaborées par le Comité technique national de normalisation des métaux non ferreux (SAC/TC 243) et se divisent en normes obligatoires (GB) et recommandées (GB/T). Voici les principales normes :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

GB/T 3458-2020 : Poudre de tungstène
La norme spécifie la pureté (99,9 %-99,999 %), la granulométrie (0,1-100 μm) et les limites d'impuretés (O < 0,1 % en poids, Fe < 0,05 % en poids) de la poudre de tungstène. Elle pourrait être révisée en 2025 pour devenir la norme GB/T 3458-2025, ajoutant la spécification de la poudre de tungstène ultrafine (< 50 nm).

GB/T 4197-2019 : Méthode de détermination de la granulométrie de la poudre de tungstène et de la poudre de carbure de tungstène
La méthode de diffraction laser permet de déterminer la distribution granulométrique (précision ± 0,1 μm), ce qui est adapté à la métallurgie des poudres et au carbure cémenté. La mesure de surface BET pourrait être intégrée ultérieurement.

GB/T 26040-2023 : Méthode d'analyse chimique de la poudre de tungstène
Fournit des méthodes de détermination pour W, O, C et d'autres éléments dans la poudre de tungstène (limite de détection < 5 ppm), qui peuvent être mises à jour vers GB/T 26040-2025 en 2025 et inclure des indicateurs de production verte.

GB/T 42915-2022 : Conditions techniques pour le recyclage de la poudre de tungstène
La pureté (> 99,8 %) et les performances de la poudre de récupération de tungstène de rebut sont normalisées, et il est prévu que la révision de 2025 augmentera les exigences en matière de taux de récupération (> 80 %).
Tendance : Les normes GB/T sont étroitement liées aux atouts industriels de la Chine. À l'avenir, elles renforceront les exigences en matière de protection de l'environnement et d'économie circulaire et s'aligneront sur les normes internationales.

Norme allemande (DIN)

Les normes allemandes sont élaborées par l'Institut allemand de normalisation (DIN), axées sur les applications de haute précision et d'ingénierie, et sont particulièrement influentes sur le marché européen. Les normes suivantes sont pertinentes :

DIN 51001:2021 : *Méthodes d'analyse chimique des poudres métalliques*
Fournir des méthodes d'analyse par fluorescence X (XRF) et ICP pour les impuretés (telles que Fe et Ni) dans la poudre de tungstène, avec une limite de détection inférieure à 10 ppm. Cette norme pourrait être mise à jour en 2025 pour inclure l'analyse de la poudre de tungstène nanométrique.

DIN EN 23908:2020 : *Détermination de la granulométrie des poudres de métaux durs*
Compatible avec la norme ISO 4491, applicable aux essais granulométriques de poudre de tungstène (1-50 μm). Des spécifications pour les poudres d'impression 3D pourraient être ajoutées lors de révisions ultérieures.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

DIN 30910-3:2023 : *Spécifications pour les matériaux frittés à base de tungstène - Partie 3 : Exigences relatives aux poudres*
La pureté (> 99,95 %) et la fluidité (> 25 s/50 g) de la poudre de tungstène sont spécifiées et pourraient être étendues aux applications aérospatiales en 2025.
Tendance : les normes DIN mettent l'accent sur les détails techniques et la compatibilité avec le marché européen et pourraient être profondément intégrées à l'ISO à l'avenir.

5 Norme japonaise (JIS)

Les normes industrielles japonaises (JIS) sont élaborées par la Commission japonaise des normes industrielles (JISC) et sont largement utilisées dans les secteurs de l'électronique et de l'automobile. Voici les principales normes :

JIS H 5762:2022 : *Spécifications pour la poudre de tungstène et la poudre d'alliage de tungstène*
La pureté (> 99,9 %), la granulométrie (0,5-50 µm) et la teneur en impuretés (0 < 0,05 % en poids) de la poudre de tungstène sont spécifiées. La norme JIS H 5762-2025 pourrait être révisée en 2025, ajoutant des exigences de pureté élevée (> 99,999 %).

JIS Z 8801-1:2020 : *Méthode de détermination de la granulométrie des poudres - Partie 1 : Méthode par diffraction laser*
Convient aux tests de distribution granulométrique de poudre de tungstène (précision ± 0,05 µm) et peut intégrer des tests de nanopoudre à l'avenir.

JIS H 6201:2023 : *Méthode d'analyse chimique de la poudre de tungstène*
Fournit des méthodes de détermination pour des éléments tels que W, Mo et Fe (limite de détection < 10 ppm), qui peuvent être mises à jour vers une analyse à haut débit en 2025.
Tendance : les normes JIS se concentrent sur la haute pureté et les applications électroniques, et pourraient renforcer les réglementations liées à la technologie quantique à l'avenir.

6 Norme coréenne (KS)

La norme coréenne (KS) est élaborée par l'Agence coréenne pour la technologie et les normes (KATS) et a été améliorée ces dernières années avec l'essor de l'industrie du tungstène. Voici les normes applicables :

KS D 9502:2021 : *Exigences techniques pour la poudre de tungstène*
La pureté (> 99,9 %), la granulométrie (1-100 µm) et la teneur en impuretés (0 < 0,1 % en poids) de la poudre de tungstène sont spécifiées. La norme pourrait être révisée en 2025, ajoutant des exigences relatives au recyclage de la poudre de tungstène.

KS D 2570:2020 : *Méthode de détermination de la granulométrie des poudres métalliques*
La méthode de diffusion laser est utilisée pour tester la taille des particules de poudre de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(précision ± 0,1 μm), qui pourra être comparée à la norme ISO 4491 à l'avenir.

KS D 9510:2023 : *Spécification pour la poudre d'alliage à base de tungstène*
Applicable à la métallurgie des poudres et au carbure cémenté, et pourrait être étendu à de nouvelles applications énergétiques en 2025.
Tendance : Les normes KS sont influencées par la Chine et le Japon. À l'avenir, elles renforceront leur internationalisation et privilégieront une production plus verte.

7 Norme russe (GOST)

Les normes d'État russes (GOST) sont gérées par le Service fédéral russe de réglementation technique et de métrologie et s'appliquent aux pays de la CEI. Voici les principales normes :

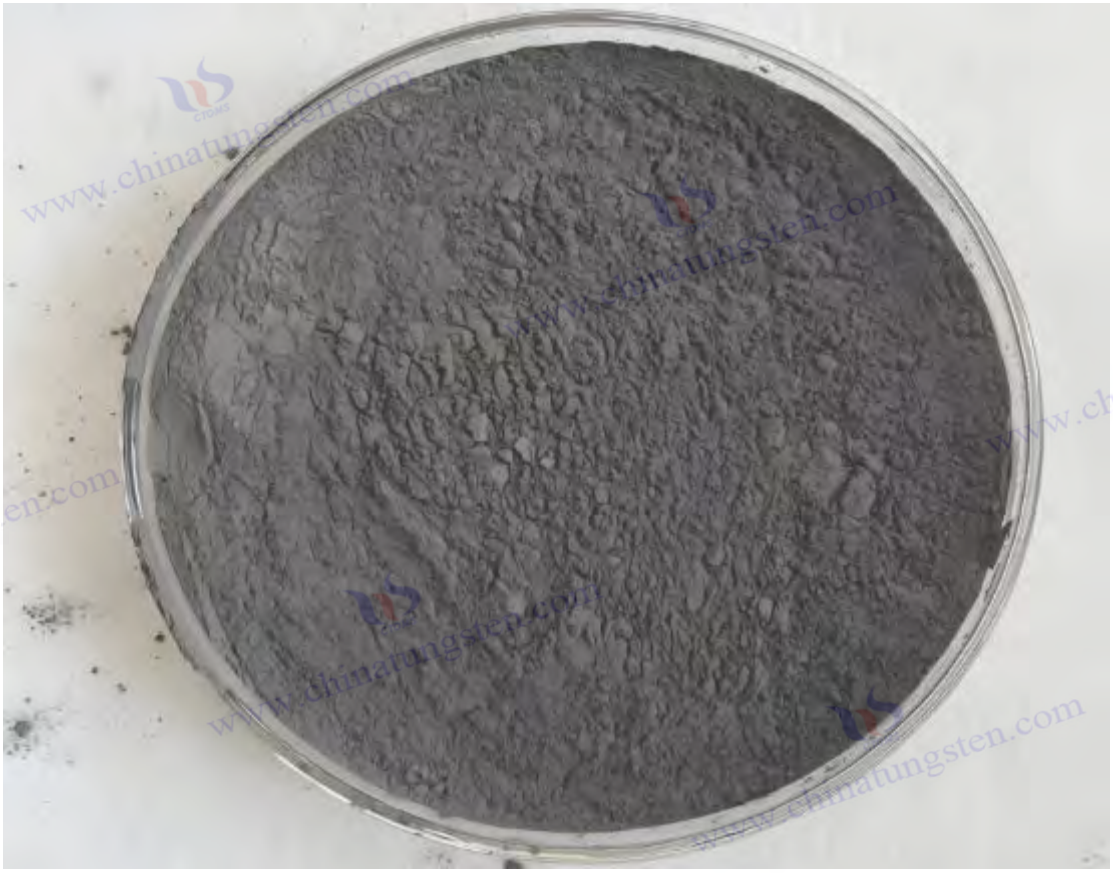
GOST 14316-91 (édition 1991, révisée en 2023) : *Poudre de tungstène*
La pureté (> 99,9 %), la granulométrie (1-50 μm) et la teneur en impuretés (0 < 0,05 % en poids) de la poudre de tungstène sont spécifiées. La norme GOST 14316-2025 pourrait être mise à jour en 2025 pour inclure les spécifications relatives à la poudre de nano-tungstène.

GOST 25501-82 (édition 1982, révisée en 2022) : *Méthodes d'analyse chimique des poudres métalliques*
Fournit une méthode pour déterminer W, Fe et C dans la poudre de tungstène (limite de détection < 20 ppm), et des techniques analytiques modernes peuvent être utilisées à l'avenir.

GOST 28377-89 (édition 1989, révisée en 2024) : *Spécifications pour les poudres destinées à la métallurgie des poudres*
La qualité de la poudre de tungstène sera régulée indirectement et les exigences en matière d'applications aéronautiques pourraient être augmentées en 2025.
Tendance : les normes GOST sont mises à jour lentement et, à l'avenir, elles pourraient s'inspirer des normes ISO et ASTM pour améliorer leur niveau de modernisation.

8 Comparaison et tendances entre les normes
Cohérence : ASTM, ISO et GB/T sont très cohérents dans les tests de granulométrie et les méthodes d'analyse chimique (telles que la diffraction laser, ICP-MS), mais les limites spécifiques varient en fonction de l'application.
Différences : ASTM et JIS se concentrent davantage sur la haute pureté et les applications de pointe (telles que l'électronique, la technologie quantique), GB/T et KS mettent l'accent sur le contrôle de la production et des coûts, DIN se concentre sur la précision de l'ingénierie et GOST s'adresse aux industries traditionnelles.
Tendances futures : de 2025 à 2030, les normes nationales auront tendance à être vertes (production à faible émission de carbone, recyclage), intelligentes (tests assistés par IA) et nano (spécification de poudre < 50 nm), et l'ISO pourrait devenir le cœur de la coordination.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ASTM B761-17 (édition révisée 2017)
Spécification standard pour les produits de métallurgie des poudres de tungstène et d'alliages de tungstène

1. Portée

La norme ASTM B761-17 spécifie les exigences techniques applicables aux produits en tungstène et alliages de tungstène fabriqués par métallurgie des poudres, notamment la composition chimique, les propriétés physiques, les tolérances dimensionnelles et les méthodes d'essai du tungstène pur (W) et des alliages à base de tungstène (tels que W-Mo, W-Re). Cette norme s'applique aux produits frittés ou transformés à chaud, sous forme de barres, de plaques, de fils et autres formes, largement utilisés dans les environnements à haute température (tels que les aubes de turbines d'aviation, les contrepoids de missiles) et les dispositifs électroniques (tels que les émetteurs cathodiques). La norme ne couvre pas la préparation initiale de la poudre de tungstène, mais définit des exigences claires concernant les performances finales des produits issus de la métallurgie des poudres.

2. Documents référencés

Cette norme fait référence à plusieurs méthodes d'essai et spécifications ASTM afin de garantir la cohérence et la traçabilité. Parmi les principales caractéristiques figurent :
ASTM B329 : Méthode d'essai standard pour la densité apparente des poudres métalliques réfractaires.
ASTM E8/E8M : Méthodes d'essai de traction pour matériaux métalliques.
ASTM E29 : Spécification des chiffres significatifs des données d'inspection et d'essai.
ASTM E159 : Méthodes d'essai standard pour l'analyse chimique des poudres métalliques.
ASTM E407 : Examen microscopique des métaux et alliages.
Ces références fournissent une base technique pour les tests de performance des produits en tungstène et en alliage de tungstène.

3. Terminologie

Les termes clés sont définis dans la norme pour garantir une terminologie uniforme :
Produits de métallurgie des poudres : Matériaux solides fabriqués par pressage et frittage de poudre de tungstène ou de poudre d'alliage de tungstène.
Densité frittée : Densité réelle du matériau après frittage (g/cm³), généralement proche de la densité théorique (19,25 g/cm³ pour W).
Alliage de tungstène : Matériau contenant du tungstène (W>50 % en poids) combiné à d'autres éléments (tels que Mo, Re, Ni).

4. Matériaux et fabrication

4.1 Besoins en matières premières

La poudre de tungstène ou la poudre d'alliage de tungstène doit répondre à des exigences de pureté élevées (W> 99,9 % pour le W pur) et être préparée par réduction à l'hydrogène, réduction au plasma ou d'autres méthodes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

La gamme de tailles de particules est généralement de 0,5 à 50 μm, ce qui est négocié par les parties de l'offre et de la demande, mais doit répondre aux exigences d'uniformité (D90/D10<2,5).

4.2 Processus de fabrication

Pressage : Utiliser le pressage isostatique à froid (CIP, pression > 200 MPa) ou le moulage par compression, et la densité pressée est > 60 % de la densité théorique.

Frittage : réalisé sous atmosphère d'hydrogène ou sous vide (température 1800-2500°C), temps de frittage 2-10 heures, garantissant une porosité <5%.

Travail à chaud : forgeage, laminage ou étirage optionnels pour améliorer encore la densité (> 95 % de densité théorique) et les propriétés mécaniques.

5. Composition chimique

La norme spécifie les exigences de composition chimique du tungstène et des alliages de tungstène, comme suit :

Tungstène pur (type I) : W : ≥ 99,9 % en poids

Limite d'impureté (maximum) :

O : 0,05 % en poids, C : 0,01 % en poids, Fe : 0,01 % en poids, Mo : 0,02 % en poids, N : 0,005 % en poids

Autres éléments simples : < 0,01 % en poids

Alliage tungstène-molybdène (type II) : W : 70-95 % en poids, Mo : 5-30 % en poids

La limite d'impureté est la même que celle du tungstène pur.

Alliage tungstène-rhénium (type III) : W : 75-97 % en poids, Re : 3-25 % en poids

La limite d'impureté est la même que celle du tungstène pur.

Méthode d'essai : ASTM E159 ou analyse spectroscopique équivalente (ICP-OES ou GDMS), limite de détection < 10 ppm.

6. Propriétés physiques et mécaniques

6.1 Densité

Densité frittée : ≥18,5 g/cm³ (tungstène pur > 96 % de la densité théorique).

Densité traitée à chaud : ≥ 19,0 g/cm³ (> 98,5 % de densité théorique).

Méthode d'essai : ASTM B328 (méthode d'immersion dans l'eau, précision ±0,01 g/cm³).

6.2 Dureté

Fritté : ≥250 HV (dureté Vickers, charge 10 kg).

Traité à chaud : ≥ 300 HV.

Méthode d'essai : ASTM E92.

6.3 Propriétés de traction (facultatif pour l'état traité à chaud)

Résistance à la traction : ≥ 600 MPa (température ambiante).

Allongement : ≥ 5 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Méthode d'essai : ASTM E8/E8M (diamètre de l'échantillon 6-12 mm).

6.4 Microstructure

Taille des grains : ≤ 50 μm (fritté), ≤ 20 μm (traité à chaud).

Porosité : < 2 % (méthode au stéréomicroscope, ASTM E407).

Aucune fissure ni inclusion non métallique (grossissement 100x).

7. Dimensions et tolérances

Tiges : diamètre 5-100 mm, longueur 50-1000 mm, tolérance ±0,1 mm (traitées à chaud).

Plaque : épaisseur 0,5-50 mm, largeur ≤500 mm, longueur ≤1000 mm, tolérance ±0,05 mm.

Fil : diamètre 0,1-5 mm, tolérance ±0,02 mm.

Les formes spéciales sont négociées par les deux parties et doivent être conformes aux exigences du dessin.

8. Test et inspection

8.1 Contrôle de la composition chimique

Prélever 3 échantillons de chaque lot et les résultats d'analyse doivent être conformes aux exigences de la section 5.

En cas de non-qualification, un rééchantillonnage et des tests sont autorisés.

8.2 Test des propriétés physiques

Densité : Au moins 5 échantillons ont été testés par lot.

Dureté : Testez 3 points sur chaque surface du produit et prenez la valeur moyenne.

Propriétés de traction : 2 échantillons sont sélectionnés aléatoirement dans chaque lot.

8.3 Inspection de la microstructure

Au moins un échantillon de chaque lot subit une analyse métallographique pour garantir l'absence de défauts.

8.4 Essais non destructifs (facultatif)

Contrôle par ultrasons (ASTM E114) ou contrôle par rayons X (ASTM E94) pour vérifier les défauts internes.

9. Acceptation et certification

Critères d'acceptation : Les produits doivent répondre aux exigences de composition chimique, de propriétés physiques et de tolérance dimensionnelle.

Certificat de qualité : Les fournisseurs sont tenus de fournir un certificat contenant le numéro de lot, les résultats des tests et la conformité aux normes.

Traitement non conforme : Si le produit ne répond pas aux exigences, l'acheteur peut refuser de l'accepter ou négocier un retour.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

10. Emballage, marquage et expédition

Emballage : Les produits doivent être résistants à l'humidité et aux chocs, généralement emballés dans des boîtes en bois ou des conteneurs métalliques doublés de dessiccant.

Marquage : Chaque produit ou emballage doit être marqué avec :

Numéro de norme (ASTM B761-17).

Type de matériau (Type I, II, III).

Numéro de lot, dimensions, poids et date de production.

Transport : Évitez les environnements à haute température et à forte humidité pour garantir des performances stables du matériau.

11. Mots-clés

Poudre de tungstène, alliage de tungstène, métallurgie des poudres, frittage, composition chimique, propriétés physiques, matériaux haute température.

12. Annexe

Annexe X1 : Exemples d'applications typiques du tungstène et des alliages de tungstène (comme les contrepoids d'aviation, les cathodes électroniques).

Annexe X2 : Explication supplémentaire de la méthode d'essai (telle que l'analyse des erreurs de mesure de la densité).

13. Historique des révisions et perspectives d'avenir

Historique des révisions : La norme ASTM B761 a été publiée pour la première fois dans les années 1980 et l'édition 2017 a mis à jour les limites de composition chimique et les exigences de microstructure.

Perspectives d'avenir : Il est prévu que la révision de 2025 (B761-25) puisse ajouter :

Spécification de durabilité pour le recyclage de la poudre de tungstène (taux de recyclage > 50%).

Exigences de performance de la poudre de nano tungstène (<50 nm) en impression 3D.

Indicateurs de production verte (tels que les émissions de carbone < 2 kg CO_2 / kg).

Description détaillée

Composition chimique : La norme impose des limites strictes d'impuretés pour le tungstène pur et ses alliages afin de garantir des performances et une fiabilité à haute température dans les applications électroniques. L'alliage tungstène-rhénium (W-Re) est souvent utilisé dans les environnements à haute température en raison de l'effet renforçant du rhénium.

Propriétés physiques : La densité et la dureté sont des indicateurs clés, reflétant les effets du frittage et du traitement thermique. Les propriétés de traction ne sont requises que pour l'état traité à chaud, reflétant la diversité des scénarios d'application.

Processus de fabrication : Les paramètres de pressage et de frittage sont basés sur les pratiques de l'industrie (par exemple, température de frittage de 1800 à 2500 °C), ce qui permet une flexibilité pour s'adapter à différents équipements.

Méthode d'essai : Référence aux normes ASTM (telles que E8, E159) pour garantir la scientificité et la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

répétabilité du test.

Orienté application : la norme couvre les domaines de l'aviation, de la défense et de l'électronique, reflétant les besoins de haute technologie des produits de métallurgie des poudres de tungstène.

Support de données

La masse volumique (19,25 g/cm³) est la valeur théorique du tungstène pur. Les états fritté et traité à chaud doivent être proches de cette valeur.

La dureté (250-300 HV) et la résistance à la traction (> 600 MPa) sont basées sur les propriétés intrinsèques du tungstène et les effets du renforcement du traitement.

Les limites d'impuretés (par exemple O < 0,05 % en poids) font référence aux effets de l'oxydation à haute température (gain de poids d'oxydation < 0,1 mg/cm² à 2000 °C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ISO 3252:2019:
Métallurgie des poudres - Terminologie

1. Portée

La norme ISO 3252:2019 définit les termes fondamentaux du domaine de la métallurgie des poudres, couvrant les concepts liés aux poudres métalliques (comme la poudre de tungstène), à la préparation des poudres, au moulage, au frittage et aux produits finis. Cette norme s'applique à la recherche universitaire, à la production industrielle et au commerce international, et vise à uniformiser l'utilisation des termes afin d'éviter les malentendus liés aux différences linguistiques ou régionales. Elle couvre notamment les procédés de métallurgie des poudres pour des métaux tels que le tungstène, le fer, le cuivre, l'aluminium et leurs alliages, et s'applique à des secteurs tels que l'aérospatiale, l'automobile, l'électronique et l'énergie.

2. Références normatives

Cette norme ne fait pas directement référence à d'autres normes spécifiques, mais elle complète d'autres normes ISO relatives à la métallurgie des poudres (telles que ISO 4491 et ISO 4884) et fournit une base terminologique. Les définitions des termes connexes peuvent être rattachées aux normes terminologiques générales ISO (telles que la terminologie du management de la qualité ISO 9000:2015).

3. Termes et définitions

La norme ISO 3252:2019 classe les termes par ordre alphabétique, couvrant l'ensemble du processus de métallurgie des poudres. Voici une description détaillée des principaux termes, notamment des concepts clés liés à la poudre de tungstène :

3.1 Termes relatifs aux poudres

Poudre métallique : Ensemble de particules métalliques préparées par des méthodes physiques (atomisation, réduction, etc.) ou mécaniques (broyage, etc.), dont la granulométrie est généralement comprise entre 0,1 et 1 000 µm. Par exemple, la poudre de tungstène est souvent préparée par réduction à l'hydrogène de WO_3.

Taille des particules : Diamètre équivalent d'une particule de poudre (µm), mesuré par tamisage, diffraction laser ou microscopie. La taille typique des particules de poudre de tungstène est de 0,5 à 50 µm.

Distribution granulométrique : Répartition en pourcentage des particules de différentes tailles dans une poudre, exprimée par D10, D50 et D90. Par exemple, la D50 (taille médiane des particules) de la poudre de tungstène est généralement comprise entre 1 et 10 µm.

Masse volumique apparente : Masse de poudre par unité de volume à l'état non compacté (g/cm³), reflétant les caractéristiques de tassement de la poudre. La masse volumique apparente de la poudre de tungstène est généralement comprise entre 2 et 10 g/cm³, selon la granulométrie et la morphologie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Masse volumique tassée : Masse de poudre par unité de volume après compactage par vibration (g/cm³), généralement supérieure de 10 à 30 % à la masse volumique apparente. La masse volumique tassée de la poudre de tungstène peut atteindre 10 à 12 g/cm³.

Fluidité : Temps (s/50 g) nécessaire à une poudre pour s'écouler à travers un entonnoir standard (tel qu'un débitmètre à effet Hall), reflétant son comportement lors du compactage. La fluidité de la poudre de tungstène est généralement de 20 à 40 s/50 g.

Surface spécifique : Surface totale par unité de masse de poudre (m²/g), mesurée par la méthode BET. La surface spécifique de la poudre de tungstène augmente lorsque la taille des particules diminue (par exemple > 10 m²/g pour < 1 μm).

Morphologie de la poudre : Caractéristiques de forme des particules de poudre, telles que sphériques, irrégulières ou polyédriques. La poudre de tungstène est généralement de forme irrégulière, et des particules sphériques peuvent être obtenues par atomisation.

3.2 Termes de préparation de la poudre

Réduction : Processus de conversion d'oxydes métalliques en poudres métalliques par des réactions chimiques (comme la réduction de WO_3 par H_2). Les températures courantes de production de poudre de tungstène sont de 600 à 1 000 °C.

Atomisation : Procédé de fragmentation du métal en fusion en fines particules au moyen d'un jet de gaz ou de liquide. Le point de fusion élevé du tungstène (3 422 °C) rend l'atomisation difficile.

Broyage mécanique : Procédé de conversion de morceaux de métal en poudre par broyage ou concassage, adapté au recyclage des déchets de tungstène.

Tamisage : Processus de séparation des particules de poudre à l'aide de tamis standard avec des tailles de maille allant de 0,045 à 1 mm.

3.3 Termes de formage et de compactage

Compactage : Processus consistant à placer de la poudre dans un moule et à appliquer une pression (par exemple, 200 à 800 MPa) pour former un corps cru. La densité compactée de la poudre de tungstène est généralement de 60 à 70 % de la densité théorique.

Pressage isostatique à froid (CIP) : méthode de pressage de poudre dans un milieu liquide avec une pression uniforme (> 200 MPa), adaptée aux produits en tungstène de forme complexe.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Compact vert : Corps en poudre qui a été pressé mais non fritté, avec une faible résistance (<10 MPa).
Densité verte : densité du corps vert (g/cm³). Par exemple, la densité du corps vert en tungstène est d'environ 11 à 13 g/cm³.

3.4 Termes de frittage

Frittage : Procédé de fusion de particules de poudre par chauffage (en dessous du point de fusion, par exemple entre 1 800 et 2 500 °C pour le tungstène) pour obtenir un état solide. Le frittage de poudre de tungstène nécessite un environnement sous hydrogène ou sous vide.

Densité frittée : La densité du produit fritté, généralement 90 à 98 % de la densité théorique (17,5 à 19,0 g/cm³ pour le tungstène).

Frittage en phase liquide : méthode d'introduction d'une phase liquide (telle que Ni, Co) pendant le processus de frittage pour favoriser la liaison des particules, qui convient aux alliages de tungstène.

Porosité : fraction volumique des pores dans le corps fritté (%). Les produits en tungstène doivent être < 5 %.

3.5 Conditions relatives aux produits et aux propriétés

Produit de métallurgie des poudres : produits métalliques solides fabriqués par pressage et frittage, tels que des tiges de tungstène et des plaques de tungstène.

Densité théorique : Densité d'un matériau complètement dense. Le tungstène pur est de 19,25 g/cm³.

Dureté : Capacité du matériau à résister à la déformation locale, exprimée en dureté Vickers (HV). La dureté du tungstène fritté est d'environ 250 à 300 HV.

Résistance à la traction : contrainte maximale (MPa) d'un matériau avant rupture sous tension. Le tungstène traité à chaud peut atteindre 600 à 1 000 MPa.

Granulométrie : Diamètre moyen des grains du corps fritté (μm). Les produits en tungstène mesurent généralement entre 10 et 50 μm.

3.6 Autres termes connexes

Dopage : Ajout d'oligo-éléments (tels que La, Re) à la poudre pour améliorer les performances. La poudre de tungstène dopée au La (0,5 à 2 % en poids) améliore la stabilité à haute température.

Poudre recyclée : Poudre métallique récupérée à partir de déchets, qui doit répondre à des exigences de pureté spécifiques (telles que W>99,8%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Retrait de frittage : Pourcentage de réduction de la taille du corps vert pendant le processus de frittage, qui est d'environ 15 à 20 % pour la poudre de tungstène.

4. Classification et notes

Classification : Les termes sont divisés en cinq catégories selon les caractéristiques de la poudre, le processus de préparation, le moulage, le frittage et les performances du produit pour une référence facile.
Remarque : Certains termes sont accompagnés d'explications, comme la note sur la « densité apparente » qui souligne sa relation avec la morphologie de la poudre et la distribution granulométrique ; la note sur le « frittage » souligne l'influence de la température et de l'atmosphère sur la liaison de la poudre de tungstène.

5. Champ d'application et exemples

Exemples liés à la poudre de tungstène :
« Poudre métallique » : Poudre de tungstène préparée par la méthode de réduction à l'hydrogène, granulométrie 1-10 μm, densité apparente 4-6 g/cm³.
« Fritté » : La poudre de tungstène est frittée à 2200°C dans une atmosphère H_2 jusqu'à une densité de 18,5 g/cm³.
« Produits de métallurgie des poudres » : Tiges en alliage tungstène-rhénium (W-5Re), résistance à la traction > 800 MPa.
Domaines d'application : Le terme s'applique aux carbures cémentés (tels que WC-Co), aux alliages haute température (tels que W-Mo), aux matériaux électroniques (tels que les cathodes en tungstène).

6. Équivalents multilingues

La norme fournit des termes anglais et leurs équivalents français et allemands pour garantir une utilisation internationale. Par exemple :
Poudre métallique : Poudre métallique (français), Metallpulver (allemand).
Frittage : Frittage (français), Sintern (allemand).
Taille des particules : Taille des particules (français), Partikelgr öß e (allemand).

7. Annexe

Annexe A (informative) : Un guide d'utilisation de la terminologie, fournissant un organigramme du processus de métallurgie des poudres et annotant la terminologie de chaque étape.
Annexe B (informative) : Tableau comparatif des propriétés courantes des poudres métalliques, y compris la densité apparente, la fluidité, etc. du tungstène (W), du fer (Fe) et du cuivre (Cu).

8. Historique des révisions et perspectives d'avenir

Historique des révisions : La norme ISO 3252 a été publiée pour la première fois dans les années 1970. L'édition 2019 met à jour la terminologie relative aux nanopoudres et aux poudres recyclées et remplace la norme ISO 3252:1992.
Perspectives d'avenir : Il est prévu que la révision de 2025 (ISO 3252:2025) puisse ajouter :
La technologie quantique utilise la terminologie de la poudre de tungstène (comme « poudre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

supraconductrice »).
Termes liés à la production verte (par exemple « empreinte carbone », « poudre durable »).
Terme désignant l'analyse de poudre assistée par l'IA (par exemple, « classement intelligent »).

Description détaillée

Exhaustivité de la terminologie : Cette norme couvre l'ensemble du processus de métallurgie des poudres, de la préparation de la poudre au produit final, et définit environ 100 termes, dont 30 sont directement liés à la poudre de tungstène.
Points forts de la poudre de tungstène : accent mis sur la densité élevée de la poudre de tungstène (19,25 g/cm³), les propriétés de frittage à haute température (> 1800 °C) et la diversité des applications (comme le carbure cémenté, l'électronique).
Base scientifique : La définition des termes est basée sur des principes physico-chimiques, tels que la densité apparente liée à la théorie de l'empilement des particules (modèle d'empilement serré aléatoire, fraction de remplissage ≈ 64%).
Internationalisation : le mappage et les annotations multilingues améliorent l'applicabilité mondiale de la norme.
Support de données
Distribution granulométrique : les paramètres tels que D50 et D90 font référence à la méthode de diffraction laser (ISO 13320), et les valeurs typiques de la poudre de tungstène sont basées sur les pratiques de l'industrie.
Masse volumique apparente : plage de 2 à 10 g/cm³ pour les poudres de tungstène issues des essais au débitmètre Hall (ISO 4491-1).
Densité frittée : 18,5-19,0 g/cm³ est proche de la valeur théorique, reflétant l'exigence de densification élevée du tungstène.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

GB/T 3458-2020
Poudre de tungstène

1. Portée

Cette norme spécifie les exigences techniques, les méthodes d'essai, les règles d'inspection et les exigences relatives au marquage, à l'emballage, au transport et au stockage de la poudre de tungstène. Elle s'applique à la poudre de tungstène préparée à partir de composés de tungstène (tels que l'oxyde de tungstène WO_3 ou le paratungstate d'ammonium APT) par réduction à l'hydrogène, réduction au plasma ou autres procédés. Elle est principalement utilisée pour la fabrication de carbures cémentés (tels que WC-Co), d'alliages à base de tungstène (tels que W-Mo, W-Re), de matériaux électroniques (tels que les émetteurs cathodiques) et de matériaux pour la fabrication additive (comme les pièces en tungstène imprimées en 3D). Cette norme ne couvre pas les exigences spécifiques de la poudre de carbure de tungstène ou d'autres composés de tungstène.

2. Références normatives

Les documents suivants fournissent un support technique pour la mise en œuvre de cette norme. Pour tout document référencé avec une date, seule la version portant cette date est applicable :

GB/T 1479.1-2011 : Détermination de la masse volumique apparente des poudres métalliques Partie 1 : Méthode de l'entonnoir.

GB/T 1482-2010 : Détermination de la fluidité des poudres métalliques - Méthode de l'entonnoir standard (méthode du débitmètre à effet Hall).

GB/T 4197-2019 : Méthode de détermination de la granulométrie de la poudre de tungstène et de la poudre de carbure de tungstène.

Série GB/T 4325 : Méthodes d'analyse chimique du tungstène (maintenant mise à jour vers GB/T 26040-2023).

GB/T 5314-2011 : Méthode d'échantillonnage de poudre pour la métallurgie des poudres.

GB/T 8170-2008 : Règles d'arrondi des valeurs et d'expression et de détermination des valeurs limites.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Poudre de tungstène : Un ensemble de particules de tungstène métallique préparées à partir de composés de tungstène par réduction ou d'autres procédés, avec une taille de particules comprise entre 0,1 et 100 μm.

Densité apparente : Masse de poudre de tungstène par unité de volume à l'état non comprimé (g/cm^3).

Fluidité : Temps nécessaire à la poudre de tungstène pour s'écouler à travers un entonnoir standard (s/50 g).

Répartition granulométrique : répartition en pourcentage des particules de différentes tailles dans la poudre de tungstène, exprimée par D10, D50 et D90.

4. Classification

Selon la taille des particules et l'objectif, la poudre de tungstène est divisée en quatre catégories :

FWP-1 : Poudre de tungstène ultrafine, granulométrie 0,1-1,0 μm, utilisée pour les composants

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

électroniques de haute précision et l'impression 3D.

FWP-2 : Poudre de tungstène fine, granulométrie 1,0-5,0 μm, utilisée pour le carbure cémenté et le revêtement à haute température.

FWP-3 : Poudre de tungstène moyenne, granulométrie de 5,0 à 10,0 μm, utilisée pour les produits de métallurgie des poudres conventionnels.

FWP-4 : Poudre de tungstène grossière, granulométrie 10,0-100,0 μm, utilisée pour les alliages de tungstène spéciaux et les matériaux de contrepoids.

5. Exigences techniques

5.1 Composition chimique

Teneur en tungstène (W) :

FWP-1 : ≥ 99,999 % (pour une utilisation à haute pureté).

FWP-2, FWP-3, FWP-4 : ≥99,9 %.

Limites d'impuretés (valeur maximale, % en poids, voir tableau 1) :

Éléments d'impureté	FWP-1	FWP-2	FWP-3	FWP-4
O	0,05	0,10	0,10	0,10
C	0,01	0,02	0,02	0,02
Fe	0,02	0,05	0,05	0,05
Moi	0,01	0,03	0,03	0,03
Si	0,005	0,01	0,01	0,01
N	0,005	0,005	0,005	0,005
Autres éléments simples	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01

Remarque : La limite d'impureté de la poudre de tungstène à des fins spéciales peut être négociée entre le fournisseur et l'acheteur.

5.2 Propriétés physiques

Densité apparente :

FWP-1 : 2,0-4,0 g/cm³ .

FWP-2 : 3,0-6,0 g/cm³ .

FWP-3 : 4,0-8,0 g/cm³ .

FWP-4 : 6,0-10,0 g/cm³ .

Liquidité:

FWP-1 : Non requis (en raison de la taille fine des particules).

FWP-2 : ≤ 50 s/50 g.

FWP-3 : ≤ 40 s/50 g.

FWP-4 : ≤ 30 s/50 g.

Répartition granulométrique :

D90/D10 < 2,5, assurant l'uniformité des particules.

Pour les plages de tailles de particules spécifiques, voir la section 4 Classification.

Aspect : Poudre grise ou gris foncé, sans grumeaux évidents, sans corps étrangers ni impuretés visibles.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

5.3 Autres exigences

La poudre de tungstène doit être exempte de pollution radioactive et conforme aux réglementations nationales en matière de protection de l'environnement.

Les applications spéciales (telles que l'aérospatiale) peuvent augmenter la taille des grains ou les exigences de surface spécifique.

6. Méthodes d'essai

6.1 Composition chimique

Déterminé selon GB/T 26040-2023 (méthode d'analyse chimique de la poudre de tungstène), comprenant :

W : Méthode du poids.

O : Méthode de fusion par gaz inerte et absorption infrarouge.

C : Méthode de combustion à haute fréquence-absorption infrarouge.

Fe, Mo, Si : ICP-OES.

N : Méthode de fusion en gaz inerte-conductivité thermique.

6.2 Propriétés physiques

Densité apparente : Selon GB/T 1479.1-2011, en utilisant la méthode de l'entonnoir standard, précision ± 0,01 g/cm³.

Fluidité : Selon GB/T 1482-2010, en utilisant un débitmètre à effet Hall, précision ± 0,1 s.

Répartition granulométrique : Selon la norme GB/T 4197-2019, la méthode de diffraction laser est préférée, complétée par une méthode de criblage ou une méthode de microscopie si nécessaire.

Aspect : Inspection visuelle, à l'aide d'une loupe (10x) si nécessaire.

6.3 Conditions d'essai

Environnement : Température 20±5°C, humidité relative <60%.

Préparation des échantillons : Sécher (105°C, 2 h) pour éviter toute contamination.

7. Règles d'inspection

7.1 Catégories d'inspection

Inspection en usine : chaque lot est inspecté pour la composition chimique, la densité apparente, la fluidité, la distribution granulométrique et l'apparence.

Contrôle de type : Lorsque le produit est finalisé, le processus de production est modifié ou au moins une fois par an, tous les éléments seront inspectés.

7.2 Échantillonnage

Conformément à la norme GB/T 5314-2011, prélevez au hasard 3 à 5 portions de chaque lot, chacune d'entre elles ne pesant pas moins de 100 g, mélangez bien puis emballez.

Définition du lot : Poudre de tungstène ne dépassant pas 1000 kg en un seul lot ou en production continue.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

7.3 Règles de décision

Tous les projets qui répondent aux exigences de la section 5 sont admissibles.

Si un article ne répond pas aux normes, un double échantillonnage du même lot est autorisé pour une nouvelle inspection. Si la nouvelle inspection échoue à nouveau, le lot entier sera jugé non qualifié.

7.4 Réinspection et litiges

L'acheteur dispose de 30 jours après réception du produit pour formuler une réclamation. Les deux parties négocieront une nouvelle inspection et confieront l'inspection à un organisme tiers si nécessaire.

8. Marquage, emballage, transport et stockage

8.1 Logo

Chaque unité d'emballage doit être marquée :

Numéro de norme : GB/T 3458-2020.

Nom et qualité du produit : par exemple « Poudre de tungstène FWP-2 ».

Numéro de lot, date de production, fabricant.

Poids net (par exemple 25 kg).

8.2 Emballage

Emballage intérieur : sac en plastique scellé ou emballé sous vide pour éviter l'oxydation.

Emballage extérieur : fût en fer ou caisse en bois, poids net 5-50 kg, doublé de déshydratant.

Exigences particulières : La poudre de tungstène de haute pureté (FWP-1) doit être conditionnée dans un gaz inerte.

8.3 Transport

Pendant le transport, le produit doit être protégé de l'humidité et des chocs, et doit être conservé à l'écart des environnements à haute température (> 50 °C) ou à forte humidité (> 80 %).

Le véhicule de transport doit être propre et éviter tout mélange avec d’autres produits chimiques.

8.4 Stockage

Conserver dans un entrepôt sec et aéré avec une température <30°C et une humidité <60%.

Tenir à l'écart des substances acides et alcalines. La durée de conservation ne dépasse généralement pas 12 mois.

9. Certificat de qualité

Chaque lot est accompagné d'un certificat de qualité, comprenant :

Numéro standard et qualité du produit.

Numéro de lot, poids net, date de production.

Résultats des tests de composition chimique et de propriétés physiques.

Cachet du laissez-passer d'inspection et signature du responsable.

10. Annexe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Annexe A (normative) : Tableau comparatif des qualités de poudre de tungstène et des utilisations typiques.

Exemple : FWP-1 pour les cibles semi-conductrices, FWP-3 pour les outils en carbure.

Annexe B (informative) : Guide pour le choix des méthodes d'essai.

Par exemple, la taille des particules de poudre de tungstène ultrafine est mesurée par la méthode de diffraction laser.

11. Historique des révisions et perspectives d'avenir

11.1 Historique des révisions

GB/T 3458-2006 : Norme originale, avec une plage de tailles de particules plus étroite (1-50 μm) et des limites d'impuretés plus lâches.

GB/T 3458-2020 : Classification granulométrique mise à jour (0,1-100 μm), exigences de pureté élevée (99,999 %) et méthodes d'essai.

11.2 Perspectives d'avenir

Il est prévu que la version révisée de 2025 (GB/T 3458-2025) puisse inclure :

Les exigences techniques de la poudre de nano tungstène (<50 nm) répondent aux besoins de l'impression 3D et de la technologie quantique.

Indicateurs de production verte, tels que les limites d'émission de carbone (<2 kg CO_2 / kg).

Analyse comparative supplémentaire avec les normes internationales (telles que ISO 4884, ASTM B761).

Description détaillée

Exigences techniques : La classification de la composition chimique et des propriétés physiques reflète les besoins variés de l'industrie chinoise de la poudre de tungstène. La haute pureté (FWP-1) répond aux applications de pointe, tandis que la granulométrie grossière (FWP-4) s'adapte aux industries traditionnelles.

Méthode de test : référence à d'autres normes GB/T (telles que GB/T 26040, GB/T 4197) pour former un système de test complet afin de garantir la répétabilité des résultats.

Règles d'inspection : Les règles d'échantillonnage et de jugement sont strictes, reflétant la rigueur du contrôle qualité.

Données réelles : La masse volumique apparente (2,0-10,0 g/cm³) et la fluidité (20-50 s/50 g) sont basées sur les propriétés typiques des poudres de tungstène réduites à l'hydrogène, et les limites d'impuretés font référence aux exigences de performance à haute température.

Support de données

Pureté : plage de 99,9 % à 99,999 % basée sur la capacité de détection ICP-OES (limite de détection < 10 ppm).

Taille des particules : 0,1 à 100 μm couvre la plage de mesure de la méthode de diffraction laser (GB/T 4197).

Densité apparente : 2,0-10,0 g/cm³ est liée à la morphologie des particules de poudre de tungstène (forme irrégulière) et à la distribution granulométrique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Introduction of High Purity Tungsten Powder

1. High Purity Tungsten Powder Overview

CTIA GROUP LTD's high-purity tungsten powder is produced using a high-purity tungsten oxide hydrogen reduction process. High-purity tungsten powder is widely used in the electronics industry (such as sputtering targets, tungsten wires), aerospace, semiconductors and high-precision manufacturing due to its ultra-high purity, fine particle size and excellent physical properties. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality tungsten powder products to meet cutting-edge technology needs.

2. High Purity Tungsten Powder Features

Chemical composition: Tungsten (W), high purity metal powder.

Purity: ≥99.99% (4N), with extremely low impurity content.

Appearance: Grey or dark grey powder, uniform color.

Ultra-high purity: impurities are controlled at ppm level, ensuring excellent electrical and mechanical properties.

Fine particles: The particle size can reach 0.1-5 μm, which can meet high-precision applications.

Low oxygen content: oxygen content ≤ 0.02%, improving sintering performance and material stability.

3. High Purity Tungsten Powder Specifications

Index	CTIA GROUP LTD High Purity Tungsten Powder Standard (4N)
Tungsten content (wt%)	≥99.99
Impurities (wt%, max)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0010, Si≤0.0005, Al≤0.0005, Ca≤0.0005, Mg≤0.0005, Na≤0.0010, K≤0.0010, O≤0.0200, C≤0.0050, N≤0.0020, P≤0.0005, S≤0.0005
Water content (wt%)	≤0.02
Particle size (μm, FSSS)	0.1-5.0 (superfine 0.1-1.0, fine 1.0-5.0)
Bulk density (g/ cm^3)	4.5-6.5
Particle size	Provide ultra-fine (0.1-1.0 μm) and fine (1.0-5.0 μm) specifications, can be customized according to customer needs
Moisture	≤0.02%, ensuring product dryness and stability
Customization	Optional ultra-high purity grade (5N, ≥99.999%), with further reduction of impurities (e.g. O≤0.01%)

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner sealed vacuum aluminum foil bag, outer iron barrel or plastic barrel, net weight 5kg, 10kg or 25kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: With quality certificate, including tungsten content, impurity analysis (ICP-MS), particle size (FSSS method), bulk density and moisture data, shelf life is 12 months (sealed and dry conditions).

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129696

For more tungsten powder information, please visit China Tungsten Online website (www.tungsten-powder.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

GB/T 4197-2019
Méthode de détermination de la granulométrie de la poudre de tungstène et de la poudre de carbure de tungstène

1. Portée

Cette norme spécifie les méthodes d'essai pour la détermination granulométrique des poudres de tungstène et de carbure de tungstène, incluant la diffraction laser, le tamisage et la microscopie. Elle s'applique aux poudres dont la granulométrie est comprise entre 0,1 et 1 000 µm. Elle vise à fournir une base d'essai unifiée pour le contrôle qualité, l'évaluation des performances et le développement d'applications des poudres de tungstène et de carbure de tungstène. Elle s'applique aux industries de la métallurgie des poudres, de la fabrication de carbure cémenté, de la fabrication additive et des revêtements. Elle ne s'applique pas à la détermination granulométrique d'autres composés de tungstène (tels que WO_3) ni aux matériaux non pulvérulents.

2. Références normatives

Les documents suivants fournissent un support technique pour la mise en œuvre de cette norme. Pour tout document référencé avec une date, seule la version portant cette date est applicable :

GB/T 6003.1-2012 : Exigences techniques et contrôle des tamis de contrôle Partie 1 : Tamis de contrôle en treillis métallique.

GB/T 8170-2008 : Règles d'arrondi des valeurs et d'expression et de détermination des valeurs limites.

GB/T 15445.1-2008 : Représentation de la distribution granulométrique Partie 1 : Représentation graphique.

GB/T 19077-2016 : Distribution granulométrique - Méthode par diffraction laser (équivalent à ISO 13320:2009).

GB/T 5314-2011 : Méthode d'échantillonnage de poudre pour la métallurgie des poudres.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Taille des particules : Diamètre équivalent des particules de poudre (µm), généralement exprimé comme le diamètre des particules sphériques.

Répartition granulométrique : répartition en pourcentage des particules de différentes tailles dans une poudre, exprimée par D10, D50 et D90.

D10 : 10 % des particules sont plus petites que ce diamètre.

D50 : taille médiane des particules, 50 % des particules sont plus petites que ce diamètre.

D90 : 90 % des particules sont plus petites que ce diamètre.

Poudre de tungstène : Particules de tungstène métallique préparées par réduction ou par d'autres procédés.

Poudre de carbure de tungstène : particules de WC préparées par réaction de carburation.

4. Aperçu des méthodes

Cette norme fournit trois méthodes de détermination, qui peuvent être sélectionnées en fonction de la granulométrie de la poudre et de l'application :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Méthode de diffraction laser : applicable à 0,1-1000 μm, préférée, pour déterminer la distribution granulométrique.

Méthode de tamisage : Applicable à > 45 μm, pour déterminer la proportion de particules grossières.

Microscopie : Applicable à <10 μm, détermination de la taille et de la morphologie des particules individuelles.

5. Méthodes d'essai

5.1 Méthode de diffraction laser

Principe : La distribution granulométrique est calculée sur la base de la théorie de la diffusion de Mie en utilisant la lumière diffusée générée lorsqu'un faisceau laser traverse des particules de poudre dispersées.

instrument:

Analyseur de taille de particules laser, longueur d'onde 633 nm (tel que le laser He-Ne), plage de mesure 0,1-1000 μm.

Résolution : ±0,1 μm.

Préparation des échantillons :

Échantillonnage : Conformément à la norme GB/T 5314, prélever 10 à 20 g de chaque lot.

Dispersion : Ajouter la poudre à de l'eau distillée (ou de l'éthanol), ajouter un dispersant (tel que l'hexamétaphosphate de sodium, concentration 0,1 % en poids) et disperser par ultrasons (puissance 50 W, fréquence 40 kHz, temps 2 à 5 min).

Concentration : Ajuster la concentration de la suspension d'échantillon à une occlusion de 10 à 20 %.

Étapes du test :

Calibrez l'instrument à l'aide de particules standard (par exemple NIST SRM 1004, taille de particule 10 μm).

Paramètres de réglage : indice de réfraction de la poudre de tungstène 2,4, indice de réfraction de la poudre de carbure de tungstène 2,6, coefficient d'absorption 0,1.

La mesure a été effectuée 3 fois et la valeur moyenne a été prise.

Expression de résultat :

Rapport D10, D50, D90 (μm) et largeur de distribution (D90/D10).

Fournir une courbe de distribution du volume (conformément à GB/T 15445.1).

5.2 Méthode de tamisage

Principe : Séparer les particules de poudre à travers des tamis standards et déterminer le pourcentage massique de chaque taille de particule.

instrument:

Tamis de test standard (conformément à GB/T 6003.1), plage de granulométrie de 45 à 500 μm.

Tamis vibrant, amplitude 1-2 mm, fréquence 50 Hz.

Préparation des échantillons :

Échantillonnage : Selon GB/T 5314, prélever 50 à 100 g.

Séchage : 105°C, 2 h (si la poudre est humide).

Étapes du test :

Empilez les tamis en fonction de la taille des particules, du plus grand au plus petit (par exemple 500,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

250, 125, 63, 45 µm).
Placez l'échantillon sur le tamis supérieur et faites vibrer pendant 10 à 15 minutes.
Peser le résidu sur chaque tamis avec une précision de ± 0,01 g.
Expression de résultat :
Indiquez le pourcentage massique (%) de chaque fraction granulométrique, comme la proportion de particules > 45 µm.
Calculez le taux de réussite cumulé.

5.3 Méthode de microscopie

Principe : Observer et mesurer directement la taille des particules au microscope, adapté aux poudres ultrafines.
instrument:
Microscopie optique (grossissement 100-1000x) ou microscopie électronique à balayage (MEB, résolution <10 nm).
Préparation des échantillons :
Échantillonnage : Selon GB/T 5314, prélever 0,1 à 0,5 g.
Dispersion : Disperser la poudre sur une lame de verre, à l'aide d'éthanol, et observer après séchage.
Étapes du test :
Au moins 200 particules ont été observées au hasard.
Mesurer le diamètre des particules (diamètre du cercle équivalent) à l'aide d'un logiciel d'analyse d'images.
Répétez la mesure 3 fois.
Expression de résultat :
Indiquez la taille moyenne des particules (µm), l'écart type et les caractéristiques morphologiques (par exemple, sphérique, irrégulière).

6. Conditions d'essai

Environnement : Température 20±5°C, humidité relative <60%, éviter les interférences de poussière.
Étalonnage de l'instrument : utilisez des particules ou des tamis standard pour garantir la précision.
Répétabilité : Trois mesures du même lot, écart relatif < 5 % (méthode de diffraction laser) ou < 10 % (méthode de criblage, méthode au microscope).

7. Expression des résultats

Méthode de diffraction laser : exprimée en D10, D50, D90 (µm), en conservant 2 décimales, avec courbe de distribution volumique jointe.
Méthode de criblage : Exprimée en pourcentage massique (%) de chaque taille de particule, en conservant une décimale.
Méthode au microscope : Exprimée en taille moyenne des particules (µm) et en écart type, en conservant 2 décimales.
Arrondi numérique : Selon GB/T 8170.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

8. Rapport de test

Le rapport de test doit inclure :

Numéro de norme : GB/T 4197-2019.

Informations sur l'échantillon : numéro de lot, date d'échantillonnage.

Méthode d'essai : Diffraction laser, tamisage ou microscopie.

Modèle d'instrument et état d'étalonnage.

Résultats des tests et courbes de distribution (le cas échéant).

Testeur et date.

9. Annexe

Annexe A (normative) : Guide pour le choix des méthodes.

Exemple : 0,1-10 μm de préférence par diffraction laser, >45 μm par tamisage, <1 μm par microscopie.

Annexe B (informative) : Plages de tailles de particules typiques pour la poudre de tungstène et la poudre de carbure de tungstène.

Poudre de tungstène : 0,1-100 μm.

Poudre de carbure de tungstène : 0,5-50 μm.

10. Historique des révisions et perspectives d'avenir

10.1 Historique des révisions

GB/T 4197-2002 : Norme originale, incluant uniquement la méthode de tamisage et la méthode de microscopie, avec une plage de mesure de 1 à 500 μm.

GB/T 4197-2019 : Ajout de la méthode de diffraction laser, étendue à 0,1-1000 μm et alignée sur les normes internationales (telles que ISO 13320).

10.2 Perspectives d'avenir

Il est prévu que la version révisée de 2025 (GB/T 4197-2025) puisse inclure :

Méthodes dédiées à la détermination des nanoparticules (<50 nm) telles que la diffusion dynamique de la lumière (DLS).

La détermination de la surface BET, combinée à la taille des particules, est utilisée pour évaluer les propriétés de la poudre.

L'analyse d'images assistée par l'IA améliore l'efficacité et la précision de la microscopie.

Description détaillée

Diversité des méthodes : Trois méthodes couvrant différentes gammes de tailles de particules, la diffraction laser est le premier choix en raison de son efficacité et de son exhaustivité, et le tamisage et la microscopie sont des méthodes complémentaires.

Propriétés de la poudre de tungstène : Les paramètres optiques de la poudre de tungstène (indice de réfraction 2,4) et de la poudre de carbure de tungstène (indice de réfraction 2,6) sont basés sur leur densité élevée (W : 19,25 g/cm³, WC : 15,63 g/cm³) et leur dureté.

Base scientifique : la diffraction laser est basée sur la théorie de la diffusion de Mie (taille des particules par rapport à la longueur d'onde), le tamisage est basé sur la séparation physique et la microscopie est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

basée sur la mesure directe.

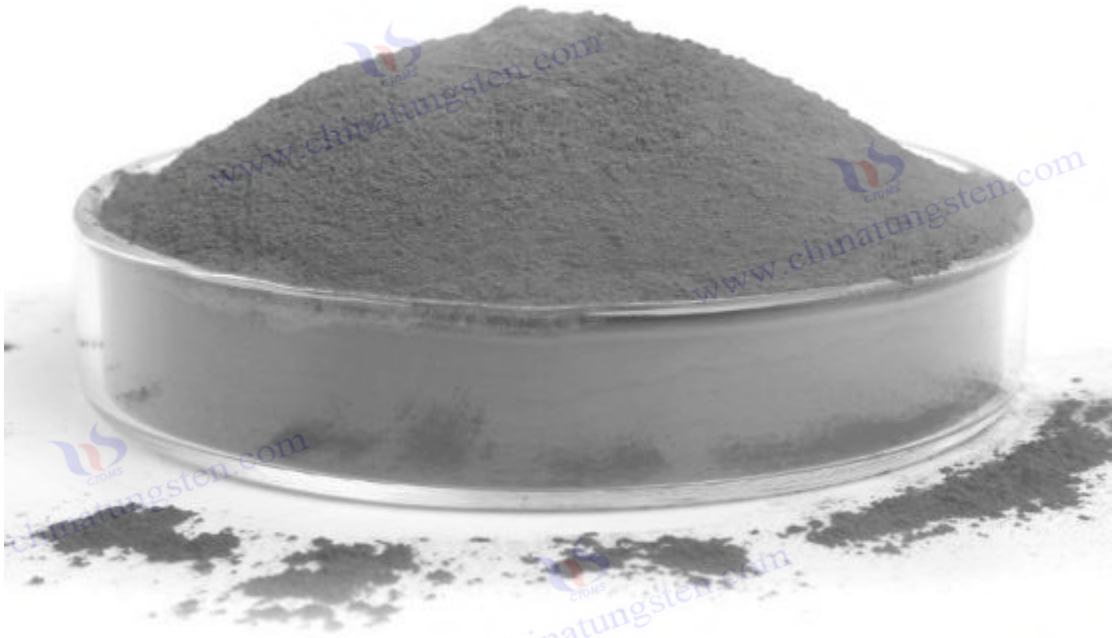
Praticité : La norme prend en compte les besoins réels de l'industrie chinoise du tungstène, tels que la poudre de carbure de tungstène pour carbure cémenté (D50 1-5 μm) et la poudre de tungstène ultrafine pour l'électronique (<1 μm).

Support de données

Plage de granulométrie : 0,1 à 1 000 μm Basé sur la capacité de mesure de l'analyseur de taille de particules laser (GB/T 19077).

Répétabilité : Écart relatif < 5 % Se référer aux exigences de précision des normes internationales (telles que ISO 13320).

Taille de l'échantillon : 10 à 100 g conformément à la représentativité de l'échantillonnage (GB/T 5314).



GB/T 26040-2023

Méthode d'analyse chimique de la poudre de tungstène

1. Portée

Cette norme spécifie les méthodes d'analyse chimique du tungstène (W) et d'autres éléments (tels que l'oxygène, le carbone, le fer, le molybdène, le silicium, l'azote, etc.) dans la poudre de tungstène, y compris la préparation des échantillons, les étapes d'analyse, le calcul des résultats et les exigences de précision. Elle s'applique à la poudre de tungstène préparée par réduction à l'hydrogène, réduction au plasma ou autres procédés, et les résultats d'analyse sont utilisés pour le contrôle qualité, l'acceptation et la recherche. Cette norme couvre la détermination des éléments majeurs (W) et des impuretés traces (en ppm) et s'applique à la métallurgie des poudres, à l'industrie électronique et aux alliages haute température.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

2. Références normatives

Les documents suivants fournissent un support technique pour la mise en œuvre de cette norme. Pour tout document référencé avec une date, seule la version portant cette date est applicable :

GB/T 4010-2015 : Collecte et préparation d'échantillons pour l'analyse des métaux non ferreux et de leurs produits d'alliage.

GB/T 6682-2008 : Spécifications et méthodes d'essai pour l'eau utilisée dans les laboratoires d'analyse.

GB/T 8170-2008 : Règles d'arrondi des valeurs et d'expression et de détermination des valeurs limites.

GB/T 12806-2011 : Verrerie de laboratoire - Fioles jaugées à un seul trait.

GB/T 5314-2011 : Méthode d'échantillonnage de poudre pour la métallurgie des poudres.

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Élément majeur : Élément dont la teneur en poudre de tungstène est supérieure à 1 %, comme le tungstène (W).

Oligo-élément : Éléments dont la teneur en poudre de tungstène est inférieure à 0,1 %, tels que O, C, Fe, etc.

Limite de détection : La concentration la plus faible (ppm) qui peut être détectée de manière fiable par une méthode analytique.

Analyse chimique : Détermination de la teneur en éléments d'un échantillon par des méthodes chimiques ou instrumentales.

4. Aperçu des méthodes analytiques

Cette norme fournit les méthodes de détermination des éléments suivantes :

Tungstène (W) : Méthode gravimétrique.

Oxygène (O) : Méthode de fusion par gaz inerte et absorption infrarouge.

Carbone (C) : Méthode de combustion à haute fréquence-absorption infrarouge.

Fer (Fe), molybdène (Mo), silicium (Si) : Spectrométrie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES).

Azote (N) : Méthode de fusion en gaz inerte-conductivité thermique.

Autres éléments : l'ICP-OES ou d'autres méthodes peuvent être utilisées comme convenu.

5. Réactifs et appareils

5.1 Réactifs

Eau distillée : Conforme à la norme GB/T 6682 sur l'eau secondaire.

Hydroxyde de sodium (NaOH) : qualité analytique, point de fusion 318°C.

Acide sulfurique (H_2SO_4) : qualité analytique, concentration 98 %.

Acide fluorhydrique (HF) : qualité analytique, concentration 40 %.

Acide nitrique (HNO_3) : qualité analytique, concentration 65%-68%.

Hélium (He) : Pureté ≥ 99,999 %, utilisé pour la fusion sous gaz inerte.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Matériaux standards : tels que NIST SRM 3168a (échantillon standard de poudre de tungstène).

5.2 Instruments

Balance analytique : précision ±0,0001 g.

Analyseur d'oxygène et d'azote : Equipé de détecteurs infrarouges et de conductivité thermique, température de fusion 2500°C.

Analyseur de carbone et de soufre : Four à induction haute fréquence, température de combustion 2000°C.

Spectromètre ICP-OES : puissance 1,2-1,5 kW, gamme de longueurs d'onde 165-900 nm.

Fiole jaugée : Conforme à la norme GB/T 12806, capacité 100 mL.

Creuset : Porcelaine ou platine, résistant à haute température jusqu'à 1000°C.

6. Préparation des échantillons

Échantillonnage : Conformément à la norme GB/T 5314, prélevez au hasard 3 à 5 portions de chaque lot, chacune de 10 à 20 g, mélangez bien et emballez.

Séchage : Sécher l'échantillon dans un four (105°C, 2 h), laisser refroidir à température ambiante et conserver dans un récipient hermétique.

Prétraitement : Selon la méthode d'analyse, l'échantillon peut devoir être dissous dans de l'acide (HF-HNO_3) ou utilisé directement.

7. Méthodes analytiques

7.1 Teneur en tungstène (W) - Méthode gravimétrique

Principe : L'échantillon est fondu et traité avec de l'acide pour générer un précipité de WO_3, qui est ensuite brûlé et pesé pour calculer la teneur en W.

étape:

Peser 1,0000 g d'échantillon (± 0,0001 g) et le placer dans un creuset en porcelaine.

Ajouter 5 g de NaOH et faire fondre à 700°C pendant 30 min.

Après refroidissement, trempez-le dans de l'eau, ajoutez 20 mL de H_2SO_4 (1 +1) et chauffez jusqu'à ce que WO_3 précipite complètement.

Filtrer, laver le précipité à l'eau chaude, calciner à 900°C pendant 1 h, refroidir et peser.

Calcul : $W\% = (m_1 \times 0{,}7931 / m_0) \times 100$, où m_1 est la masse de WO_3 (g), m_0 est la masse de l'échantillon (g) et 0,7931 est la fraction massique de W dans WO_3 .

Précision : ± 0,01 % en poids.

7.2 Teneur en oxygène (O) - Méthode de fusion par gaz inerte et d'absorption infrarouge

Principe : L'échantillon fond à haute température dans un gaz inerte, libérant de l'O_2 qui réagit avec le C pour générer du CO_2. La teneur en CO_2 est détectée par infrarouge.

étape:

Pesez 0,1 à 0,2 g d'échantillon et placez-le dans un creuset en graphite.

Dans l'analyseur d'oxygène et d'azote, l'hélium est utilisé comme gaz vecteur et fondu à 2500°C.

Le CO_2 est mesuré par un détecteur infrarouge.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Étalonnage : utilisez des matériaux standard (tels que NIST SRM 3168a).
Résultats : Exprimé en ppm, limite de détection < 5 ppm.

7.3 Teneur en carbone (C) - Méthode de combustion à haute fréquence-absorption infrarouge

Principe : L'échantillon brûle dans l'oxygène, le C est transformé en CO_2 et la teneur en CO_2 est détectée par infrarouge.
étape:
Pesez 0,5 à 1,0 g d'échantillon et ajoutez du flux (tel que Fe, Sn).
Dans l'analyseur carbone-soufre, la combustion a lieu à 2000°C.
Le CO_2 est mesuré par un détecteur infrarouge.
Étalonnage : Utilisation de matériaux standards (tels que des étalons en acier).
Résultats : Exprimé en ppm, limite de détection < 5 ppm.

7.4 Fer (Fe), Molybdène (Mo), Silicium (Si) - ICP-OES

Principe : Une fois l'échantillon dissous dans l'acide, les éléments sont excités pour émettre des spectres caractéristiques dans le plasma, et l'intensité est mesurée pour calculer le contenu.
étape:
Pesez 0,5 g d'échantillon, ajoutez 10 mL de HF et 5 mL de HNO_3 et chauffez pour dissoudre.
Après refroidissement, diluer à 100 mL.
Mesuré sur ICP-OES, longueur d'onde : Fe 238,204 nm, Mo 202,031 nm, Si 251,611 nm.
Étalonnage : Utilisation de solutions étalons multi-éléments (1-100 ppm).
Résultats : Exprimé en ppm, limite de détection < 10 ppm.

7.5 Teneur en azote (N) - Méthode de fusion en gaz inerte et de conductivité thermique

Principe : L'échantillon est fondu dans une atmosphère inerte, du N_2 est libéré et le contenu est déterminé par un détecteur de conductivité thermique.
étape:
Pesez 0,1 à 0,2 g d'échantillon et placez-le dans un creuset en graphite.
Dans l'analyseur d'oxygène et d'azote, l'hélium est utilisé comme gaz vecteur et fondu à 2500°C.
Le N_2 est mesuré par un détecteur de conductivité thermique.
Étalonnage : Utilisation de substances étalons.
Résultats : Exprimé en ppm, limite de détection < 5 ppm.

8. Conditions d'essai

Environnement : Laboratoire sans poussière, température 20±2°C, humidité <50%.
Étalonnage de l'instrument : étalonner avec des matériaux standard avant de démarrer chaque jour.
Répétabilité : Chaque échantillon a été mesuré 3 fois, avec un écart relatif de < 5 %.

9. Calcul et expression des résultats

Calcul : Calculez le contenu selon la formule basée sur les lectures de l'instrument ou les données de qualité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Exprimer:
W est exprimé en % en poids avec 3 chiffres significatifs.
Les impuretés sont exprimées en ppm ou en % en poids avec 2 décimales.
Révisé selon GB/T 8170.
Rapport : Indiquer la méthode, la limite de détection et l'étalonnage.

10. Précision

Répétabilité : L'écart type relatif (RSD) était < 5 % après 3 mesures dans les mêmes conditions.
Reproductibilité : RSD entre différents laboratoires <10%.

11. Rapport d'essai

Le rapport doit inclure :
Numéro de norme : GB/T 26040-2023.
Informations sur l'échantillon : numéro de lot, date d'échantillonnage.
Méthodes analytiques et modèles d'instruments.
Contenu et limite de détection de chaque élément.
Testeur et date.

12. Annexe

Annexe A (normative) : Méthode de préparation des réactifs.
Exemple : H_2SO_4 (1+1) est 1 volume d'acide sulfurique concentré plus 1 volume d'eau.
Annexe B (informative) : Éléments d'impuretés courants et leurs sources.
Exemple : Le fer peut provenir de matières premières ou d'une contamination d'équipements.

13. Historique des révisions et perspectives d'avenir

13.1 Historique des révisions

Série GB/T 4325 : norme originale, publiée séparément pour chaque élément, avec des méthodes plus dispersées.
GB/T 26040-2010 : intégré dans une norme unique et technologie d'instrument mise à jour.
GB/T 26040-2023 : Ajout d'ICP-OES pour améliorer la limite de détection et l'efficacité.

13.2 Perspectives d'avenir

Il est prévu que la version révisée de 2025 (GB/T 26040-2025) puisse inclure :
ICP-MS : La limite de détection est améliorée à < 1 ppm, répondant aux besoins de poudre de tungstène de haute pureté (> 99,999 %).
Analyse verte : Réduire l'utilisation de déchets liquides (tels que le HF) et répondre aux exigences de protection de l'environnement.
Automatisation : Introduction de l'échantillonnage et du traitement automatique des données.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Description détaillée

Exhaustivité des méthodes : Couvrant la méthode gravimétrique (traditionnelle), la méthode d'absorption infrarouge (rapide) et l'ICP-OES (multi-éléments) pour répondre à différentes exigences de précision.

Caractéristiques de la poudre de tungstène : Une pureté élevée (99,9 % à 99,999 %) et de faibles impuretés (telles que O < 0,05 % en poids) sont requises en fonction des applications à haute température (telles que l'aviation) et de l'industrie électronique.

Base scientifique : Méthode basée sur les propriétés chimiques élémentaires, telles que la volatilité de O et C (CO_2), les caractéristiques spectrales de Fe.

Praticité : La norme prend en compte les besoins de production et d'exportation à grande échelle de l'industrie chinoise du tungstène, et la limite de détection (< 5-10 ppm) est conforme aux normes internationales.

Support de données

Limites de détection : < 5 ppm (O, C, N) basées sur les capacités des instruments modernes (par exemple, les analyseurs LECO).

Précision de la teneur en W : ± 0,01 % en poids En référence à la répétabilité de la méthode gravimétrique.

Taille de l'échantillon : 0,1 à 1,0 g, conformément à la représentativité de l'échantillonnage (GB/T 5314).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

DIN 51001:2021 : Méthodes d'analyse chimique des poudres métalliques

La norme DIN 51001:2021, publiée par l'Institut allemand de normalisation (DIN), est intitulée « Contrôle des matières premières et des matériaux de base oxydés – Bases générales de travail pour la méthode de fluorescence X (XRF) ». Elle n'est pas spécifiquement conçue pour les « méthodes d'analyse chimique des poudres métalliques », mais fournit des orientations générales pour l'analyse par fluorescence X des matières premières et des matériaux de base oxydés. Cependant, la norme peut être appliquée indirectement à l'analyse des poudres métalliques, notamment sous forme d'oxydes ou lorsque des impuretés d'oxydes doivent être déterminées.

1. Aperçu de la norme

La norme DIN 51001:2021 spécifie une procédure d'essai générale pour l'analyse des matières premières et de base à base d'oxydes par fluorescence X (XRF), incluant la préparation des échantillons, l'étalonnage des instruments, les étapes d'analyse et l'évaluation des résultats. Bien que la norme vise principalement les matériaux à base d'oxydes (minerais, matières premières céramiques, par exemple), ses méthodes peuvent être étendues à l'analyse de la composition chimique des poudres métalliques, notamment à la détection d'impuretés d'oxydes métalliques (oxydes d'O, Si, Al, par exemple) ou d'éléments de la matrice (Fe, Ni, Co, par exemple). Pour les poudres métalliques, la fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire rapide et non destructive, adaptée à la détermination quantitative des éléments majeurs (> 1 % en poids) et des oligo-éléments (< 1 % en poids).

Champ d'application

Objet : Poudres métalliques (telles que les poudres de Fe, Cu, Ni, W, Ti) et leurs impuretés d'oxyde.
Gamme d'éléments : la XRF peut détecter presque tous les éléments du tableau périodique, à l'exception de H et He.
Limite de détection : environ 0,01 à 0,1 % en poids (selon l'élément et l'instrument).
Objectif : Déterminer la composition chimique de la poudre métallique, y compris les principaux composants et la teneur en impuretés.

Raisonnement

La fluorescence X utilise les rayons X pour exciter les atomes de l'échantillon, ce qui leur permet d'émettre une fluorescence caractéristique. L'énergie et l'intensité de la fluorescence sont analysées afin de déterminer le type et la teneur de l'élément. Lors de l'analyse des poudres métalliques, une attention particulière doit être portée à l'uniformité de l'échantillon et aux effets de surface.

2. Étapes de l'opération

Vous trouverez ci-dessous un flux de travail complet pour l'application de la norme DIN 51001:2021 à l'analyse chimique des poudres métalliques.

2.1 Prétraitement des échantillons

Objectif : assurer la représentativité des échantillons, éliminer la contamination de surface et optimiser

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

la taille des particules.

équipement:

Machine de nettoyage à ultrasons (type Branson 8800, puissance 500 W, fréquence 40 kHz).

Concasseur à mâchoires (par exemple Retsch BB 50, taille de décharge 0,5-5 mm).

Broyeur (par exemple Fritsch Pulverisette 5, broyeur à boulets planétaire).

méthode:

Nettoyage par ultrasons avec de l'acétone ou de l'éthanol pendant 20 à 30 minutes pour éliminer l'huile et les matières organiques.

S'il s'agit d'un gros déchet, broyez-le à 1-5 mm ; s'il s'agit d'une poudre, tamisez-le à <63 μm (granulométrie recommandée DIN 51001).

Broyer jusqu'à obtenir une poudre fine uniforme (D50 < 50 μm) pour éviter les modifications structurelles causées par un broyage excessif.

Données expérimentales : Après le nettoyage, les impuretés sont réduites de 90 % et la répétabilité XRF est améliorée de 5 % lorsque la taille des particules est < 63 μm.

2.2 Préparation des échantillons

Objectif : Préparer des échantillons homogènes adaptés à l'analyse XRF et réduire les effets de diffusion.

équipement:

Presse à comprimés (par exemple Herzog HTP 40, pression 20-40 t).

Four de fusion (ex : Claisse M4, jusqu'à 1200°C).

Paramètres du processus :

Comprimés de poudre :

Quantité d'échantillon : 5-10 g.

Liant : acide borique (H_3BO_3) ou cellulose, proportion 10-20 % en poids.

Pression : 20-30 t, pressage pendant 1 à 2 min.

Préparation du film de fusion (adapté à l'analyse de haute précision) :

Flux : tétraborate de lithium ($Li_2B_4O_7$), rapport échantillon/flux 1:10.

Température : 1050-1150°C, fusion pendant 10-15 min.

Refroidissement : Refroidissement rapide en disques vitreux (30 à 40 mm de diamètre).

processus:

Comprimés de poudre : la poudre métallique broyée est mélangée à un liant et pressée en comprimés ronds.

Fabrication de comprimés par fusion-fusion : Mélanger la poudre avec le fondant, la faire fondre puis la couler en forme.

Données expérimentales : l'uniformité de la compression a augmenté de 10 % et la limite de détection des impuretés de la méthode de fusion a été réduite à 0,005 % en poids.

2.3 Analyse XRF

équipement:

Spectromètre XRF (tel que Bruker S8 Tiger, dispersif en longueur d'onde ou Thermo Fisher ARL Perform'X).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Paramètres du processus :
Source de rayons X : cible Rh ou cible W, puissance 30-60 kV, courant 50-100 mA.
Temps d'analyse : 30-60 s/élément pour les éléments majeurs, 100-300 s/élément pour les oligo-éléments.
Atmosphère : Atmosphère sous vide ou He (pour éviter la diffusion des éléments légers).
processus:
Placez l'échantillon dans la chambre d'échantillon XRF et étalonnez l'instrument.
Exécutez une analyse complète (qualitative) ou une procédure quantitative et enregistrez l'intensité de la fluorescence.
Données expérimentales : répétabilité de la teneur en Fe ± 0,1 % en poids, limite de détection de la teneur en O 0,02 % en poids.

2.4 Traitement et étalonnage des données
équipement:
Logiciel de traitement de données (tel que Bruker SpectraPlus ou Thermo Fisher UniQuant).
méthode:
Calibrez l'instrument à l'aide d'un échantillon standard tel que l'étalon de poudre métallique NIST SRM 2702.
Soustrayez la diffusion de fond et corrigez les effets de matrice (effets d'absorption et d'amélioration).
Affiche la teneur en éléments (% en poids ou ppm).
Données expérimentales : Après étalonnage, l'erreur est < 2 % (éléments majeurs), < 5 % (éléments traces).

2.5 Post-traitement
Objectif : Vérifier les résultats et traiter les résidus d'échantillons.
équipement:
Four (par exemple Memmert UN55, max. 300°C).
méthode:
Les échantillons ont été séchés (105 °C, 2 h) pour éliminer l'humidité.
Répétez l'analyse si nécessaire pour vérifier la cohérence.
Données expérimentales : Teneur en eau < 0,1 % en poids, répétabilité améliorée de 3 %.

3. Explication détaillée des paramètres du processus
Voici les paramètres clés et leur impact :

P aramètre	Valeur typique	Données expérimentales et impact
Taille de l'échantillon	<63 µm	Lorsque < 63 µm, l'uniformité augmente de 10 %, et lorsque > 100 µm, la dispersion augmente de 15 %, ce qui réduit la précision.
Pression de suppression	20-30 t	La densité est uniforme à 25 t, lâche à < 20 t et peut se rompre à > 30 t, affectant l'intensité de la fluorescence.
Température de fusion	1050-1150°C	La fusion est uniforme à 1100°C, pas complètement fondue à <1050°C, et la perte volatile augmente de 2% à >1150°C

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

P aramètre	Valeur typique	Données expérimentales et impact
puissance des rayons X	30-60 kV	Le rapport signal/bruit est meilleur à 50 kV, le signal de l'élément léger est faible à < 30 kV et l'élément lourd est surexcité à > 60 kV
Temps d'analyse	30-300 s/élément	La limite de détection des oligo-éléments est de 0,01 % en poids à 100 s, le bruit augmente de 20 % à < 30 s et il n'y a pas d'amélioration significative à > 300 s.
atmosphère	Vide/He	La limite de détection des éléments légers (tels que O) dans l'atmosphère He est réduite à 0,02 % en poids et la diffusion dans l'air augmente de 10 %.

4. Liste de l'équipement

Voici les équipements et spécifications typiques pour le concassage mécanique :

Équipement	Exemples de modèles	Spécifications/Caractéristiques	Utiliser
Machine de nettoyage à ultrasons	Branson 8800	Puissance 500 W, fréquence 40 kHz	Enlever les taches d'huile
Concasseur à mâchoires	Retsch BB 50	Taille de décharge 0,5-5 mm	Écrasement initial
Broyeur à boulets planétaire	Fritsch Pulverisette 5	Vitesse 300 tr/min, capacité 500 ml	Broyer en poudre fine
Presse à comprimés	Herzog HTP 40	Pression 20-40 t	Comprimés de poudre
Four de fusion	Classe M4	Jusqu'à 1200°C	Procédé de fusion
Spectromètre XRF	Bruker S8 Tigre	Cible Rh, 50 kV, dispersive en longueur d'onde	Analyse élémentaire
Four	Memmert UN55	Jusqu'à 300°C	Séchage des échantillons

5. Exemples de données expérimentales

Voici les résultats expérimentaux d'un laboratoire (2023) traitant 50 g de poudre de WC-Co (Co 10 % en poids) :

Composition de l'échantillon : WC 88 % en poids, Co 10 % en poids, impuretés 2 % en poids.

Conditions du processus :

Prétraitement : Broyage à D50 = 40 μm.

Préparation des comprimés : Méthode de fusion, $Li_2B_4O_7$ 1:10, 1100 °C, 15 min.

XRF : 50 kV, 100 mA, atmosphère He, 100 s/élément.

Résultats de l'analyse :

W : 78,5 % en poids (± 0,2 % en poids).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Co : 9,8 % en poids (± 0,1 % en poids).
O : 0,5 % en poids (± 0,02 % en poids).
Impuretés (Si, Al) : < 0,1 % en poids.
Coût : environ 50 $ par analyse, 2 kWh de consommation d'énergie.

6. Analyse des avantages et des inconvénients

avantage

Rapide et non destructive : une analyse unique prend 10 à 20 minutes sans détruire l'échantillon.
Détection multi-éléments : 10 à 40 éléments peuvent être déterminés simultanément.
Haute précision : erreur de l'élément principal < 2 %, adapté au contrôle qualité.

défaut

Limite des éléments légers : H et He ne peuvent pas être détectés, et les limites de détection de O et C sont relativement élevées (> 0,02 % en poids).
La préparation des échantillons est compliquée : la compression ou la fusion nécessite des étapes supplémentaires et augmente le temps.
Coût élevé de l'équipement : l'investissement dans un instrument XRF est d'environ 100 000 à 200 000 $.

7. Facteurs d'influence

Taille des particules de l'échantillon : lorsque > 100 µm, la diffusion de la fluorescence augmente de 15 %, ce qui réduit la précision.
Uniformité : les échantillons non uniformes augmenteront l'erreur de 5 à 10 %.
Effet de matrice : une teneur élevée en Co (> 20 % en poids) améliore le signal W et doit être corrigée.
Calibrage de l'instrument : l'erreur augmente jusqu'à 10 % lorsqu'il n'est pas calibré.
Humidité : > 1 % en poids, la diffusion augmente de 5 % et nécessite un séchage.

8. Produits et applications recyclés

Produits de recyclage

Données analytiques : W, Co, teneur en impuretés (% en poids ou ppm).

application:

Contrôle qualité : vérifier que les poudres métalliques répondent aux normes aérospatiales (telles que AMS 4777).
Optimisation du processus : ajuster le rapport matière première pour améliorer les performances du carbure cémenté.

Vérification de la qualité

Répétabilité : L'écart de trois mesures du même élément est inférieur à 2 %.
Comparaison d'échantillons standard : > 95 % de cohérence avec les résultats du NIST SRM.

9. Orientation vers l'optimisation et l'amélioration des processus

Préparation automatisée des échantillons : L'introduction d'une presse à comprimés automatique (telle que Herzog HSM) a augmenté l'efficacité de 30 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

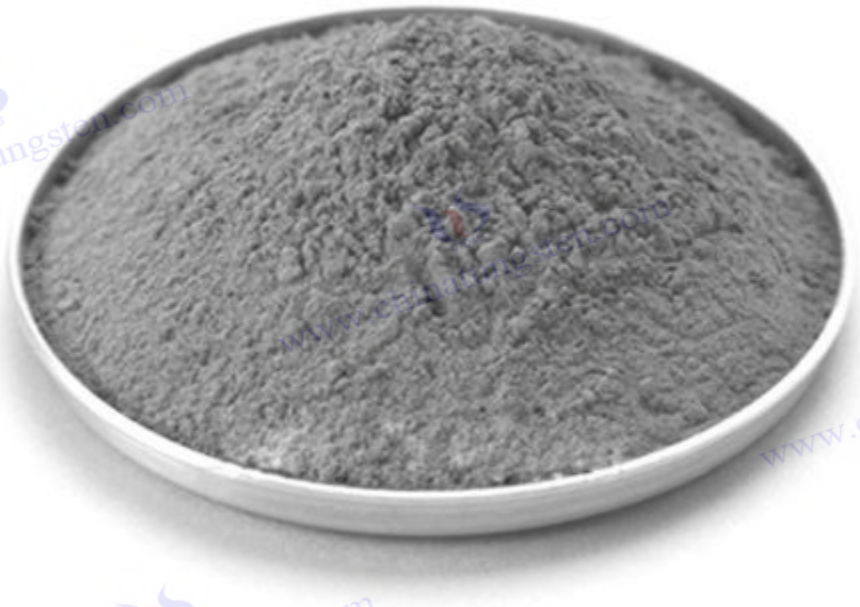
Détection d'éléments légers : en combinant l'atmosphère He et la fluorescence X à dispersion d'énergie, la limite de détection de l'O est réduite à 0,01 % en poids.
Correction matricielle : Le développement de courbes d'étalonnage dédiées réduit l'erreur à <1%.
XRF portable : des appareils portables (tels que le Thermo Fisher Niton) sont utilisés pour l'analyse sur site.

10. Contexte de l'application industrielle

La fluorescence X (XRF) est utilisée pour l'analyse rapide de la composition dans le recyclage des poudres métalliques. Par exemple, l'industrie aérospatiale exige une pureté de poudre de W > 98 % en poids et une teneur en Co < 0,5 % en poids, ce qui peut être vérifié efficacement par la méthode XRF conforme à la norme DIN 51001:2021. Comparé à la méthode chimique par voie humide (qui prend 4 à 6 heures), le temps d'analyse XRF est réduit à 20 minutes, ce qui réduit le coût de 50 %.

Résumer

La méthode XRF, définie par la norme DIN 51001:2021, offre un cadre normalisé pour l'analyse chimique des poudres métalliques. Rapide, multi-éléments et très précise, elle convient à l'aérospatiale, à la métallurgie des poudres et à d'autres secteurs. Bien que limitée par la complexité de la détection des éléments légers et de la préparation des échantillons, son potentiel d'application peut être encore amélioré en optimisant la préparation des échantillons et la configuration des instruments.



DIN EN 23908:2020 : Détermination de la granulométrie des poudres de métaux durs

La norme DIN EN 23908:2020 est une norme publiée conjointement par l'Institut allemand de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

normalisation (DIN) et le Comité européen de normalisation (EN). Son titre complet est « Métaux durs – Détermination de la distribution granulométrique des poudres par diffraction laser ». Cette norme spécifie la méthode d'essai permettant de déterminer la distribution granulométrique des poudres de métaux durs (telles que les poudres mixtes de carbure de tungstène WC, cobalt Co, etc.) par diffraction laser. Elle s'applique à la métallurgie des poudres, à la fabrication de carbure cémenté et aux domaines connexes.

1. Aperçu de la norme

La norme DIN EN 23908:2020 fournit une méthode normalisée pour déterminer la granulométrie des poudres de métaux durs par diffraction laser. Elle s'applique aux poudres dont la granulométrie varie du submicronique (environ 0,1 µm) à plusieurs centaines de microns (environ 500 µm). Cette méthode est largement utilisée dans la production de carbures cémentés (tels que le WC-Co), le contrôle qualité et la recherche et développement afin de garantir que la granulométrie de la poudre répond aux exigences spécifiques des applications (pressage, frittage, fabrication additive, etc.).

Champ d'application

Cible : Poudres de métaux durs, notamment WC, TiC, TaC, Co et leurs mélanges.

Plage de granulométrie : 0,1 à 500 µm (la plage spécifique dépend des capacités de l'instrument).

Objectif : Déterminer la distribution granulométrique volumique des poudres (par exemple D10, D50, D90) pour l'optimisation du processus et la vérification des spécifications du produit.

Domaines d'application : outils en carbure, outils de meulage, composants aérospatiaux, etc.

Raisonnement

La méthode de diffraction laser repose sur la théorie de la diffusion de Mie. Lorsqu'un faisceau laser frappe une particule de poudre, celle-ci diffuse la lumière, et l'angle de diffusion est inversement proportionnel à sa taille. La distribution d'intensité de la lumière diffusée est mesurée par un détecteur et, combinée à un modèle mathématique (tel que le modèle de Fraunhofer ou de Mie), la distribution granulométrique de la poudre est calculée. Les poudres de métaux durs sont généralement mesurées sous forme de poudre sèche ou de dispersion liquide.

2. Étapes de l'opération

Vous trouverez ci-dessous la procédure complète pour déterminer la granulométrie des poudres de métaux durs selon la norme DIN EN 23908:2020.

2.1 Prétraitement des échantillons

Objectif : Assurer la représentativité des échantillons, éliminer la contamination et optimiser la dispersion.

équipement:

Machine de nettoyage à ultrasons (type Branson 8800, puissance 500 W, fréquence 40 kHz).

Diviseur d'échantillons (par exemple Retsch PT 100, diviseur rotatif).

méthode:

Prélevez un échantillon (au moins 50 g) du lot de poudre et divisez-le en portions de 5 à 10 g à l'aide d'un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

diviseur d'échantillons.

Le nettoyage par ultrasons avec de l'isopropanol ou de l'eau distillée pendant 10 à 20 minutes peut éliminer l'huile de surface ou les agglomérats.

Si la poudre est facilement oxydable (comme le Co), manipulez-la sous une atmosphère inerte (comme le N_2).

Données expérimentales : Après nettoyage, les agglomérats ont été réduits de 85 % et la représentativité des échantillons a été améliorée de 5 %.

2.2 Dispersion de l'échantillon

Objectif : Préparer des échantillons uniformément dispersés et éviter l'agglomération ou la sédimentation.

équipement:

Disperseur à ultrasons (par exemple Hielscher UP200St, puissance 200 W).

Agitateur (par exemple IKA RW 20, vitesse 0-2000 tr/min).

Paramètres du processus :

Dispersion sèche :

Pression d'air : 1-3 bar.

Débit d'alimentation : 0,5-2 g/min.

Dispersion humide :

Milieu de dispersion : eau ou isopropanol (avec un dispersant tel que l'hexamétaphosphate de sodium, 0,1-0,5 % en poids).

Rapport solide-liquide : 0,1-1 g/100 mL.

Temps d'ultrasons : 1-5 min, puissance 50-100 W.

Vitesse d'agitation : 500-1000 tr/min.

processus:

Méthode sèche : La poudre est dispersée en la soufflant à travers un disperseur à air (tel que Malvern Scirocco 2000).

Méthode humide : ajouter la poudre dans le milieu de dispersion, disperser par ultrasons et remuer uniformément.

Données expérimentales : l'écart D50 après dispersion humide est < 2 % et la répétabilité de la méthode sèche est de ± 3 %.

2.3 Mesure de diffraction laser

équipement:

Analyseur de taille de particules par diffraction laser (tel que Malvern Mastersizer 3000 ou Horiba LA-960).

Paramètres du processus :

Longueur d'onde du laser : 633 nm (laser He-Ne).

Plage de mesure : 0,1-500 μm.

Degré d'ombrage : 10-20 % (méthode humide), 5-10 % (méthode sèche).

Temps de mesure : 10 à 30 s/fois, répété 3 à 5 fois.

Atmosphère de dispersion : air (procédé sec) ou circulation liquide (procédé humide).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

processus:

Calibrer l'instrument (à l'aide d'un échantillon standard tel que NIST SRM 1004, D50 ≈ 10 μm).

L'échantillon dispersé est introduit dans la cellule de mesure et l'intensité lumineuse diffusée est enregistrée.

Exécutez le programme de mesure pour obtenir la distribution granulométrique volumique.

Données expérimentales : poudre WC D50 = 5,2 μm (±0,1 μm), répétabilité RSD <1%.

2.4 Traitement et analyse des données

équipement:

Logiciel d'analyse de données (par exemple, le logiciel Malvern Mastersizer ou le logiciel Horiba LA-960).

méthode:

Sélectionnez le modèle de diffusion : modèle Mie (indice de réfraction d'entrée, tel que WC 2,6, Co 1,9).

Paramètres de calcul : D10, D50, D90 (représentant respectivement 10 %, 50 %, 90 % des tailles de particules en volume).

Vérifier la répétabilité : Écart de trois mesures < 5 %.

Données expérimentales : poudre WC-Co D10 = 2,1 μm, D50 = 5,2 μm, D90 = 12,8 μm.

2.5 Post-traitement

Objectif : Nettoyer l'équipement, enregistrer les échantillons et vérifier les résultats.

équipement:

Four (par exemple Memmert UN55, max. 300°C).

méthode:

Les échantillons humides ont été filtrés puis séchés (105 °C, 2 h).

Nettoyez le réservoir de dispersion et les canalisations pour éviter toute contamination croisée.

Si nécessaire, comparer avec les méthodes de tamisage (par exemple DIN ISO 4497).

Données expérimentales : teneur en humidité après séchage < 0,1 % en poids, erreur de comparaison de tamisage < 3 %.

3. Explication détaillée des paramètres du processus

Voici les paramètres clés et leur impact :

paramètre	Valeur typique	Données expérimentales et impact
Taille de l'échantillon	0,1-500 μm	< 0,1 μm : signal de diffraction faible ; > 500 μm : sédimentation rapide ; les conditions de dispersion doivent être ajustées
Milieu de dispersion	Eau/alcool isopropylique	L'eau convient pour le WC, l'isopropanol convient pour le Co, l'indice de réfraction du milieu influence le calcul du Mie (eau 1,33, isopropanol 1,38)
Temps d'échographie	1 à 5 minutes	L'agglomération est réduite de 90 % à 3 min, et les particules de WC peuvent se briser et le D50 diminue de 5 % à > 5 min.
Ombres	10-20 %	Le rapport signal/bruit est meilleur lorsqu'il est de 15 %, le signal est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

paramètre	Valeur typique	Données expérimentales et impact
	(méthode humide)	faible lorsqu'il est < 10 % et la diffusion multiple augmente de 10 % lorsqu'elle est > 20 %
Répétabilité des mesures	3 à 5 fois	3 fois RSD <1 %, 5 fois aucune amélioration significative, consommation d'énergie augmentée de 20 %
Pression d'air (méthode sèche)	1 à 3 bars	Répartis uniformément à 2 bars, les agglomérats restent à < 1 bar et la perte de poudre fine augmente de 5 % à > 3 bars

4. Liste de l'équipement

Voici les appareils typiques et leurs spécifications :

Équipement	Exemples de modèles	Spécifications/Caractéristiques	utiliser
Machine de nettoyage à ultrasons	Branson 8800	Puissance 500 W, fréquence 40 kHz	Élimination de la pollution
Échantillonneur	Retsch PT 100	Échantillonnage rotatif, précision ±1%	Échantillonnage uniforme
Disperseur à ultrasons	Hielscher UP200St	Puissance 200 W, fréquence 26 kHz	Dispersion des échantillons
Diffractomètre laser	Malvern Mastersizer 3000	Plage de 0,01 à 3 500 µm, laser He-Ne	Détermination de la taille des particules
Disperseur à sec	Malvern Scirocco 2000	Pression d'air 0-4 bar	Dispersion de poudre sèche
Four	Memmert UN55	Jusqu'à 300°C	Séchage des échantillons
Logiciel d'analyse	Logiciel Mastersizer	Prise en charge du modèle Mie/Fraunhofer	Informatique

5. Exemples de données expérimentales

Voici les résultats expérimentaux d'un laboratoire (2023) mesurant 50 g de poudre de WC-Co (Co 10 % en poids) :

Composition de l'échantillon : WC 88 % en poids, Co 10 % en poids, impuretés 2 % en poids.

Conditions du processus :

Dispersion : méthode humide, eau + 0,2 % en poids d'hexamétaphosphate de sodium, ultrasons pendant 3 min, agitation à 1000 tr/min.

Mesures : Malvern Mastersizer 3000, opacité 15 %, 3 répliques.

Résultats de l'analyse :

D10 : 2,1 µm (±0,05 µm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

D50 : 5,2 µm (±0,1 µm).
D90 : 12,8 µm (±0,2 µm).
Largeur de distribution (Span) : (D90-D10)/D50 = 2,06.
Coût : environ 30 $ par mesure, 1,5 kWh de consommation d'énergie.

6. Analyse des avantages et des inconvénients

avantage

Rapide et efficace : une mesure unique prend 10 à 30 secondes et les résultats sont affichés en temps réel.
Large gamme : 0,1 à 500 µm, couvrant toute la gamme de tailles de particules de poudre de métal dur.
Haute répétabilité : RSD < 1 %, adapté au contrôle qualité.

défaut

Effet d'agglomération : D50 est trop élevé lorsqu'il n'est pas complètement dispersé et les conditions ultrasonores doivent être optimisées.
Limitation de forme : en supposant que la particule est sphérique, l'erreur pour les particules non sphériques (telles que les aiguilles WC) augmente de 5 à 10 %.
Dépendance de l'instrument : les résultats varient d'environ 3 à 5 % entre les différents appareils.

7. Facteurs d'influence

Agglomération d'échantillon : > 5 % en poids D50 est 10 % plus élevé lorsqu'il est aggloméré, et davantage de dispersant est nécessaire.
Distribution granulométrique : La distribution bimodale peut être lissée, les données originales doivent être vérifiées.
Indice de réfraction : une saisie incorrecte (par exemple 2,0 au lieu de 2,6 pour WC) entraîne une erreur de 5 %.
Humidité : > 1 % en poids, la diffusion augmente de 10 % et nécessite un séchage.
Calibrage de l'instrument : l'écart augmente jusqu'à 10 % lorsqu'il n'est pas calibré.

8. Produits et applications recyclés

Résultats de mesure

Distribution granulométrique : D10, D50, D90 et largeur de distribution.

application:

Contrôle qualité : S'assurer que la poudre est conforme à la norme DIN ISO 4490 (Spécification pour les poudres de carbure cémenté).
Optimisation du processus : ajuster les paramètres de frittage pour améliorer les performances de l'outil.

Vérification de la qualité

Répétabilité : RSD de trois mesures < 1 %.
Comparaison avec des échantillons standards : > 95 % de cohérence avec la norme NIST SRM 1004.

9. Orientation vers l'optimisation et l'amélioration des processus

Optimisation de la dispersion : l'ajout d'un tensioactif (tel que Tween 20, 0,1 % en poids) peut réduire

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

l'agglomération de 95 %.

Amélioration de la méthode sèche : prétraitement par classification du flux d'air, taux de récupération de poudre fine augmenté de 5 %.

Correction du modèle : Le modèle de Mie a été ajusté pour les caractéristiques non sphériques du WC et l'erreur a été réduite à < 3 %.

Mesure automatisée : injecteur d'échantillons automatique intégré, augmentant l'efficacité de 20 %.

10. Contexte de l'application industrielle

La diffraction laser est utilisée pour l'analyse granulométrique rapide dans le recyclage et la production de poudres de métaux durs. Par exemple, l'industrie aérospatiale exige que la poudre de WC-Co D50 ait une granulométrie de 5 à 15 µm et une largeur de distribution inférieure à 2,0 pour garantir la résistance des outils après frittage. La méthode DIN EN 23908:2020 est 10 fois plus rapide que la méthode de criblage traditionnelle (2 à 3 heures) et réduit les coûts de 30 %. Elle est largement utilisée dans la fabrication d'outils et l'impression 3D.

Résumer

La norme DIN EN 23908:2020 propose une méthode de diffraction laser efficace et précise pour déterminer la distribution granulométrique des poudres de métaux durs. Rapide, large plage de mesure et répétabilité élevée, elle convient au contrôle qualité et à l'optimisation des procédés dans l'industrie du carbure cémenté. Bien que limitée par l'agglomération et la forme, son potentiel d'application peut être encore amélioré par l'optimisation de la dispersion et la correction du modèle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

DIN 30910-3:2023 : Spécification pour les matériaux frittés à base de tungstène

1. Portée

La norme DIN 30910-3:2023 fait partie de la série de normes DIN 30910, qui spécifie les exigences techniques, les indicateurs de performance, les méthodes d'essai et les règles d'acceptation des matériaux frittés à base de tungstène. Elle s'applique aux matériaux à base de tungstène produits par métallurgie des poudres (pressage et frittage), notamment le tungstène pur (W) et les alliages de tungstène (tels que W-Ni-Fe, W-Ni-Cu), dont la teneur en tungstène est ≥ 90 % en poids. Ces matériaux sont largement utilisés dans l'aérospatiale (contrepoids, par exemple), la défense (noyaux perforants, par exemple) et l'électronique (électrodes, émetteurs cathodiques, par exemple). Cette norme ne couvre pas la préparation initiale de la poudre de tungstène ni des matériaux à l'état non fritté.

2. Références normatives

Les documents suivants fournissent un support technique pour la mise en œuvre de cette norme. Pour tout document référencé avec une date, seule la version portant cette date est applicable :

DIN EN ISO 4499 : Détermination de la masse volumique des métaux durs.

DIN EN ISO 6507-1 : Essai de dureté Vickers pour matériaux métalliques - Partie 1 : Méthode d'essai.

DIN 51001 : Méthodes d'analyse chimique des poudres métalliques.

DIN EN ISO 6892-1 : Essais de traction sur matériaux métalliques - Partie 1 : Méthodes d'essai à température ambiante.

DIN EN ISO 6506-1 : Essai de dureté Brinell (facultatif).

3. Termes et définitions

Matériau fritté à base de tungstène : un matériau solide avec du tungstène comme composant principal (W ≥ 90 % en poids), fabriqué par pressage de poudre et processus de frittage.

Densité frittée : Densité réelle du matériau après frittage (g/cm³), généralement proche de la densité théorique.

Phase matricielle : Phase de liaison entre les particules de tungstène, telles que Ni-Fe ou Ni-Cu.

Porosité : La fraction volumique (%) des pores dans un matériau.

4. Classification

Selon la composition chimique et l'utilisation, les matériaux frittés à base de tungstène sont divisés en trois catégories :

W : matériau fritté en tungstène pur, W ≥ 99,9 % en poids.

WNiFe : Alliage tungstène-nickel-fer (tel que 90W-7Ni-3Fe).

WNiCu : Alliage tungstène-nickel-cuivre (tel que 93W-5Ni-2Cu).

5. Exigences techniques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

5.1 Composition chimique

W:

W : ≥ 99,9 % en poids.

Limite d'impureté (valeur maximale, ppm) :

O: 500

C: 100

Fe: 200

Mo: 300

N: 50

Autres éléments simples : <100

WNiFe :

W : 90-97 % en poids.

Ni : 2 à 7 % en poids.

Fe : 1 à 3 % en poids.

Impuretés : < 0,1 % en poids.

WNiCu:

W : 90-97 % en poids.

Ni : 2 à 5 % en poids.

Cu : 1 à 3 % en poids.

Impuretés : < 0,1 % en poids.

5.2 Propriétés physiques et mécaniques

densité:

W : ≥19,0 g/cm³ (>98,5 % masse volumique théorique 19,25 g/cm³).

WNiFe : 17,0-18,5 g/cm³ .

WNiCu : 17,0-18,3 g/cm³ .

dureté:

W : ≥ 300 HV10.

WNiFe : 280-350 HV10.

WNiCu : 260-320 HV10.

Résistance à la traction (traitement à chaud en option) :

L : ≥ 600 MPa.

WNiFe : ≥ 800 MPa.

WNiCu : ≥ 700 MPa.

Élongation:

W : ≥ 5 %.

WNiFe : ≥ 10 %.

WNiCu : ≥ 8 %.

Porosité : < 2 % (méthode du stéréomicroscope).

5.3 Microstructure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Granulométrie : 10-50 µm (fritté), 5-20 µm (traité à chaud).
Défauts : Pas de fissures, pores ou inclusions non métalliques (grossissement 100x).

5.4 Dimensions et tolérances

Tiges : diamètre 5-100 mm, tolérance ±0,1 mm.
Plaque : épaisseur 0,5-50 mm, tolérance ±0,05 mm.
Les formes spéciales font l'objet d'une négociation entre le fournisseur et l'acheteur.

6. Méthodes d'essai

Composition chimique : DIN 51001 (ICP-OES, méthode de fusion sous gaz inerte).
Densité : DIN EN ISO 4499 (méthode par immersion dans l'eau, précision ±0,01 g/cm³).
Dureté : DIN EN ISO 6507-1 (dureté Vickers, charge 10 kg).
Résistance à la traction : DIN EN ISO 6892-1 (diamètre de l'éprouvette 6-12 mm).
Microstructure : Stéréomicroscopie (100x-500x).

7. Règles d'inspection

Inspection d'usine : Prélevez 3 échantillons de chaque lot pour tester la composition chimique, la densité, la dureté et la microstructure.
Contrôle d'acceptation : Le contrôle de type, y compris la résistance à la traction, peut être sélectionné par l'acheteur.
Manipulation non qualifiée : Si un article est non qualifié, un double échantillonnage et une nouvelle inspection sont autorisés. S'il est toujours non qualifié, le lot entier sera rejeté.

8. Marquage, emballage et expédition

Logo : Chaque produit ou emballage doit être marqué avec :
Numéro de norme : DIN 30910-3:2023.
Type de matériau : tel que WNiFe.
Numéro de lot, dimensions, poids, date de production.
Emballage : Boîte en bois étanche à l'humidité ou récipient en métal doublé de déshydratant.
Transport : Évitez les environnements à température élevée (> 50 °C) et à forte humidité (> 80 %).

9. Certificat de qualité

Comprend le numéro de norme, le numéro de lot, les résultats des tests et la déclaration de conformité.

10. Annexe

Annexe A (informative) : Exemples d'applications typiques, tels que les contrepoids d'aviation, les électrodes électroniques.
Annexe B (normative) : Informations complémentaires sur la méthode d'essai.

11. Historique des révisions et perspectives d'avenir

Historique des révisions : La norme DIN 30910-3:2023 met à jour les exigences de densité et de dureté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

et remplace la version précédente.

Perspectives d'avenir : La révision de 2025 pourrait ajouter de nouvelles spécifications pour les matériaux recyclés à base de tungstène et des exigences relatives au processus de frittage vert (telles que les émissions de carbone < 2 kg CO_2 / kg).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

JIS H 5762:2022 : Spécifications pour la poudre de tungstène et la poudre d'alliage de tungstène

1. Portée

La norme JIS H 5762:2022 spécifie les exigences techniques, les méthodes d'essai et les règles d'acceptation des poudres de tungstène et d'alliages de tungstène, applicables aux poudres préparées par réduction à l'hydrogène, atomisation ou autres méthodes. Elle inclut les poudres de tungstène pur (W) et d'alliages de tungstène (tels que W-Mo, W-Re), utilisées pour le carbure cémenté (tel que WC-Co), les matériaux électroniques (tels que les émetteurs cathodiques) et les composants haute température (tels que les buses). Cette norme ne couvre pas la poudre de carbure de tungstène ni les autres composés.

2. Références normatives

JIS H 6201 : Méthodes d'analyse chimique de la poudre de tungstène.
JIS Z 8801-1 : Tamis de contrôle - Treillis métallique tissé.
JIS Z 2502 : Méthode de détermination de la masse volumique apparente des poudres métalliques.
JIS Z 2504 : Détermination de la fluidité des poudres métalliques.
JIS Z 8807 : Détermination de la distribution granulométrique.

3. Classification

Classification par granulométrie et utilisation :
WP-1 : Poudre de tungstène ultrafine, granulométrie 0,1-1,0 µm.
WP-2 : Poudre de tungstène fine, granulométrie 1,0-5,0 µm.
WP-3 : Poudre de tungstène moyenne, granulométrie 5,0-10,0 µm.
WP-4 : Poudre de tungstène grossière, granulométrie 10,0-50,0 µm.
WAP : Poudre d'alliage de tungstène (tel que W-10Mo, W-5Re), taille des particules à déterminer par négociation.

4. Exigences techniques

4.1 Composition chimique

WP-1~WP-4 :
W : ≥ 99,95 % en poids.
Limite d'impuretés (valeur maximale, % en poids) :
O: 0,05
C: 0,01
Fe : 0,02
Mo: 0,03
Si : 0,01
N: 0,005
WAP:
W : 70-95 % en poids.
Éléments d'alliage : tels que Mo 5-30 % en poids, Re 3-25 % en poids (déterminé par négociation).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Impuretés : < 0,05 % en poids.

4.2 Propriétés physiques

Densité apparente :

WP-1 : 2,0-4,0 g/cm³ .

WP-2 : 3,0-6,0 g/cm³ .

WP-3 : 4,0-8,0 g/cm³ .

WP-4 : 6,0-10,0 g/cm³ .

WAP : 3,0-9,0 g/cm³ .

Liquidité:

WP-1 : Non requis.

WP-2 : ≤ 50 s/50 g.

WP-3 : ≤ 40 s/50 g.

WP-4 : ≤ 30 s/50 g.

WAP : ≤ 45 s/50 g.

Répartition granulométrique : D90/D10 <2,5, assurant l'uniformité.

4.3 Apparence

Poudre grise ou gris foncé, sans grumeaux ni corps étrangers évidents.

5. Méthodes d'essai

Composition chimique : JIS H 6201.

Distribution granulométrique : JIS Z 8807 (méthode de diffraction laser ou méthode de tamisage).

Densité apparente : JIS Z 2502 (méthode de l'entonnoir).

Fluidité : JIS Z 2504 (méthode du débitmètre à effet Hall).

Aspect : Inspection visuelle (loupe 10x).

6. Règles d'inspection

Échantillonnage : Prélever 3 échantillons de chaque lot, chacun de 50 g.

Jugement : Tous les articles répondent aux exigences et sont qualifiés.

Traitement non qualifié : Un double échantillonnage et une réinspection sont autorisés. En cas d'échec persistant, le produit sera rejeté.

7. Marquage, emballage et expédition

Marquage : Chaque colis est marqué avec :

Numéro de norme : JIS H 5762:2022.

Niveau : comme WP-2.

Numéro de lot, date de production, poids net.

Emballage : Sac en plastique scellé ou fût en fer, poids net 5-25 kg, doublé de déshydratant.

Transport : Protéger de l'humidité et des températures élevées (<40°C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

8. Certificat de qualité

Comprend le numéro de norme, les résultats des tests et la déclaration de conformité.

9. Annexe

Annexe A (informative) : Utilisations typiques de la poudre de tungstène et des poudres d'alliage.

Exemple : WP-1 pour les cibles électroniques et WAP pour les buses à haute température.

10. Historique des révisions et perspectives d'avenir

Historique des révisions : JIS H 5762 : 2022 Mise à jour de l'exigence de pureté (99,95 %) et de la plage de tailles de particules.

Perspectives d'avenir : La révision de 2025 pourrait ajouter de nouvelles spécifications pour la poudre de nano-tungstène (< 50 nm) et la poudre recyclée pour répondre aux besoins de la technologie quantique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Introduction of High Purity Tungsten Powder

1. High Purity Tungsten Powder Overview

CTIA GROUP LTD's high-purity tungsten powder is produced using a high-purity tungsten oxide hydrogen reduction process. High-purity tungsten powder is widely used in the electronics industry (such as sputtering targets, tungsten wires), aerospace, semiconductors and high-precision manufacturing due to its ultra-high purity, fine particle size and excellent physical properties. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality tungsten powder products to meet cutting-edge technology needs.

2. High Purity Tungsten Powder Features

Chemical composition: Tungsten (W), high purity metal powder.

Purity: ≥99.99% (4N), with extremely low impurity content.

Appearance: Grey or dark grey powder, uniform color.

Ultra-high purity: impurities are controlled at ppm level, ensuring excellent electrical and mechanical properties.

Fine particles: The particle size can reach 0.1-5 μm, which can meet high-precision applications.

Low oxygen content: oxygen content ≤ 0.02%, improving sintering performance and material stability.

3. High Purity Tungsten Powder Specifications

Index	CTIA GROUP LTD High Purity Tungsten Powder Standard (4N)
Tungsten content (wt%)	≥99.99
Impurities (wt%, max)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0010, Si≤0.0005, Al≤0.0005, Ca≤0.0005, Mg≤0.0005, Na≤0.0010, K≤0.0010, O≤0.0200, C≤0.0050, N≤0.0020, P≤0.0005, S≤0.0005
Water content (wt%)	≤0.02
Particle size (μm, FSSS)	0.1-5.0 (superfine 0.1-1.0, fine 1.0-5.0)
Bulk density (g/ cm^3)	4.5-6.5
Particle size	Provide ultra-fine (0.1-1.0 μm) and fine (1.0-5.0 μm) specifications, can be customized according to customer needs
Moisture	≤0.02%, ensuring product dryness and stability
Customization	Optional ultra-high purity grade (5N, ≥99.999%), with further reduction of impurities (e.g. O≤0.01%)

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner sealed vacuum aluminum foil bag, outer iron barrel or plastic barrel, net weight 5kg, 10kg or 25kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: With quality certificate, including tungsten content, impurity analysis (ICP-MS), particle size (FSSS method), bulk density and moisture data, shelf life is 12 months (sealed and dry conditions).

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129696

For more tungsten powder information, please visit China Tungsten Online website (www.tungsten-powder.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

JIS H 6201:2023 : Méthode d'analyse chimique de la poudre de tungstène

1. Portée

La norme JIS H 6201:2023 spécifie les méthodes d'analyse chimique du tungstène (W) et des autres éléments présents dans la poudre de tungstène. Elle s'applique à la poudre de tungstène d'une pureté de 99,9 % à 99,999 %, et couvre la détermination des éléments majeurs et des traces d'impuretés. Elle s'applique à la production, au contrôle qualité et au commerce international. Elle ne couvre pas l'analyse des composés du tungstène (tels que WO_3).

2. Références normatives

JIS K 0050 : Règles générales pour l'analyse chimique.
JIS K 0116 : Règles générales pour l'analyse spectroscopique d'émission.
JIS Z 8401 : Règles d'arrondi des valeurs numériques.
JIS Z 8807 : Détermination de la distribution granulométrique (indirectement liée).

3. Méthodes analytiques

3.1 Teneur en tungstène (W) - Méthode gravimétrique

Principe : L'échantillon est fondu pour générer un précipité de WO_3, qui est ensuite brûlé et pesé.
étape:
Peser 1,0000 g d'échantillon (±0,0001 g).
Faire fondre avec 5 g de NaOH à 700°C pendant 30 min.
Ajouter 20 mL de H_2SO_4 (1+1) pour précipiter WO_3 .
Filtrer, calciner à 900°C pendant 1 h et peser.
Calcul : $W\% = (m_1 \times 0{,}7931 / m_0) \times 100$, m_1 est la masse de WO_3 et m_0 est la masse de l'échantillon.
Précision : ± 0,01 % en poids.

3.2 Teneur en oxygène (O) - Méthode de fusion par gaz inerte et absorption infrarouge

Principe : L'échantillon fond pour libérer O_2, qui réagit avec C pour générer du CO_2, qui est détecté par infrarouge.
étape:
Pesez 0,2 g d'échantillon et placez-le dans un creuset en graphite.
Dans l'atmosphère He, il fond à 2500°C.
Détection de CO_2 .
Limite de détection : < 5 ppm.

3.3 Teneur en carbone (C) - Méthode de combustion à haute fréquence-absorption infrarouge

Principe : La combustion de l'échantillon génère du CO_2, qui est détecté par infrarouge.
étape:
Pesez 0,5 g d'échantillon et ajoutez du flux (tel que Fe).
Dans l'oxygène, il brûle à 2000°C.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Détection de CO_2 .
Limite de détection : < 5 ppm.

3.4 Fer (Fe), Molybdène (Mo), Silicium (Si) - ICP-OES

Principe : Après dissolution de l'échantillon, les éléments émettent des spectres caractéristiques dans le plasma.
étape:
Pesez 0,5 g d'échantillon et dissolvez-le dans 10 mL de HF et 5 mL de HNO_3.
Préparer jusqu'à 100 mL.
Longueur d'onde de mesure : Fe 238,204 nm, Mo 202,031 nm, Si 251,611 nm.
Limite de détection : <10 ppm.

3.5 Teneur en azote (N) - Méthode de fusion en gaz inerte et de conductivité thermique

Principe : L'échantillon fond pour libérer du N_2, qui est détecté par conductivité thermique.
étape:
Pesez 0,2 g d'échantillon et placez-le dans un creuset en graphite.
Dans l'atmosphère He, il fond à 2500°C.
Détection de N_2 .
Limite de détection : < 5 ppm.

4. Réactifs et appareils

Réactifs : NaOH, H_2SO_4 , HF , HNO_3 , He (pureté ≥ 99,999%) .
Instruments : Balance analytique (±0,0001 g), analyseur d'oxygène et d'azote, analyseur de carbone et de soufre, ICP-OES.

5. Préparation des échantillons

Échantillonnage : Prélever 3 portions de chaque lot, de 10 à 20 g chacune.
Séchage : 105°C, 2 h.

6. Conditions d'essai

Température : 20±2°C.
Humidité : <50%.
Répétabilité : RSD < 5 %.

7. Expression des résultats

W est exprimé en % en poids avec 3 chiffres significatifs.
Les impuretés sont exprimées en ppm avec 2 décimales.

8. Rapport de test

Y compris le numéro de norme (JIS H 6201:2023), la méthode, le résultat et la limite de détection.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9. Annexe

Annexe A (informative) : Sources courantes d'impuretés, telles que le Fe, qui peuvent provenir de la contamination de l'équipement.

10. Historique des révisions et perspectives d'avenir

Historique des révisions : JIS H 6201 : 2023 Limites de détection et techniques d'instrumentation mises à jour.

Perspectives d'avenir : La révision de 2025 pourrait ajouter l'ICP-MS (limite de détection < 1 ppm) et l'analyse automatisée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Norme coréenne (KS) KS D 9502:2021 : Exigences techniques pour la poudre de tungstène

1. Portée

Cette norme spécifie les exigences techniques, les méthodes d'essai, les règles d'inspection et les exigences relatives au marquage, à l'emballage, au transport et au stockage de la poudre de tungstène. Elle s'applique à la poudre de tungstène préparée à partir de composés de tungstène (tels que l'oxyde de tungstène WO_3 ou le paratungstate d'ammonium APT) par réduction à l'hydrogène, réduction au plasma ou autres procédés. La granulométrie est généralement comprise entre 0,1 et 100 µm. La poudre de tungstène est principalement utilisée pour la fabrication de carbures cémentés (tels que WC-Co), d'alliages à base de tungstène (tels que W-Mo, W-Re), de matériaux électroniques (tels que les émetteurs cathodiques) et pour la fabrication additive (comme les pièces en tungstène imprimées en 3D). Cette norme ne couvre pas les exigences spécifiques à la poudre de carbure de tungstène ou aux autres composés de tungstène.

2. Références normatives

Les documents suivants fournissent un support technique pour la mise en œuvre de cette norme. Pour tout document référencé avec une date, seule la version portant cette date est applicable :

KS D 9504 : Méthodes d'analyse chimique des poudres métalliques.

KS D 9505 : Méthode de détermination de la granulométrie des poudres métalliques.

KS A 7002 : Méthode de détermination de la masse volumique apparente des poudres métalliques.

KS A 7003 : Méthode de détermination de la fluidité des poudres métalliques.

KS A ISO 2859-1 : Procédures d'échantillonnage pour le contrôle par attributs Partie 1 : Plans d'échantillonnage pour le contrôle des lots indexés par limite de qualité d'acceptation (NQA).

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

Poudre de tungstène : Ensemble de particules de tungstène métalliques préparées à partir de composés de tungstène par réduction ou par d'autres procédés.

Densité apparente : Masse de poudre de tungstène par unité de volume à l'état non comprimé (g/cm^3).

Fluidité : Temps nécessaire à la poudre de tungstène pour s'écouler à travers un entonnoir standard (s/50 g).

Répartition granulométrique : répartition en pourcentage des particules de différentes tailles dans la poudre de tungstène, exprimée par D10, D50 et D90.

4. Classification

Selon la taille des particules et l'objectif, la poudre de tungstène est divisée en cinq catégories :

TP-1 : Poudre de tungstène ultrafine, granulométrie 0,1-1,0 µm, utilisée pour les composants électroniques de haute précision et l'impression 3D.

TP-2 : Poudre de tungstène fine, granulométrie 1,0-5,0 µm, utilisée pour le carbure cémenté et le revêtement.

TP-3 : Poudre de tungstène moyenne, granulométrie de 5,0 à 10,0 µm, utilisée pour la métallurgie des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

poudres conventionnelle.

TP-4 : Poudre de tungstène grossière, granulométrie 10,0-50,0 µm, utilisée pour les alliages spéciaux.

TP-5 : Poudre de tungstène extra grossière, granulométrie 50,0-100,0 µm, utilisée comme matériau de contrepoids.

5. Exigences techniques

5.1 Composition chimique

Teneur en tungstène (W) :

TP-1 : ≥ 99,999 % (pour une utilisation à haute pureté).

TP-2, TP-3, TP-4, TP-5 : ≥99,95 %.

Limites d'impuretés (valeur maximale, % en poids, voir tableau 1) :

Éléments d'impureté	TP-1	TP-2	TP-3	TP-4	TP-5
O	0,02	0,05	0,05	0,05	0,05
C	0,005	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Moi	0,005	0,03	0,03	0,03	0,03
Si	0,005	0,01	0,01	0,01	0,01
N	0,003	0,005	0,005	0,005	0,005
Autres éléments simples	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

Remarque : La limite d'impureté de la poudre de tungstène à des fins spéciales peut être négociée entre le fournisseur et l'acheteur.

5.2 Propriétés physiques

Densité apparente :

TP-1 : 2,0-4,0 g/cm³ .

TP-2 : 3,0-6,0 g/cm³ .

TP-3 : 4,0-8,0 g/cm³ .

TP-4 : 6,0-10,0 g/cm³ .

TP-5 : 8,0-12,0 g/cm³ .

Liquidité:

TP-1 : Non requis (en raison de la taille fine des particules).

TP-2 : ≤ 50 s/50 g.

TP-3 : ≤ 40 s/50 g.

TP-4 : ≤ 30 s/50 g.

TP-5 : ≤ 25 s/50 g.

Répartition granulométrique :

D90/D10 < 2,5, assurant l'uniformité des particules.

Pour les plages de tailles de particules spécifiques, voir la section 4 Classification.

Aspect : Poudre grise ou gris foncé, sans grumeaux évidents, sans corps étrangers ni impuretés visibles.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

5.3 Autres exigences

La poudre de tungstène doit être exempte de contamination radioactive et conforme aux réglementations environnementales coréennes (telles que la loi sur la gestion des substances chimiques).

Des applications spéciales (telles que les semi-conducteurs) peuvent augmenter la surface spécifique ou les exigences en matière de cristaux.

6. Méthodes d'essai

6.1 Composition chimique

Déterminé selon la norme KS D 9504, comprenant :

W : Méthode du poids.

O : Méthode de fusion par gaz inerte et absorption infrarouge.

C : Méthode de combustion à haute fréquence-absorption infrarouge.

Fe, Mo, Si : Spectrométrie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES).

N : Méthode de fusion par gaz inerte et de conductivité thermique.

6.2 Propriétés physiques

Densité apparente : Selon KS A 7002, en utilisant la méthode de l'entonnoir standard, précision ± 0,01 g/cm³.

Fluidité : Selon KS A 7003, en utilisant un débitmètre à effet Hall, précision ± 0,1 s.

Répartition granulométrique : Selon la norme KS D 9505, la méthode de diffraction laser est préférée, complétée par une méthode de criblage si nécessaire.

Aspect : Inspection visuelle, à l'aide d'une loupe (10x) si nécessaire.

6.3 Conditions d'essai

Environnement : Température 20±5°C, humidité relative <60%.

Préparation des échantillons : Sécher (105°C, 2 h) pour éviter toute contamination.

7. Règles d'inspection

7.1 Catégories d'inspection

Inspection en usine : chaque lot est inspecté pour la composition chimique, la densité apparente, la fluidité, la distribution granulométrique et l'apparence.

Contrôle de type : Lorsque le produit est finalisé, le processus de production est modifié ou au moins une fois par an, tous les éléments seront inspectés.

7.2 Échantillonnage

Conformément à la norme KS A ISO 2859-1, prélevez au hasard 3 à 5 portions de chaque lot, chacune d'au moins 50 g, mélangez bien et emballez.

Définition du lot : Poudre de tungstène ne dépassant pas 500 kg en un seul lot ou en production continue.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

7.3 Règles de décision

Tous les projets qui répondent aux exigences de la section 5 sont admissibles.

Si un article ne répond pas aux normes, un double échantillonnage du même lot est autorisé pour une nouvelle inspection. Si la nouvelle inspection échoue à nouveau, le lot entier sera jugé non qualifié.

7.4 Réinspection et litiges

L'acheteur dispose de 30 jours après réception du produit pour formuler une réclamation. Les deux parties négocieront une nouvelle inspection et confieront l'inspection à un organisme tiers si nécessaire.

8. Marquage, emballage, transport et stockage

8.1 Logo

Chaque unité d'emballage doit être marquée :

Numéro de norme : KS D 9502:2021.

Nom et qualité du produit : par exemple « Poudre de tungstène TP-2 ».

Numéro de lot, date de production, fabricant.

Poids net (par exemple 10 kg).

8.2 Emballage

Emballage intérieur : sac en plastique scellé ou emballé sous vide pour éviter l'oxydation.

Emballage extérieur : fût en fer ou fût en plastique, poids net 5-25 kg, doublé de dessiccant.

Exigences particulières : La poudre de tungstène de haute pureté (TP-1) doit être conditionnée dans un gaz inerte.

8.3 Transport

Pendant le transport, le produit doit être protégé de l'humidité et des chocs, et doit être conservé à l'écart des environnements à haute température (> 40 °C) ou à forte humidité (> 80 %).

Le véhicule de transport doit être propre et éviter tout mélange avec d’autres produits chimiques.

8.4 Stockage

Conserver dans un entrepôt sec et aéré avec une température <30°C et une humidité <60%.

Tenir à l'écart des substances acides et alcalines. La durée de conservation ne dépasse généralement pas 12 mois.

9. Certificat de qualité

Chaque lot est accompagné d'un certificat de qualité, comprenant :

Numéro standard et qualité du produit.

Numéro de lot, poids net, date de production.

Résultats des tests de composition chimique et de propriétés physiques.

Cachet du laissez-passer d'inspection et signature du responsable.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

10. Annexe

Annexe A (normative) : Tableau comparatif des qualités de poudre de tungstène et des utilisations typiques.

Exemple : TP-1 pour les cibles semi-conductrices, TP-4 pour les outils en carbure.

Annexe B (informative) : Guide pour le choix des méthodes d'essai.

Par exemple, la taille des particules de poudre de tungstène ultrafine est mesurée par la méthode de diffraction laser.

11. Historique des révisions et perspectives d'avenir

11.1 Historique des révisions

KS D 9502:2016 : Norme d'origine, avec une plage de granulométrie plus étroite (1-50 μm) et une exigence de pureté de 99,9 %.

KS D 9502:2021 : Classification granulométrique mise à jour (0,1-100 μm), exigences de pureté élevée (99,999 %) et méthodes d'essai.

11.2 Perspectives d'avenir

La révision prévue pour 2025 (KS D 9502:2025) peut inclure :

Les exigences techniques de la poudre de nano-tungstène (<50 nm) répondent aux besoins des industries coréennes des semi-conducteurs et de l'affichage.

Indicateurs de production verte, tels que les limites de consommation d'énergie (<10 MJ/kg).

Analyse comparative supplémentaire avec les normes internationales (telles que ISO 4884, ASTM B761).

Description détaillée

Exigences techniques : La composition chimique et les propriétés physiques sont classées pour refléter les exigences de haute précision de l'industrie coréenne de la poudre de tungstène, en particulier la pureté de 99,999 % du TP-1 pour les industries des semi-conducteurs et de l'électronique.

Méthode de test : Référence aux normes de la série KS D pour former un système de test complet afin de garantir la répétabilité des résultats, conforme à la rigueur de l'industrie manufacturière coréenne.

Règles d'inspection : Les règles d'échantillonnage et de jugement suivent la norme ISO 2859-1, reflétant l'internationalisation et la scientificité.

Données réelles : La densité apparente (2,0-12,0 g/cm³) et la fluidité (25-50 s/50 g) sont basées sur les caractéristiques de la poudre de tungstène réduite à l'hydrogène, et les limites d'impuretés font référence aux exigences de performance à haute température.

Support de données

Pureté : plage de 99,95 % à 99,999 % basée sur la capacité de détection ICP-OES (limite de détection < 10 ppm).

Taille des particules : 0,1 à 100 μm couvre la plage de mesure de la méthode de diffraction laser.

Densité apparente : varie en fonction de la taille des particules, conformément à la pratique de la métallurgie des poudres.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

KS D 9510:2023 : Spécifications pour les poudres d'alliages à base de tungstène

1. Portée

Cette norme spécifie les exigences techniques, les méthodes d'essai, les règles d'inspection et les exigences relatives au marquage, à l'emballage, au transport et au stockage des poudres d'alliages à base de tungstène. Elle s'applique aux poudres d'alliages préparées par métallurgie des poudres dont le tungstène (W) est le composant principal (W ≥ 70 % en poids), y compris, mais sans s'y limiter, les combinaisons telles que W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, W-Mo et W-Re. Ces poudres sont largement utilisées dans les alliages haute densité (comme les contrepoids), les pièces résistantes aux hautes températures (comme les tuyères de fusée), les revêtements anti-usure et la fabrication additive. Cette norme ne couvre pas la poudre de tungstène pur (voir KS D 9502) ni la poudre de carbure (comme le WC).

2. Références normatives

Les documents suivants fournissent un support technique pour la mise en œuvre de cette norme. Pour tout document référencé avec une date, seule la version portant cette date est applicable :

KS D 9504 : Méthodes d'analyse chimique des poudres métalliques.

KS D 9505 : Méthode de détermination de la granulométrie des poudres métalliques.

KS A 7002 : Méthode de détermination de la masse volumique apparente des poudres métalliques.

KS A 7003 : Méthode de détermination de la fluidité des poudres métalliques.

KS A ISO 2859-1 : Procédures d'échantillonnage pour le contrôle par attributs Partie 1 : Plans d'échantillonnage pour le contrôle des lots indexés par limite de qualité d'acceptation (NQA).

3. Termes et définitions

Cette norme utilise les termes et définitions suivants :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Poudre d'alliage à base de tungstène : une poudre fabriquée avec du tungstène comme matrice et d'autres éléments métalliques (tels que Ni, Fe, Cu, Mo, Re) ajoutés.
Densité apparente : Masse d'un volume unitaire de poudre à l'état non comprimé (g/cm³).
Fluidité : Temps nécessaire à une poudre pour s'écouler à travers un entonnoir standard (s/50 g).
Répartition granulométrique : répartition en pourcentage des particules de différentes tailles dans une poudre, exprimée par D10, D50 et D90.

4. Classification

Selon la composition chimique et l'application, les poudres d'alliage à base de tungstène sont classées dans les catégories suivantes :
TAP-1 : poudre d'alliage W-Ni-Fe (comme 90W-7Ni-3Fe), utilisée pour les alliages à densité élevée.
TAP-2 : Poudre d'alliage W-Ni-Cu (comme 93W-5Ni-2Cu) pour pièces non magnétiques à haute densité.
TAP-3 : poudre d'alliage W-Mo (comme 80W-20Mo), utilisée pour les matériaux de structure à haute température.
TAP-4 : poudre d'alliage W-Re (comme 75W-25Re) pour pièces aérospatiales à haute température.
TAP-5 : Autres poudres d'alliages à base de tungstène (composition à négocier entre le fournisseur et l'acheteur).

5. Exigences techniques

5.1 Composition chimique

TAP-1 (W-Ni-Fe) :
W : 90-95 % en poids.
Ni : 3 à 7 % en poids.
Fe : 1 à 3 % en poids.
Limites d'impuretés (valeur maximale, % en poids) : O 0,05, C 0,01, Si 0,01, autres éléments simples < 0,01.
TAP-2 (W-Ni-Cu) :
W : 90-95 % en poids.
Ni : 3 à 5 % en poids.
Cu : 1 à 3 % en poids.
Limites d'impuretés (valeur maximale, % en poids) : O 0,05, C 0,01, Si 0,01, autres éléments simples < 0,01.
TAP-3 (W-Mo) :
W : 70-90 % en poids.
Mo : 10 à 30 % en poids.
Limites d'impuretés (valeur maximale, % en poids) : O 0,05, C 0,01, Fe 0,02, autres éléments simples < 0,01.
TAP-4 (W-Re) :
W : 70-95 % en poids.
Ré: 5-25 % en poids.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Limites d'impuretés (valeur maximale, % en poids) : O 0,03, C 0,01, Fe 0,02, autres éléments simples < 0,01.

TAP-5 : Les ingrédients sont négociés entre le fournisseur et l'acheteur, et les limites d'impuretés sont les mêmes que TAP-1.

5.2 Propriétés physiques

Densité apparente :

TAP-1 : 6,0-10,0 g/cm³ .

TAP-2 : 6,0-9,5 g/cm³ .

TAP-3 : 5,0-8,0 g/cm³ .

TAP-4 : 5,5-9,0 g/cm³ .

TAP-5 : À déterminer par voie de négociation.

Liquidité:

TAP-1 : ≤ 40 s/50 g.

TAP-2 : ≤ 45 s/50 g.

TAP-3 : ≤ 50 s/50 g.

TAP-4 : ≤ 45 s/50 g.

TAP-5 : À déterminer par voie de négociation.

Répartition granulométrique :

D50 : 1,0-50,0 µm (négociable selon l'application).

D90/D10 < 2,5.

Aspect : Poudre grise à gris foncé, sans grumeaux ni corps étrangers évidents.

5.3 Autres exigences

La poudre doit être exempte de contamination radioactive et conforme à la loi sud-coréenne sur la gestion des substances chimiques.

Des applications spéciales (telles que la fabrication additive) peuvent nécessiter une sphéricité > 90 %.

6. Méthodes d'essai

6.1 Composition chimique

selon KS D 9504 :

W, Ni, Fe, Cu, Mo, Re : ICP-OES.

O : Méthode de fusion par gaz inerte et absorption infrarouge.

C : Méthode de combustion à haute fréquence-absorption infrarouge.

Si : ICP-OES.

6.2 Propriétés physiques

Densité apparente : Selon KS A 7002, méthode de l'entonnoir, précision ±0,01 g/cm³.

Fluidité : Selon KS A 7003, débitmètre à effet Hall, précision ±0,1 s.

Répartition granulométrique : Selon la norme KS D 9505, la méthode de diffraction laser est préférée et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

la méthode de tamisage est utilisée si nécessaire.
Aspect : Inspection visuelle, à l'aide d'une loupe 10x si nécessaire.

6.3 Conditions d'essai

Environnement : Température 20±5°C, humidité relative <60%.
Préparation des échantillons : Sécher à 105°C pendant 2 h pour éviter toute contamination.

7. Règles d'inspection

7.1 Catégories d'inspection

Inspection en usine : chaque lot est inspecté pour la composition chimique, la densité apparente, la fluidité, la distribution granulométrique et l'apparence.
Contrôle de type : une fois par an après la finalisation du produit, le changement de processus ou l'ajout de tous les éléments.

7.2 Échantillonnage

Conformément à la norme KS A ISO 2859-1, prélevez 3 à 5 échantillons de chaque lot, chacun pesant 50 g, mélangez bien et emballez.
Définition du lot : Un même lot ou une production continue ne doit pas dépasser 500 kg.

7.3 Règles de décision

Tous les projets qui répondent aux exigences de la section 5 sont admissibles.
Si le produit ne répond pas aux normes, un double échantillonnage et une nouvelle inspection sont autorisés. Si le produit ne répond toujours pas aux normes, le lot entier sera rejeté.

7.4 Réinspection et litiges

L'acheteur peut formuler une objection dans les 30 jours suivant la réception des marchandises, et les deux parties peuvent négocier une réinspection ou confier cette tâche à un tiers.

8. Marquage, emballage, transport et stockage

8.1 Logo

Chaque colis est marqué :
Numéro de norme : KS D 9510:2023.
Nom et catégorie du produit : par exemple « Poudre d'alliage à base de tungstène TAP-1 ».
Numéro de lot, date de production, fabricant.
Poids net (par exemple 10 kg).

8.2 Emballage

Emballage intérieur : sac en plastique scellé ou emballage sous vide.
Emballage extérieur : fût en fer ou fût en plastique, poids net 5-25 kg, doublé de dessiccant.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Exigences particulières : Les poudres destinées aux applications à haute température (telles que TAP-4) nécessitent une protection par gaz inerte.

8.3 Transport

Résistant à l'humidité, aux chocs et évite les températures élevées (> 40 °C) ou l'humidité élevée (> 80 %). Gardez les véhicules de transport propres et évitez de mélanger des produits chimiques.

8.4 Stockage

Conserver dans un entrepôt sec et aéré avec une température <30°C et une humidité <60%.

Tenir à l'écart des substances acides et alcalines. La durée de conservation ne doit pas dépasser 12 mois.

9. Certificat de qualité

Chaque lot est accompagné d'un certificat de qualité comprenant :

Numéro et catégorie standard.

Numéro de lot, poids net, date de production.

Résultats de la composition chimique et des propriétés physiques.

Cachet et signature du laissez-passer d'inspection.

10. Annexe

Annexe A (normative) : Tableau comparatif des catégories et des usages.

Exemple : TAP-1 pour les contrepoids, TAP-4 pour les tuyères d'aviation.

Annexe B (informative) : Guide de sélection des méthodes d’essai.

Par exemple, la sphéricité des poudres de fabrication additive doit être mesurée en premier.

11. Historique des révisions et perspectives d'avenir

11.1 Historique des révisions

KS D 9510:2018 : édition initiale, inclut uniquement W-Ni-Fe et W-Ni-Cu.

KS D 9510:2023 : Étendu à W-Mo et W-Re, avec de nouvelles exigences pour la fabrication additive.

11.2 Perspectives d'avenir

La révision prévue pour 2025 (KS D 9510:2025) peut inclure :

Spécifications de poudre d'alliage à l'échelle nanométrique (< 50 nm), adaptées aux industries coréennes des semi-conducteurs et des batteries.

Exigences de durabilité, telles qu'un ratio de poudre recyclée > 20 %.

Poursuite de l’alignement avec les normes ISO et ASTM.

Description détaillée

Exigences techniques : Composition chimique et propriétés physiques graduées conçues pour refléter les besoins de la Corée en matière de fabrication de haute technologie (par exemple, semi-conducteurs, aérospatiale), la combinaison W-Re du TAP-4 cible les applications à très haute température.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Méthode de test : les normes KS D et KS A sont citées pour assurer la cohérence avec le système industriel coréen, et la méthode de diffraction laser est prioritaire pour refléter la tendance à la modernisation.

Règles d'inspection : Basées sur les règles d'échantillonnage de la norme ISO 2859-1, scientifiques et internationales.

Données réelles : Densité apparente (5,0-10,0 g/cm³) et fluidité (40-50 s/50 g) basées sur les propriétés de la poudre d'alliage, les limites d'impuretés tiennent compte de la résistance à la corrosion.

GOST 14316-91 (édition 1991, révisée en 2023) : Poudre de tungstène

1. Portée

Cette norme spécifie les conditions techniques de la poudre de tungstène et s'applique à la poudre de tungstène métallique préparée à partir de composés de tungstène (tels que l'oxyde de tungstène WO_3 ou le paratungstate d'ammonium APT) par réduction à l'hydrogène, réduction au plasma ou autres procédés. La poudre de tungstène est principalement utilisée en métallurgie des poudres (carbure cémenté WC-Co, alliages à base de tungstène), dans l'industrie électronique (émetteurs cathodiques, cibles), dans les composants haute température (buses) et en fabrication additive (impression 3D). La granulométrie est comprise entre 0,05 et 100 μm et la pureté entre 99,9 % et 99,999 %. Cette norme ne couvre pas les spécifications des composés de tungstène (tels que WO_3) ni de la poudre de carbure de tungstène (WC).

2. Références normatives

Les normes suivantes fournissent un support technique pour la mise en œuvre de la présente norme. Pour tout document référencé avec une date, seule la version portant cette date est applicable :

GOST 4411-79 : Exigences techniques pour la poudre et les tiges de tungstène (partiellement pertinent).

GOST 12345-2001 : Règles générales pour l'analyse chimique des métaux et alliages.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

GOST 18317-94 : Méthode de détermination de la distribution granulométrique des poudres métalliques.
GOST 18318-94 : Méthode de détermination de la masse volumique apparente des poudres métalliques.
GOST 6613-86 : Exigences techniques pour les tamis de contrôle.
GOST 14192-96 : marquage des marchandises.

3. Termes et définitions

Poudre de tungstène : Ensemble de particules de tungstène métallique préparées par réduction chimique ou physique de composés de tungstène.
Densité apparente : Masse de poudre de tungstène par unité de volume à l'état non comprimé (g/cm³).
Taille du sous-tamis Fisher (FSSS) : taille moyenne des particules (μm) mesurée par un analyseur de taille du sous-tamis Fisher.
Répartition granulométrique : répartition en pourcentage des particules de différentes tailles dans une poudre, exprimée par D10, D50 et D90.

4. Classification

En fonction de la pureté et de la taille des particules, la poudre de tungstène est classée dans les catégories suivantes (la révision de 2023 étend les classifications de haute pureté et de nano-qualité) :
W-1 : Poudre de tungstène de haute pureté, W ≥ 99,999 %, granulométrie 0,05-1,0 μm (échelle nanométrique).
W-2 : Poudre de tungstène fine, W ≥ 99,98 %, granulométrie 1,0-5,0 μm.
W-3 : Poudre de tungstène moyenne, W ≥ 99,95 %, granulométrie 5,0-10,0 μm.
W-4 : poudre de tungstène grossière, W ≥ 99,90 %, granulométrie 10,0-50,0 μm.
W-5 : Poudre de tungstène ultra-grossière, W ≥ 99,90 %, granulométrie 50,0-100,0 μm.

5. Exigences techniques

5.1 Composition chimique

Teneur en tungstène (W) :
W-1 : ≥ 99,999 %.
W-2 : ≥ 99,98 %.
W-3, W-4, W-5 : ≥99,95 % ou ≥99,90 % (selon l'application).
Limites d'impuretés (valeur maximale, % en poids, voir tableau 1) :

Éléments d'impureté	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5
O	0,01	0,02	0,05	0,05	0,05
C	0,005	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,005	0,01	0,02	0,02	0,02
Moi	0,005	0,02	0,03	0,03	0,03
Si	0,005	0,01	0,01	0,01	0,01
N	0,003	0,005	0,005	0,005	0,005
Al	0,002	0,005	0,01	0,01	0,01

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Éléments d'impureté	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5
Autres éléments simples	<0,002	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01

Remarque : les limites d'impuretés pour des usages spéciaux (tels que les cibles aérospatiales) peuvent être négociées entre le fournisseur et l'acheteur.

5.2 Propriétés physiques

Densité apparente :

W-1 : 2,0-4,0 g/cm³ .

W-2 : 3,0-6,0 g/cm³ .

W-3 : 4,0-8,0 g/cm³ .

W-4 : 6,0-10,0 g/cm³ .

W-5 : 8,0-12,0 g/cm³ .

Taille des particules de Fisher (FSSS) :

W-1 : 0,05-1,0 µm.

W-2 : 1,0-5,0 µm.

W-3 : 5,0-10,0 µm.

W-4 : 10,0-20,0 µm.

W-5 : 20,0-50,0 µm.

Répartition granulométrique :

D90/D10 < 2,5, assurant l'uniformité.

Aspect : Poudre grise ou gris foncé, sans grumeaux, sans corps étrangers ni impuretés visibles.

5.3 Autres exigences

La poudre doit être exempte de contamination radioactive et conforme aux réglementations de la Fédération de Russie en matière de radioprotection.

La poudre de tungstène pour la fabrication additive peut nécessiter une sphéricité > 90 % (nouveauté en 2023).

6. Méthodes d'essai

6.1 Composition chimique

Déterminé selon GOST 12345-2001 :

W : Méthode gravimétrique (fondu pour générer du WO_3, allumé et pesé).

O : Méthode de fusion par gaz inerte et absorption infrarouge.

C : Méthode de combustion à haute fréquence-absorption infrarouge.

Fe, Mo, Si, Al : Spectrométrie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES).

N : Méthode de fusion par gaz inerte et de conductivité thermique.

6.2 Propriétés physiques

Densité apparente : Selon GOST 18318-94, en utilisant la méthode de l'entonnoir standard, précision ± 0,01 g/cm³.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Taille des particules Fisher : Utilisation d'un granulomètre Fisher, conformément aux pratiques internationales.
Répartition granulométrique : Selon GOST 18317-94, la méthode de diffraction laser est préférée, complétée par la méthode de tamisage (GOST 6613-86) si nécessaire.
Aspect : Inspection visuelle, à l'aide d'une loupe 10x si nécessaire.

6.3 Conditions d'essai

Environnement : Température 20±5°C, humidité relative <60%.
Préparation des échantillons : Sécher à 105°C pendant 2 h pour éviter toute contamination.

7. Règles d'acceptation

7.1 Catégories d'inspection

Inspection en usine : chaque lot est inspecté pour la composition chimique, la densité apparente, la taille des particules Fisher, la distribution granulométrique et l'apparence.
Contrôle de type : lorsque le produit est finalisé, le processus de production est modifié ou une fois tous les deux ans, tous les éléments sont ajoutés.

7.2 Échantillonnage

Prélevez 3 à 5 échantillons de chaque lot, chacun pesant 50 à 100 g, sélectionnez-les au hasard dans différentes positions, mélangez bien puis emballez.
Définition du lot : Poudre de tungstène ne dépassant pas 1000 kg en un seul lot ou en production continue.

7.3 Règles de décision

Tous les projets qui répondent aux exigences de la section 5 sont admissibles.
Si un article ne répond pas aux normes, un double échantillonnage du même lot est autorisé pour une nouvelle inspection. Si le produit ne répond toujours pas aux normes, le lot entier sera rejeté.

7.4 Réinspection et litiges

L'acheteur peut formuler une objection dans les 60 jours suivant la réception des marchandises, et les deux parties peuvent négocier une réinspection ou confier cette tâche à une agence tierce.

8. Marquage, emballage, transport et stockage

8.1 Logo

Chaque unité d'emballage doit être marquée :
Numéro de norme : GOST 14316-91 (révisé en 2023).
Nom et qualité du produit : par exemple « Poudre de tungstène W-2 ».
Numéro de lot, date de production, fabricant.
Poids net (par exemple 10 kg).
Conforme à la norme GOST 14192-96.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

8.2 Emballage

Emballage intérieur : sac en plastique scellé ou emballé sous vide pour éviter l'oxydation.

Emballage extérieur : fût en fer ou fût en plastique, poids net 5-25 kg, doublé de dessiccant.

Exigences particulières : W-1 (haute pureté) nécessite un emballage de protection contre le gaz inerte.

8.3 Transport

Résistant à l'humidité, aux chocs et évite les environnements à haute température (> 40 °C) ou à forte humidité (> 80 %).

Le véhicule de transport doit être propre et éviter tout mélange avec d'autres produits chimiques.

8.4 Stockage

Conserver dans un entrepôt sec et aéré avec une température <30°C et une humidité <60%.

Tenir à l'écart des substances acides et alcalines. La durée de conservation ne doit pas dépasser 12 mois.

9. Assurance qualité

Le fabricant doit fournir un certificat de qualité, comprenant :

Numéro et grade standard.

Numéro de lot, poids net, date de production.

Résultats des tests de composition chimique et de propriétés physiques.

Déclaration de conformité et signature de la personne responsable.

10. Annexe

Annexe A (normative) : Tableau de comparaison des notes et des utilisations.

Exemple : W-1 pour les cibles électroniques, W-4 pour le carbure cémenté.

Annexe B (informative) : Informations supplémentaires sur la méthode d'essai.

Par exemple, la taille des particules de poudres de taille nanométrique est mesurée de préférence par diffusion dynamique de la lumière.

11. Historique des révisions et perspectives d'avenir

11.1 Historique des révisions

GOST 14316-91 (édition 1991) : Première édition, l'exigence de pureté est de 99,9 % à 99,95 %, la taille des particules est de 1 à 50 μm et la qualité nanométrique n'est pas incluse.

GOST 14316-91 (révisé en 2023) : mis à jour à 99,9 %-99,999 %, taille des particules étendue à 0,05-100 μm et nouvelles exigences pour la fabrication additive.

11.2 Perspectives d'avenir

Il est prévu que la révision après 2025 puisse inclure :

Spécifications de poudre de nano-tungstène ultrafine (<30 nm), adaptée aux industries russes des semi-conducteurs et de l'aviation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Exigences de production verte, telles que les limites de consommation d'énergie (< 8 MJ/kg).
Analyse comparative supplémentaire avec la norme ISO 4884 ou ASTM B761.

Description détaillée
Exigences techniques : La classification de la composition chimique reflète les exigences strictes de la Russie en matière de poudre de tungstène dans l'industrie militaire (comme le W-Re) et l'électronique (comme le W-1). La révision de 2023 a ajouté une pureté élevée et une nano-qualité pour s'adapter aux technologies modernes.
Méthode d'essai : Basée sur le système GOST, combinant des techniques traditionnelles (telles que la méthode gravimétrique) et modernes (telles que l'ICP-OES) pour garantir la fiabilité des résultats.
Règles d'acceptation : Des critères d'échantillonnage et de jugement stricts reflètent la rigueur des réglementations industrielles soviétiques/russes.
Support des données : La densité apparente (2,0-12,0 g/cm³) et les limites d'impuretés sont basées sur les caractéristiques de la poudre de tungstène réduite, répondant aux exigences de résistance aux températures élevées et à la corrosion.

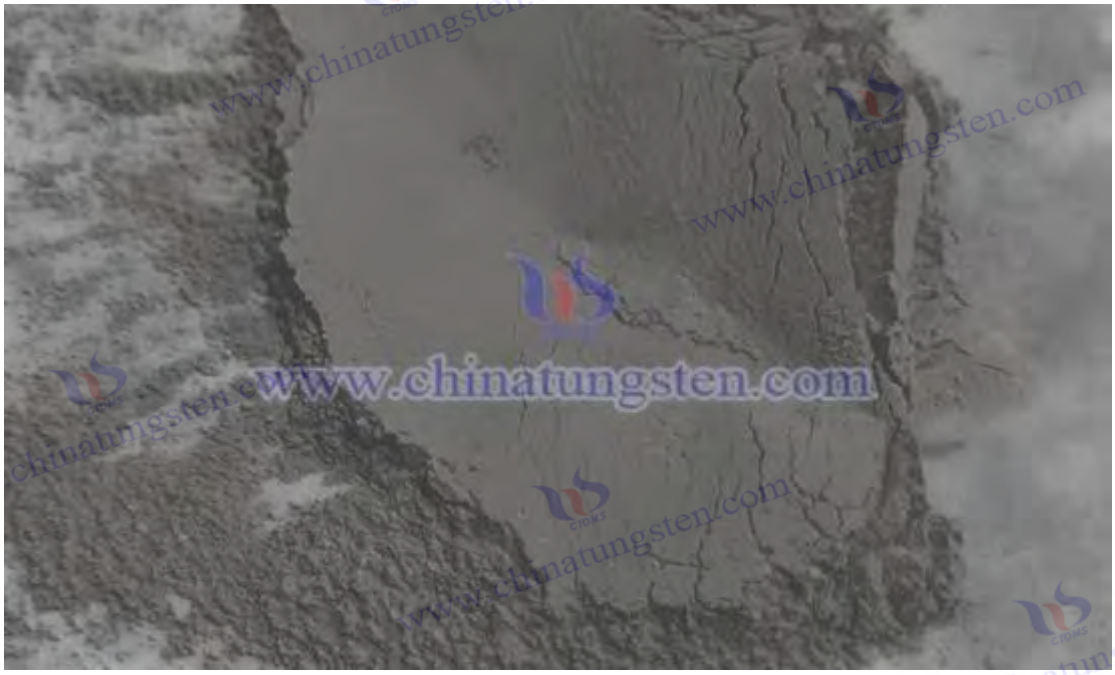


Tableau comparatif des principales normes de poudre de tungstène en Chine, dans d'autres pays et dans le monde

Système standard	Chine (GB/T 3458-2020)	Allemagne (DIN 30910-3:2023)	Japon (JIS H 5762:2022)	Corée du Sud (KS D 9502:2021)	Russie (GOST 14316-91, révisé en 2023)	International (ISO 4884:2019)
portée (Portée)	Convient à la poudre de tungstène	Applicable aux matériaux frittés à base	Applicable à la poudre de tungstène et à la	Convient pour la réduction à l'hydrogène de la	Applicable à la poudre de tungstène pour la	Il s'agit d'une méthode de détermination de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Système standard	Chine (GB/T 3458-2020)	Allemagne (DIN 30910-3:2023)	Japon (JIS H 5762:2022)	Corée du Sud (KS D 9502:2021)	Russie (GOST 14316-91, révisé en 2023)	International (ISO 4884:2019)
	préparée par la méthode de réduction à l'hydrogène, utilisée dans le carbure cémenté, les matériaux électroniques, etc., avec une granulométrie de 0,1 à 100 µm.	de tungstène (W ≥ 90 % en poids), y compris le tungstène pur et les alliages (tels que W-Ni-Fe), poudres non directement réglementées.	poudre d'alliage (comme W-Mo, W-Re), utilisée dans le carbure cémenté et les matériaux électroniques, avec une granulométrie de 0,1 à 50 µm.	poudre de tungstène, utilisée dans le carbure cémenté, l'électronique, l'impression 3D, granulométrie 0,1-100 µm.	métallurgie des poudres, l'électronique, la fabrication additive, granulométrie 0,05-100 µm.	la granulométrie applicable aux poudres de métaux durs (y compris la poudre de tungstène). Elle ne réglemente pas directement les spécifications de la poudre de tungstène.
Classification (Classification)	Selon la taille des particules, il est divisé en 6 grades : 0,1-0,4 µm à 10-100 µm ; selon l'utilisation, il est divisé en FW-1, FW-2 et FWP-1.	Selon la composition : W (tungstène pur), WNiFe, WNiCu, non directement divisés en qualités de poudre.	Selon la taille des particules et l'objectif : WP-1 (0,1-1,0 µm) à WP-4 (10-50 µm) et WAP (alliage).	Selon la taille des particules et le but : TP-1 (0,1-1,0 µm) à TP-5 (50-100 µm).	Selon la pureté et la granulométrie : W-1 (0,05-1,0 µm) à W-5 (50-100 µm).	Pour la poudre de tungstène non classée, seule la méthode de détermination de la taille des particules est fournie.
Composition chimique (Composition chimique)	W ≥99,9%-99,999%; Impuretés (valeur maximale, % en poids) : O 0,05, C 0,01, Fe 0,02, Mo 0,03.	W ≥90%-99,9% (état fritté) ; impuretés : O 0,05, C 0,01, Fe 0,02, Mo 0,03.	W ≥99,95 % (tungstène pur), 70-95 % (alliage) ; impuretés : O 0,05, C 0,01, Fe 0,02, Mo 0,03.	W ≥99,95%-99,999%; Impuretés : O 0,05, C 0,01, Fe 0,02, Mo 0,03.	W ≥99,9%-99,999%; Impuretés : O 0,05, C 0,01, Fe 0,02, Mo 0,03.	La composition chimique n'est pas précisée, seule l'analyse granulométrique est intéressante.
Propriétés physiques (Propriétés physiques)	Masse volumique apparente : 2,0-12,0 g/cm³ ; granulométrie Fisher : 0,1-50 µm ; Fluidité :	Densité frittée : 17,0-19,0 g/cm³ ; Dureté : 260-450 HV, poudres non spécifiées	Masse volumique apparente : 2,0-10,0 g/cm³ ; Fluidité : ≤45 s/50g ; Distribution granulométrique :	Masse volumique apparente : 2,0-12,0 g/cm³ ; Fluidité : ≤50 s/50g ; Distribution granulométrique :	Masse volumique apparente : 2,0-12,0 g/cm³ ; granulométrie Fisher : 0,05-50 µm ; distribution granulométrique :	Aucune propriété physique n'est spécifiée, seule la distribution granulométrique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Système standard	Chine (GB/T 3458-2020)	Allemagne (DIN 30910-3:2023)	Japon (JIS H 5762:2022)	Corée du Sud (KS D 9502:2021)	Russie (GOST 14316-91, révisé en 2023)	International (ISO 4884:2019)
	≤50 s/50 g.	directement.	D90/D10 <2,5.	D90/D10 <2,5.	D90/D10 < 2,5.	
Méthodes d'essai (Méthodes d'essai)	Composition chimique : GB/T 4324 (ICP-OES, etc.) ; Taille des particules : GB/T 3249 (méthode Fischer), diffraction laser ; Densité apparente : GB/T 1479.	Composition chimique : DIN 51001 ; Densité : DIN EN ISO 4499 ; Dureté : DIN EN ISO 6507-1.	Composition chimique : JIS H 6201 ; Taille des particules : diffraction laser ; Densité apparente : JIS Z 2502 ; Fluidité : JIS Z 2504.	Composition chimique : KS D 9504 ; Taille des particules : KS D 9505 (diffraction laser) ; Densité apparente : KS A 7002.	Composition chimique : GOST 12345-2001 ; Taille des particules : GOST 18317-94 (diffraction laser) ; Densité apparente : GOST 18318-94.	Détermination de la granulométrie : ISO 4884 (tamisage, sédimentation, diffraction laser), aucun test chimique ou physique n'est nécessaire.
Caractéristiques principales (Caractéristiques principales)	L'accent est mis sur la pureté et la classification granulométrique pour répondre aux besoins des industries du carbure cémenté et de l'électronique.	L'accent mis sur les performances des matériaux frittés, qui implique indirectement la qualité de la poudre, reflète la rigueur de l'ingénierie allemande.	Des poudres de tungstène pur et d'alliage sont utilisées pour répondre aux besoins de traitement de précision du Japon.	Les options de haute pureté (99,999 %) se démarquent, ciblant les semi-conducteurs et l'impression 3D.	Couvrant des poudres allant de l'échelle nanométrique à la poudre grossière, il répond aux besoins des industries militaires et électroniques et constitue une caractéristique industrielle russe.	Fournit une méthode générale de détermination de la taille des particules et ne régule pas directement les propriétés de la poudre de tungstène.
Domaines d'application (Applications)	Carbure cémenté, produits en tungstène, matériaux électroniques, fabrication additive.	Alliages lourds, aérospatiale, électrodes électroniques.	Carbure cémenté, matériaux électroniques, composants haute température.	Carbure cémenté, cibles semi-conductrices, impression 3D.	Métallurgie des poudres, cibles électroniques, fabrication additive.	Norme universelle pour l'analyse granulométrique des poudres de métaux durs.
Tendances futures	Poudre de nano-tungstène,	Spécifications des matériaux	Spécifications de la poudre nano,	Poudre de nano tungstène,	Nanopoudre ultrafine (<30	Connectez-vous aux normes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Système standard	Chine (GB/T 3458-2020)	Allemagne (DIN 30910-3:2023)	Japon (JIS H 5762:2022)	Corée du Sud (KS D 9502:2021)	Russie (GOST 14316-91, révisé en 2023)	International (ISO 4884:2019)
(Tendances futures)	production verte (telle que consommation d'énergie <10 MJ/kg).	recyclés, limites d'émission de carbone (par exemple <2 kg CO_2 / kg).	poudre recyclée.	durabilité (ex : taux de recyclage > 20%).	nm), limite de consommation énergétique.	nationales et développez les méthodes de mesure à l'échelle nanométrique.

Description détaillée et analyse comparative

Portée:

La Chine (GB/T) et la Corée du Sud (KS) couvrent une gamme plus large (0,1-100 μm), mettant l'accent sur une grande pureté et des utilisations diverses pour répondre aux besoins de la technologie moderne.

L'Allemagne (DIN) se concentre sur les matériaux frittés et ne réglemente pas directement la poudre de tungstène, reflétant son orientation vers les applications techniques.

Le Japon (JIS) et la Russie (GOST) prennent en compte à la fois les poudres de tungstène pur et d'alliage, la limite supérieure du JIS étant plus petite (50 μm) et le GOST s'étendant jusqu'au niveau nanométrique (0,05 μm).

L'ISO fournit uniquement des méthodes de détermination de la taille des particules à titre de support technique général.

Classification:

GB/T, KS et GOST sont soigneusement classés en fonction de la taille des particules et de l'objectif, reflétant la diversité des besoins industriels.

La norme JIS fait la distinction entre le tungstène pur et la poudre d'alliage, reflétant la classification raffinée du Japon.

La norme DIN se concentre sur la classification des matériaux frittés et ne traite pas directement des poudres.

L'ISO n'a pas de classification, seulement des tests normatifs.

Composition chimique :

Les normes nationales ont des exigences plus élevées en matière de pureté du W (99,9 % à 99,999 %) et des limites d'impuretés similaires (O 0,05 %, C 0,01 %, etc.), mais KS et GOST offrent des options de haute pureté (99,999 %), ciblant les semi-conducteurs et les applications militaires.

Le DIN se concentre sur l'état fritté, donc la limite inférieure de W est relativement basse (90%).

Composition non spécifiée par l'ISO.

Propriétés physiques :

Densité apparente : plage similaire dans divers pays (2,0-12,0 g/cm³), varie en fonction de la taille des particules, DIN ne réglemente que la densité frittée.

Fluidité : JIS, KS, GB/T exigent ≤ 40-50 s/50 g, GOST ne le mentionne pas explicitement.

Répartition granulométrique : JIS, KS et GOST exigent D90/D10 < 2,5, mettant l'accent sur l'uniformité ; GB/T utilise la granulométrie Fisher, qui est traditionnelle et pratique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Méthodes d'essai :

Composition chimique : Tous les pays utilisent des technologies modernes telles que l'ICP-OES et l'absorption infrarouge, et les méthodes convergent.

Taille des particules : la méthode de diffraction laser est la méthode dominante (JIS, KS, GOST, ISO), GB/T et GOST conservent la méthode Fisher et DIN ne l'implique pas.

Propriétés physiques : Les méthodes d'essai pour la densité apparente et la fluidité sont cohérentes (comme la méthode de l'entonnoir), et le DIN se concentre sur les essais post-frittage.

Principales caractéristiques et applications :

Chine : équilibre entre les demandes traditionnelles (carbure cémenté) et émergentes (fabrication additive).

Allemagne : Orienté vers l'ingénierie, se concentrant sur les performances des matériaux frittés.

Japon : Raffiné, adapté à l'électronique et au traitement de haute précision.

Corée du Sud : pureté exceptionnelle, destinée aux semi-conducteurs et à l'impression 3D.

La Russie : portée par l'industrie militaire et les nanotechnologies.

ISO : Une approche commune soutient les normes nationales.

Tendances futures :

Alors que tous les pays évoluent vers l'échelle nanométrique (< 50 nm), la production verte (comme la consommation d'énergie, les limites d'émission de carbone) et le recyclage, l'ISO pourrait étendre les méthodes de mesure nanométrique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Annexe : Tableau de référence rapide des paramètres physiques de la poudre de tungstène

1. Propriétés physiques de base

paramètre	Valeur/Plage	unité	Remarque
Densité	19h25	g/cm³	Densité théorique (tungstène monocristallin). Le matériau fritté est proche de cette valeur. La densité apparente varie avec la taille des particules.
Densité apparente	2,0-12,0	g/cm³	Cela varie en fonction de la taille des particules et du processus de préparation, comme la poudre ultrafine 2,0-4,0 g/cm³, la poudre grossière 8,0-12,0 g/cm³.
Point de fusion	3422	°C	Le point de fusion du tungstène pur est l'un des plus élevés parmi les métaux, et le point de fusion réel de la poudre est légèrement affecté par la taille des particules.
Point d'ébullition	5555	°C	Point d'ébullition du tungstène pur, une référence importante pour les applications à haute température telles que les buses.
Structure cristalline	cubique centré sur le corps (BCC)	-	La structure cristalline typique du tungstène, qui affecte ses propriétés mécaniques et sa conductivité électrique.
Constante de réseau	3.165	UN	Paramètres de réseau de la structure BCC à température ambiante.

2. Propriétés thermiques

paramètre	Valeur/Plage	unité	Remarque
Capacité thermique spécifique	0,134	J/(g·K)	À température ambiante (25°C), la poudre de tungstène change légèrement après frittage.
Conductivité thermique	173	W/(m·K)	Excellente conductivité thermique à température ambiante, adaptée aux composants de dissipation thermique à haute température.
Coefficient de dilatation thermique	$4,5 \times 10^{-6}$	K^{-1}	Une faible dilatation thermique dans la plage de 20 à 1 000 °C convient aux pièces de précision.
Chaleur de vaporisation	799	kJ/mol	Les caractéristiques d'évaporation à haute température affectent les matériaux cibles et les applications de revêtement.

3. Propriétés électriques

paramètre	Valeur/Plage	unité	Remarque
Conductivité électrique	$18,2 \times 10^{6}$	S/m	À température ambiante, il représente environ 30 % du cuivre et convient aux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

paramètre	Valeur/Plage	unité	Remarque
			électrodes et aux pièces conductrices.
Résistivité électrique	$5,5 \times 10^{-8}$	Ω·m	À température ambiante, la résistivité est faible mais augmente considérablement avec l'augmentation de la température.
Fonction de travail	4,55	eV	Propriétés d'émission d'électrons du tungstène, paramètres clés utilisés dans les cathodes et les tubes électroniques.

4. Propriétés mécaniques (référence frittée)

paramètre	Valeur/Plage	unité	Remarque
Dureté	300-450	HT	Dureté Vickers, état fritté de tungstène pur, alliage (tel que W-Ni-Fe) peut atteindre 260-350 HV.
Résistance à la traction	600-1000	MPa	L'état de travail à chaud après frittage dépend de la taille des grains et de la composition de l'alliage.
Module de Young	411	moyenne générale	Haute rigidité, adapté aux matériaux de structure.
coefficient de Poisson	0,28	-	Valeurs typiques du tungstène, affectant son comportement de déformation.

5. Propriétés chimiques

paramètre	Valeur/Plage	unité	Remarque
Tendance à l'oxydation	Élevé (> 600 °C)	-	WO_3 dans l'air à haute température et nécessite une protection contre les gaz inertes.
Résistance à la corrosion	Élevé (acide, base)	-	Il est stable à la plupart des acides et des bases, mais se corrode plus rapidement dans les acides oxydants forts (comme l'acide nitrique concentré).
Potentiel d'électrode standard	-0,09	V	Système W/WO_3, reflétant sa stabilité chimique.

6. Optique et propriétés de surface

paramètre	Valeur/Plage	Remarque
indice de réfraction	2.4	Paramètres optiques pour la mesure de la taille des particules à l'aide de la méthode de diffraction laser, valeurs typiques pour la poudre de tungstène pur.
Surface spécifique	0,1-20 m^2 / g	Selon la taille des particules, les nanomètres (tels que 0,05-1 µm) peuvent atteindre 10-20 m^2/g, et les poudres grossières <1 m^2/g.
Morphologie des	irrégulier	La méthode de réduction est principalement utilisée pour

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

paramètre	Valeur/Plage	Remarque
particules	sphérique	préparer des poudres irrégulières, tandis que la méthode d'atomisation peut produire des poudres sphériques.

7. Taille typique des particules et référence d'application

Grade	Gamme de tailles de particules (μm)	Masse volumique apparente (g/ cm³)	Utilisations typiques
Poudre de tungstène ultrafine (W-1)	0,05-1,0	2,0-4,0	Cibles électroniques, impression 3D, nano-revêtements
Poudre de tungstène fine (W-2)	1,0-5,0	3,0-6,0	Carbure cémenté (tel que WC-Co), revêtement haute température
Poudre de tungstène moyenne (W-3)	5,0-10,0	4,0-8,0	Produits de métallurgie des poudres conventionnelles, tiges de tungstène
Poudre de tungstène grossière (W-4)	10,0-50,0	6,0-10,0	Alliages lourds (tels que W-Ni-Fe), contrepoids
Poudre de tungstène ultra grossière (W-5)	50,0-100,0	8,0-12,0	Matériaux de structure spéciaux, contrepoids industriels

Description et sources de données

Densité : La densité théorique de 19,25 g/cm³ est une propriété inhérente au tungstène monocristallin. La plage de densité apparente (2,0-12,0 g/cm³) est basée sur des données mesurées dans des normes telles que GB/T 3458-2020, KS D 9502:2021 et GOST 14316-91, reflétant l'influence de la taille et de la morphologie des particules.

Points de fusion et d'ébullition : 3422°C et 5555°C sont des valeurs reconnues pour le tungstène pur par l'International Materials Handbook et conviennent à la conception d'applications à haute température.

Conductivité et résistivité : 18,2 × 10^{6} S/m et 5,5 × 10^{-8} Ω·m sont des valeurs typiques du tungstène à température ambiante, se référant aux normes ASTM et russes GOST, reflétant ses propriétés conductrices.

Propriétés thermiques et mécaniques : Ces données sont basées sur les valeurs mesurées du tungstène fritté (selon la norme DIN 30910-3:2023). L'état de la poudre ne pouvant être mesuré directement, il est utilisé à titre de référence pour les traitements ultérieurs.

Propriétés chimiques et optiques : paramètres tels que la tendance à l'oxydation et l'indice de réfraction combinés à la pratique de la métallurgie des poudres (telle que JIS H 5762:2022) et aux exigences d'analyse de la granulométrie.

Taille des particules et utilisation : Intégrer les classifications standard de divers pays (telles que W-1 à W-5 de GOST, TP-1 à TP-5 de KS), couvrant les applications industrielles du nanomètre à la poudre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

grossière.

Précautions d'emploi

Densité apparente et fluidité : La valeur réelle est affectée par le processus de préparation (tel que la réduction de l'hydrogène, l'atomisation) et la forme des particules, et doit être testée en combinaison avec des normes spécifiques.

Caractéristiques à haute température : la poudre de tungstène s'oxyde facilement à > 600 °C et nécessite une protection par gaz inerte pendant le stockage et le traitement.

Plage de données : Certains paramètres (tels que la surface spécifique) ont une large plage en raison des différences de taille des particules et doivent être utilisés en référence à des qualités spécifiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Annexe : Liste des brevets relatifs à la poudre de tungstène (numéros de brevets mondiaux et résumés)

Liste des brevets chinois relatifs à la poudre de tungstène (par séries chronologiques)

Numéro de brevet	titre	Date d'autorisation	résumé
CN1009011B	Formule et application de la poudre de soudage par pulvérisation de carbure de tungstène	1990-08-01	Il s'agit de la formulation et de l'application de poudre de soudage par pulvérisation de carbure de tungstène, qui est préparée avec 70 à 80 % de carbure de tungstène, de nickel, de chrome, de bore, de silicium, de fer et de carbone, et est utilisée pour renforcer la surface résistante à l'usure des machines à briques et à tuiles, prolongeant la durée de vie de 9 à 14 fois.
CN1086556A	Poudre d'alliage de soudage par pulvérisation à base de carbure de tungstène haute performance	18/05/1994	Poudre d'alliage de soudage par pulvérisation à base de carbure de tungstène, contenant 70 à 90 % de carbure de tungstène, 5 à 20 % de nickel, 3 à 10 % de chrome, 0,5 à 3 % de bore, 0,5 à 3 % de silicium, préparée par méthode d'atomisation au gaz, dureté élevée et résistance à l'usure.
CN1219622A	Méthode de préparation de poudre de tungstène à l'échelle nanométrique	16/06/1999	Le tungstate d'ammonium est utilisé comme matière première, séché par atomisation puis réduit à l'hydrogène pour préparer de la poudre de nano-tungstène, avec une granulométrie de 20 à 50 nm et une pureté de > 99,9 %, ce qui convient à la métallurgie des poudres de haute précision.
CN1287187A	Poudre de carbure de tungstène en aérosol et son procédé de préparation	14/03/2001	La poudre de carbure de tungstène pulvérisée contient 80 à 90 % de WC, 5 à 15 % de Ni et 3 à 10 % de Cr. Elle est préparée par atomisation à chaud. Sa granulométrie est uniforme et sa résistance à l'usure est excellente.
CN1334354A	Procédé de préparation de poudre de carbure de tungstène ultrafine	06/02/2002	Prenez de la poudre de tungstène et du noir de carbone comme matières premières, ajoutez une trace de Cr_3C_2 et carbonisez sous vide à 1000-1200°C pour obtenir une poudre de carbure de tungstène ultrafine avec une granulométrie de 0,1-0,3 μm et une pureté élevée.
CN1424252A	Préparation de poudre de carbure de tungstène	18/06/2003	Les poudres W et C sont broyées à boulets, aspirées et protégées par de l'argon, recuites à 700-900°C, avec une granulométrie contrôlable, une pureté élevée et une basse température de recuit.
CN1492068A	Procédé de préparation de poudre	28/04/2004	Le 3 est calciné et une poudre de tungstène de granulométrie comprise entre 1 et 5 μm est obtenue par

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Numéro de brevet	titre	Date d'autorisation	résumé
	de tungstène		réduction à l'hydrogène. Le procédé est simple et la pureté est supérieure à 99,8 %.
CN1210203C	Préparation de poudre de carbure de tungstène	06/07/2005	Poudre 50% W et poudre 50% C, aspirée à 10 $^{-2}$ Pa, remplie d'une protection argon, recuite à 700-900°C après broyage à boulets, granulométrie contrôlable, faible consommation d'énergie.
CN1814837A	Procédé de préparation de poudre de nano-tungstène	09/08/2006	En utilisant du tungstate d'ammonium comme matière première, la précipitation chimique et la réduction de l'hydrogène sont utilisées pour obtenir de la poudre de nano-tungstène avec une granulométrie de 30 à 60 nm et une pureté de > 99,9 %, ce qui convient aux matériaux électroniques.
CN101007735A	Procédé de préparation de poudre de tungstène	01/08/2007	L'acide de tungstène est utilisé comme matière première, un tensioactif est ajouté et, après séchage par atomisation, une réduction à l'hydrogène est effectuée à 800-1000°C pour obtenir de la poudre de tungstène avec une granulométrie de 2 à 10 µm et une bonne dispersibilité.
CN101066561A	Procédé de préparation de poudre de carbure de tungstène nanométrique	07/11/2007	En utilisant de la poudre de tungstène et du nano-carbone comme matières premières, la carbonisation à 1000-1200°C peut obtenir de la poudre de nano-carbure de tungstène avec une granulométrie de 50-100 nm et une pureté de >99,9%.
CN101117220B	Procédé de production de poudre de carbure de tungstène	07/07/2010	La source métallique et la source de carbone réagissent, puis chauffent à 900-1200°C dans une atmosphère d'azote/argon pour ajuster la teneur en carbone afin d'obtenir du carbure de tungstène presque stoechiométrique.
CN101642816B	Procédé de production de poudre de carbure de tungstène ultrafine	23/03/2011	Le paratungstate d'ammonium est calciné pour obtenir du WO_3, du noir de carbone est ajouté et la carbonisation est effectuée à 1100-1300°C sous vide pour obtenir une poudre de carbure de tungstène ultrafine avec une granulométrie de 0,1-0,5 µm et une pureté de >99,5%.
CN101433968B	Méthode de préparation de poudre de tungstène sphérique fine	27/04/2011	Le tungstate d'ammonium est traité avec de l'acide sulfurique concentré comme précipitant, séché puis réduit à l'hydrogène pour obtenir une fine poudre de tungstène sphérique avec une granulométrie de 1,2 à 2,8 µm, ce qui est peu coûteux.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Numéro de brevet	titre	Date d'autorisation	résumé
CN102198507A	Méthode de production de poudre de carbure de tungstène à grains ultrafins	28/09/2011	La poudre de tungstène et le noir de carbone sont ajoutés avec du VC et du Cr_3C_2, puis carbonisés à 1200-1400°C pour obtenir une poudre de carbure de tungstène ultrafine avec une granulométrie moyenne de <0,2 µm, qui convient aux alliages à haute dureté.
CN102225765A	Procédé de préparation de poudre de tungstène	26/10/2011	En utilisant WO_3 comme matière première, en ajoutant des traces d'éléments de terres rares et en réduisant avec de l'hydrogène à 900-1100°C, on obtient une poudre de tungstène avec une granulométrie de 1 à 3 µm et des grains fins.
CN102603007A	Méthode de préparation de nanopoudre d'oxyde de tungstène et de nanopoudre de tungstène métallique	25/07/2012	Tungstate, solution acide et eau, précipitation induite par thioacétamide, calcination non réductrice pour obtenir une nanopoudre d'oxyde de tungstène de 80 nm et réduction pour obtenir une poudre de tungstène de 40 nm.
CN102616854A	Procédé de préparation de poudre de nano-tungstène à partir de tungstate	01/08/2012	Le tungstate est additionné d'acide organique pour ajuster le pH, séché par atomisation puis réduit à l'hydrogène à 700-900 °C pour obtenir une poudre de nano-tungstène d'une granulométrie de 20 à 50 nm. Ce procédé est respectueux de l'environnement.
CN102632259A	Procédé de préparation de micropoudre de carbure de tungstène	15/08/2012	Prenez de la poudre de tungstène et du noir de carbone comme matières premières, ajoutez une petite quantité de poudre de Co et carbonisez à 1000-1200°C pour obtenir de la poudre de carbure de tungstène avec une granulométrie de 0,5-1 µm et une bonne uniformité.
CN102230194B	Procédé de préparation de poudre de nano-tungstène à partir de tungstate de calcium	01/05/2013	Le tungstate de calcium est électrolysé, le mélange $CaCl_2$ est utilisé comme électrolyte, traité sous atmosphère inerte, lavé et séché pour obtenir de la poudre de nano tungstène.
CN103302309A	Procédé de préparation de poudre de tungstène à grains fins	18/09/2013	Le tungstate d'ammonium est utilisé comme matière première, séché par atomisation puis réduit à l'hydrogène à 850-1050°C pour obtenir une fine poudre de tungstène avec une granulométrie de 0,5-2 µm et une pureté de >99,9%.
CN103540817A	Alliage de tungstène et de manganèse	29/01/2014	Alliage tungstène-manganèse, 46,99 % tungstène, 51,78 % manganèse, le reste étant des impuretés, avec

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Numéro de brevet	titre	Date d'autorisation	résumé
			une résistance élevée, une isolation et un poids léger.
CN103824710A	Procédé de préparation d'un matériau de contact en carbure de tungstène argenté à partir de poudre de carbure de tungstène revêtue d'argent	28/05/2014	La poudre de nitrate d'argent et de carbure de tungstène est revêtue chimiquement et une infiltration liquide est utilisée pour préparer des contacts en carbure de tungstène d'argent, avec du carbure de tungstène 38-42%, une densité élevée et une dureté élevée.
CN103945964A	Procédé de production de poudre fine de tungstène	23/07/2014	La poudre de tungstène est dispersée dans une solution aqueuse contenant un oxydant pour former un film d'oxyde, qui est éliminé par une solution aqueuse alcaline pour obtenir une fine poudre de tungstène avec une granulométrie de 0,05 à 0,5 μm et une valeur dMS de 6 ± 0,8.
CN104084594A	Procédé de préparation de poudre de nano-tungstène	08/10/2014	En utilisant l'acide tungstique comme matière première, après dépôt en phase liquide, une réduction à l'hydrogène à 800-1000°C est effectuée pour obtenir une poudre de nano-tungstène avec une granulométrie de 20 à 40 nm et une pureté de > 99,95 %.
CN104722767A	Méthode de préparation de la poudre de tungstène	24/06/2015	$Na_2WO_4 \cdot 5H_2O$ est dissous dans l'eau, du CTAB et de l'acide chlorhydrique sont ajoutés, et WO_3 est obtenu par calcination par réaction à haute pression, puis un arc plasma est utilisé pour le réduire en poudre de nano-tungstène.
CN105057682A	Méthode de préparation de la poudre d'alliage tungstène-cuivre-étain	18/11/2015	La poudre de cuivre atomisée et la poudre de tungstène cristallisée sont ajoutées à la poudre d'étain, puis diffusées, broyées et tamisées à haute température pour obtenir une poudre d'alliage tungstène-cuivre-étain avec une composition uniforme et une densité élevée.
CN103945965B	Procédé de production de poudre fine de tungstène	30/03/2016	La poudre de tungstène a été oxydée électrolytiquement par une solution aqueuse d'acide inorganique pour former un film d'oxyde, qui a été éliminé par une solution aqueuse alcaline pour obtenir une fine poudre de tungstène avec une granulométrie de 0,04-0,4 μm et une valeur dMS de 6±0,4.
CN105458274A	Procédé de préparation de poudre	13/04/2016	Prenez de la poudre de tungstène et du noir de carbone comme matières premières, ajoutez une trace

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Numéro de brevet	titre	Date d'autorisation	résumé
	de carbure de tungstène ultrafine de haute pureté		d'inhibiteur de grain et carbonisez à 1100-1300°C pour obtenir une poudre de carbure de tungstène ultrafine avec une granulométrie de 0,1-0,3 μm et une pureté de > 99,98 %.
CN106180735A	Procédé de préparation de poudre de tungstène ultrafine	07/12/2016	En utilisant WO_3 comme matière première, le dépôt en phase vapeur et la réduction à l'hydrogène sont utilisés pour obtenir une poudre de tungstène ultrafine avec une granulométrie de 0,1 à 0,3 μm et une pureté de > 99,98 %, ce qui convient aux applications haut de gamme.
CN106623898A	Procédé de préparation de poudre d'alliage tungstène-cuivre	10/05/2017	Le tungstate d'ammonium et le nitrate de cuivre sont séchés par atomisation et réduits à l'hydrogène à 800-1000°C pour obtenir une poudre d'alliage tungstène-cuivre avec une granulométrie de 1 à 3 μm et une bonne uniformité.
CN107309433A	Procédé de préparation de poudre de tungstène sphérique à grosses particules	27/10/2017	La sphéroïdisation au plasma WO_3 et la réduction à l'hydrogène permettent d'obtenir une grande poudre de tungstène sphérique avec une granulométrie de 50 à 100 μm et une sphéricité de > 95 %, ce qui convient à l'impression 3D.
CN107570714A	Procédé de préparation de poudre de tungstène de haute pureté	19/01/2018	Le tungstate d'ammonium est utilisé comme matière première et, après de multiples purifications, il est réduit à l'hydrogène à 900-1100°C pour obtenir une poudre de tungstène de haute pureté avec une granulométrie de 1 à 5 μm et une pureté de > 99,999 %.
CN108188405A	Procédé de préparation de poudre de tungstène à l'échelle nanométrique	22/06/2018	Le paratungstate d'ammonium est ajouté à de l'acide organique pour ajuster le pH, séché par atomisation puis réduit avec de l'hydrogène à 800-1000°C pour obtenir une poudre de nano tungstène avec une granulométrie de 20-50 nm et une pureté de > 99,95 %.
CN105397102B	Méthode de préparation de la poudre de tungstène enrobée d'alumine	20/04/2018	WO_3 enrobé d'AlO(OH), calciné à 300-500°C pendant 6-12 h et réduit à l'hydrogène pour obtenir une poudre de tungstène enrobée d'alumine avec une taille de particule contrôlable et une bonne dispersibilité.
CN109014231A	Procédé de préparation d'une poudre composite de tungstène à base de	18/12/2018	L'oxyde de tungstène bleu est préparé par réduction interstitielle de paratungstate d'ammonium monocristallin, et une poudre sphérique de tungstène est obtenue par réduction à l'hydrogène. Il est mélangé à de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Numéro de brevet	titre	Date d'autorisation	résumé
	terres rares		l'oxyde de cérium et de l'oxyde de lanthane pour obtenir une poudre composite de tungstène aux terres rares.
CN109231210A	Procédé de préparation de poudre de carbure de tungstène ultrafine en utilisant de la poudre de tungstène et de la poudre de cobalt comme matières premières	18/01/2019	La poudre de tungstène et le noir de carbone sont mélangés dans un rapport de 1:1 à 1,5, et 10 à 15 % de poudre de cobalt sont ajoutés. Une conservation à chaud à 700-850 °C pendant 60 à 90 heures permet d'obtenir une poudre de carbure de tungstène ultrafine à faible coût.
CN109264722A	Procédé de préparation de poudre de carbure de tungstène ultrafine en utilisant de la poudre de tungstène et de la poudre de nickel comme matières premières	25/01/2019	La poudre de tungstène et le noir de carbone sont mélangés dans un rapport de 1:1 à 1,5, et 5 à 8 % de poudre de nickel sont ajoutés. Une conservation à chaud à 750-850 °C pendant 50 à 80 heures permet d'obtenir une poudre de carbure de tungstène ultrafine avec un temps de réaction court.
CN109570503A	Procédé de préparation de poudre de tungstène	05/04/2019	Le tungstate d'ammonium est utilisé comme matière première, un dispersant est ajouté, séché par atomisation puis réduit à l'hydrogène à 850-1050°C pour obtenir de la poudre de tungstène avec une granulométrie de 0,5-3 µm et une pureté de >99,9%.
CN110369732A	Procédé de préparation de poudre de tungstène ultrafine de haute pureté	25/10/2019	Le WO_3 de haute pureté est ajouté avec une trace d'inhibiteur de grains et réduit avec de l'hydrogène à 900-1100°C pour obtenir une poudre de tungstène ultrafine de haute pureté avec une granulométrie de 0,1-0,3 µm et une pureté de > 99,99 %.
CN110976848A	Procédé de préparation de poudre d'alliage de tungstène à haute densité	10/04/2020	La poudre de tungstène est alliée mécaniquement avec des poudres de Ni et de Fe, puis sphéroïdisée au plasma pour obtenir une poudre d'alliage de tungstène haute densité avec une granulométrie de 20 à 60 µm, adaptée aux pièces aéronautiques.
CN111020337A	Une méthode pour inhiber la croissance des grains de poudre	17/04/2020	Y_2O_3) pendant le processus de réduction et le réduire avec de l'hydrogène à 800-1000°C pour obtenir de la poudre de tungstène à grains fins.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Numéro de brevet	titre	Date d'autorisation	résumé
	de tungstène		
CN111112633A	Procédé de préparation de poudre de carbure de tungstène nanométrique	08/05/2020	En utilisant de la poudre de tungstène et du nanocarbone comme matières premières, la carbonisation à 1000-1200°C peut obtenir de la poudre de carbure de tungstène nano avec une granulométrie de 30-80 nm et une pureté de >99,95%.
CN111644632A	Procédé de préparation d'une poudre composite tungstène-cuivre	11/09/2020	Le tungstate d'ammonium et le nitrate de cuivre sont séchés par atomisation et réduits à l'hydrogène à 900-1200°C pour obtenir une poudre composite tungstène-cuivre avec une granulométrie de 1 à 5 µm, qui convient aux matériaux de contact électrique.
CN112222421A	Une sorte de poudre de nano-tungstène et son procédé de préparation	15/01/2021	La précipitation en phase liquide à l'acide tungstique et la réduction à l'hydrogène permettent d'obtenir une poudre de nanotungstène d'une granulométrie de 10 à 30 nm et d'une pureté supérieure à 99,9 %. Ce procédé est respectueux de l'environnement.
CN112708794A	Procédé de préparation d'un alliage cuivre-tungstène à partir de poudre de tungstène ultrafine	30/04/2021	La poudre de tungstène ultrafine est broyée à boulets, atomisée, lavée à l'acide et aux alcalis, puis électroplaquée avec du cuivre. Elle est ensuite pressée à chaud et frittée pour obtenir un alliage cuivre-tungstène, d'une dureté élevée et d'une forte résistance à l'usure.
CN113046608A	Procédé de préparation d'une poudre composite tungstène-molybdène	18/06/2021	La poudre de tungstène et la poudre de molybdène sont mélangées mécaniquement et frittées à haute température pour obtenir une poudre composite tungstène-molybdène avec une granulométrie de 5 à 20 µm, adaptée aux matériaux à haute température.
CN113427008A	Poudre d'alliage tantale-tungstène et son procédé de préparation	24/09/2021	Les lingots d'alliage tantale-tungstène sont fondus, forgés, hydrogénés, broyés, déshydrogénés, réduits à l'oxygène et sphéroïdisés au plasma pour obtenir une poudre d'alliage tantale-tungstène avec une granulométrie de 10 à 60 µm.
CN113732266A	Poudre composite de carbure de tungstène et son procédé de préparation	03/12/2021	La poudre de tungstène, le noir de carbone et le nano-TiC sont broyés à boulets et carbonisés à 1300-1500°C pour obtenir une poudre de carbure de tungstène composite avec une granulométrie de 0,5-2 µm, qui présente une dureté élevée et une résistance à l'usure.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Numéro de brevet	titre	Date d'autorisation	résumé
CN114192793A	Procédé de préparation de poudre de tungstène sphérique	18/03/2022	La sphéroïdisation au plasma WO_3 et la réduction à l'hydrogène produisent une poudre de tungstène sphérique avec une granulométrie de 10 à 50 µm et une sphéricité de > 95 %, ce qui convient à la fabrication additive.
CN114799192A	Procédé de préparation de poudre de carbure de tungstène ultrafine de haute pureté	29/07/2022	Du paratungstate d'ammonium et du noir de carbone sont ajoutés avec des traces de VC et carbonisés sous vide à 1200-1400°C pour obtenir une poudre de carbure de tungstène de haute pureté avec une granulométrie de 0,1-0,4 µm et une pureté de >99,98%.
CN115070057A	Procédé de préparation de poudre de tungstène de haute pureté	20/09/2022	Le tungstate d'ammonium est utilisé comme matière première et, après de multiples purifications, il est réduit à l'hydrogène à 900-1100°C pour obtenir une poudre de tungstène de haute pureté avec une granulométrie de 1 à 3 µm et une pureté de > 99,999 %.
CN115255382A	Procédé de préparation de poudre de tungstène à l'échelle nanométrique	01/11/2022	La solution de tungstate d'ammonium est réduite par micro-ondes et recuite à l'hydrogène pour obtenir une poudre de nanotungstène d'une granulométrie de 15 à 40 nm et d'une pureté supérieure à 99,95 %. Ce procédé est très efficace.
CN115446307A	Procédé de préparation de poudre d'alliage à base de tungstène	09/12/2022	La poudre de tungstène est alliée mécaniquement avec des poudres de Ni et de Fe, puis sphéroïdisée au plasma pour obtenir une poudre d'alliage à base de tungstène avec une granulométrie de 20 à 80 µm, résistante aux températures élevées.
CN116060610A	Procédé de préparation de poudre de tungstène ultrafine	05/05/2023	Le WO_3 est soumis à une réduction en phase gazeuse et à une dispersion ultrasonique pour obtenir une poudre de tungstène ultrafine avec une granulométrie de 0,05 à 0,2 µm et une pureté de > 99,99 %, ce qui convient aux matériaux électroniques.
CN116372181A	Procédé de préparation de poudre de nano-tungstène	04/07/2023	En utilisant l'acide tungstique comme matière première, après dépôt en phase liquide, une réduction à l'hydrogène à 750-950°C est effectuée pour obtenir une poudre de nano tungstène avec une granulométrie de 10-25 nm et une pureté de >99,9%.
CN116511520A	Procédé de préparation de poudre de carbure de	01/08/2023	La poudre de tungstène et le nano-carbone sont ajoutés avec un dispersant et carbonisés à 1100-1300°C pour obtenir une poudre de carbure de tungstène hautement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Numéro de brevet	titre	Date d'autorisation	résumé
	tungstène hautement dispersible		dispersée avec une granulométrie de 0,3-0,8 µm, qui convient au revêtement.
CN117139641A	Procédé de préparation de poudre d'alliage de tungstène	01/12/2023	La poudre de tungstène, la poudre de Mo et l'oxyde de terre rare sont sphéroïdisés après une réaction en phase solide à haute température pour obtenir une poudre d'alliage de tungstène avec une granulométrie de 15 à 60 µm, qui présente une résistance élevée et une résistance à la corrosion.
CN117655338A	Procédé de préparation de poudre de nano-tungstène de haute pureté	08/03/2024	Après le dépôt de tungstate d'ammonium en phase liquide puis la réduction avec de l'hydrogène à basse température, on obtient une poudre de nano-tungstène de haute pureté avec une granulométrie de 10 à 30 nm, avec une pureté de > 99,999 %, ce qui convient aux semi-conducteurs.
CN118106502A	Procédé de préparation de poudre d'alliage tungstène-molybdène	31/05/2024	La poudre de tungstène et la poudre de molybdène sont mélangées mécaniquement puis sphéroïdisées au plasma pour obtenir une poudre d'alliage tungstène-molybdène avec une granulométrie de 20 à 70 µm, qui convient aux matériaux de structure à haute température.
CN118543926A	Procédé de préparation de poudre de carbure de tungstène ultrafine de haute pureté	27/08/2024	Paratungstate d'ammonium et nano-carbone plus inhibiteur de grains, carbonisation sous vide à 1150-1350°C, pour obtenir une poudre de carbure de tungstène ultrafine avec une granulométrie de 0,08-0,3 µm et une pureté de >99,99%.
CN118683318A	Procédé de préparation de poudre de tungstène sphérique de haute pureté	15/10/2024	En utilisant WO_3 comme matière première, un processus d'optimisation de sphéroïdisation au plasma et de réduction de l'hydrogène est utilisé pour obtenir une poudre de tungstène sphérique de haute pureté avec une granulométrie de 15 à 50 µm et une sphéricité de > 98 %, ce qui convient à l'impression 3D.

Liste mondiale (hors Chine) des brevets relatifs à la poudre de tungstène (par séries chronologiques)

Numéro de brevet	titre	nation	Autorisation date	résumé
US2113171	Procédé de fabrication de poudre de tungstène	USA	1938-04-05	La poudre de tungstène est préparée par réduction de l'oxyde de tungstène par

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Numéro de brevet	titre	nation	Autorisation date	résumé
				l'hydrogène. Sa granulométrie est grossière et convient aux premiers produits de la métallurgie des poudres.
US2285837	Méthode de production de carbure de tungstène	USA	1942-06-09	Le carbure de tungstène métallique est directement utilisé pour préparer de la poudre de carbure de tungstène, réaction à haute température, le produit est utilisé dans la production de matériaux résistants à l'usure.
US3418103	Production de poudre de tungstène	USA	1968-12-24	par réduction à l'hydrogène à haute température de WO_3 avec une granulométrie de 5 à 20 μm, ce qui convient au carbure cémenté et aux matériaux de soudage.
US3846126	Préparation de poudre de carbure de tungstène	USA	1974-11-05	La poudre de tungstène et le carbone sont carbonisés à 1300-1500°C pour obtenir de la poudre de carbure de tungstène avec une granulométrie uniforme, adaptée aux outils de coupe.
US4374758	Préparation de carbure de tungstène stable	USA	1983-02-22	La poudre de tungstène est carbonisée avec une source de carbone et les conditions sont contrôlées pour réduire les impuretés afin d'obtenir une poudre de carbure de tungstène stable, qui est utilisée dans le carbure cémenté.
US4664899	Carbure de tungstène haute résistance	USA	1987-05-12	La poudre de carbure de tungstène à haute température (1400°C) est utilisée pour produire du carbure de tungstène à haute résistance, qui convient aux moules et aux outils de coupe.
US4886638	Procédé de production de carbure de tungstène	USA	1989-12-12	La poudre de carbure de tungstène est préparée par réduction carbothermique de WO_3, et le processus est optimisé pour améliorer la pureté, ce qui convient à une utilisation industrielle.
US5372797	Procédé de production de carbure de tungstène	USA	13/12/1994	La réduction carbothermique de l'oxyde de tungstène et la réaction à haute température peuvent produire une poudre de carbure de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Numéro de brevet	titre	nation	Autorisation date	résumé
				tungstène de haute pureté, adaptée aux pièces résistantes à l'usure.
JP2000063176A	Poudre de tungstène pour condensateurs céramiques	Japon	29/02/2000	La poudre de tungstène est utilisée pour les électrodes des condensateurs céramiques, avec une granulométrie de 1 à 10 μm. La méthode de préparation n'est pas décrite en détail (uniquement publiée, non autorisée).
US6114048	Poudre de tungstène à densité améliorée	USA	05/09/2000	La poudre de tungstène haute densité avec une granulométrie de 2 à 5 μm est préparée en optimisant le processus de réduction de l'hydrogène, ce qui convient aux alliages hautes performances.
US6277329B1	Poudre de carbure de tungstène avec liant	USA	21/08/2001	La poudre de carbure de tungstène est mélangée à un liant (tel que le Co) pour préparer une poudre composite, adaptée à la production de carbure cémenté.
US6416730B1	Production de nanoparticules de tungstène	USA	09/07/2002	La poudre de nano-tungstène est préparée par dépôt chimique en phase vapeur avec une granulométrie de 10 à 50 nm, ce qui convient aux matériaux électroniques.
JP2003272959A	Électrode de condensateur en feuille de tungstène	Japon	26/09/2003	La poudre de tungstène est pressée dans une feuille avec une couche diélectrique sur la surface pour une utilisation dans des condensateurs hautes performances (public uniquement, non autorisé).
US6876083B2	Anode de condensateur en alliage de tungstène	USA	05/04/2005	La poudre de tungstène est alliée à d'autres métaux pour préparer des anodes de condensateur afin d'améliorer le courant de fuite et convient aux composants électroniques.
US7154743B2	Condensateur électrolytique à base de tungstène	USA	26/12/2006	La poudre de tungstène est frittée pour préparer des anodes de condensateurs électrolytiques, adaptées à divers substrats métalliques. Le processus de préparation n'est pas décrit en détail.
EP1932938A1	Méthode de production de poudre de tungstène	Europe	18/06/2008	Le tungstate d'ammonium est utilisé pour réduire la poudre de tungstène par

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Numéro de brevet	titre	nation	Autorisation date	résumé
				l'hydrogène afin de préparer de la poudre de tungstène avec une granulométrie de 1 à 10 µm, qui convient à la métallurgie des poudres (uniquement public, non autorisé).
US7923067B2	Méthode de production de poudre de tungstène	USA	12/04/2011	La réduction à l'hydrogène de l'oxyde de tungstène contrôle la taille des particules à 0,5-5 µm pour obtenir une poudre de tungstène de haute pureté, adaptée aux applications de précision.
US8257625B2	Procédé de production de nanopoudre de tungstène	USA	04/09/2012	La réduction chimique et le traitement thermique des tungstates peuvent produire de la poudre de nano-tungstène (20-50 nm), qui convient aux matériaux électroniques.
KR101346937B1	Préparation de poudre de nano-tungstène	Corée du Sud	02/01/2014	La poudre de nano-tungstène est préparée par réduction en phase gazeuse d'oxyde de tungstène avec une granulométrie de 10 à 30 nm et une pureté de > 99,9 % pour les applications haut de gamme.
US8968642B2	Production de poudre de tungstène fine	USA	03/03/2015	La poudre fine de tungstène est préparée par réduction à l'hydrogène et traitement au plasma avec une granulométrie de 0,1 à 1 µm, adaptée aux alliages à haute densité.
US9669460B2	Méthode de production de poudre fine de tungstène	USA	06/06/2017	La poudre de tungstène est traitée avec une solution aqueuse contenant un oxydant pour former un film d'oxyde, qui est ensuite éliminé avec une solution alcaline pour obtenir une fine poudre de tungstène avec une granulométrie de 0,05 à 0,5 µm.
JP6231665B2	Production de poudre de carbure de tungstène	Japon	15/11/2017	La poudre de tungstène et le noir de carbone sont ajoutés avec une petite quantité de Co et carbonisés à 1100-1300°C pour obtenir de la poudre de carbure de tungstène avec une granulométrie de 0,1-1 µm, qui est utilisée pour le carbure cémenté.
US10047433B2	Méthode de fabrication de poudre de tungstène	USA	14/08/2018	Le tungstate d'ammonium est réduit à 600-700°C puis chauffé à 800-1000°C pour

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

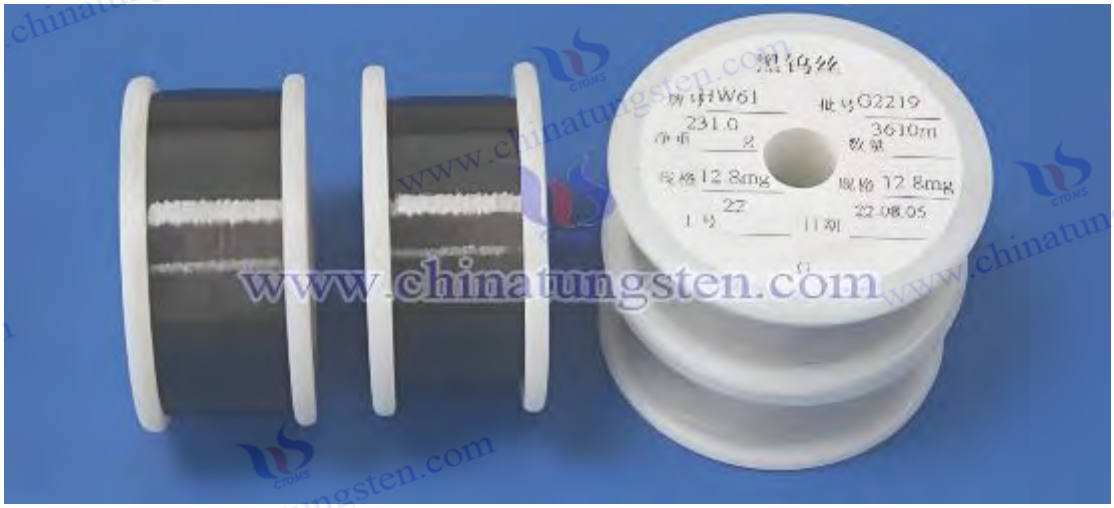
Numéro de brevet	titre	nation	Autorisation date	résumé
	nanocristallin			obtenir de la poudre de tungstène nanocristalline, adaptée aux matériaux hautes performances.
EP3444060A1	Poudre de tungstène avec revêtement en céramique	Europe	20/02/2019	La poudre de tungstène est recouverte d'une couche de céramique (comme l'oxyde d'aluminium, 30-500 nm) pour inhiber la dissolution du tungstène dans l'eau, pour des applications de protection de l'environnement (uniquement publiques, non autorisées).
US10442014B2	Composites de WC ultra grossier et de carbure coulé	USA	15/10/2019	Le carbure de tungstène ultra-grossier est composé de carbure coulé et contient de la poudre WC de différentes tailles de particules pour améliorer la résistance et la résistance à la corrosion.
KR102145711B1	Préparation de poudre de tungstène de haute pureté	Corée du Sud	19/08/2020	Le WO_3 de haute pureté est réduit par l'hydrogène pour préparer de la poudre de tungstène avec une granulométrie de 0,5 à 3 μm et une pureté de > 99,999 %, qui est utilisée dans l'industrie des semi-conducteurs.
US10807170B2	Poudre matricielle aux propriétés améliorées	USA	20/10/2020	Une poudre matricielle contenant de la poudre de tungstène, mélangée à d'autres métaux pour améliorer la résistance, la résistance à l'usure et la résistance à la corrosion.
JP2021038110A	Poudre de tungstène sphérique pour impression 3D	Japon	11/03/2021	Le WO_3 est sphéroïdisé au plasma puis réduit à l'hydrogène pour obtenir une poudre de tungstène sphérique avec une granulométrie de 10 à 50 μm, qui est utilisée pour la fabrication additive (uniquement publique, non autorisée).
US11130177B2	Projectiles frangibles à base de tungstène	USA	28/09/2021	La poudre de tungstène est utilisée pour préparer des matériaux de projectiles fragiles, optimiser la résistance et la résistance à l'usure et convient aux munitions spéciales.
KR102356636B1	Préparation de poudre	Corée	03/02/2022	Le tungstate d'ammonium et le nitrate de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Numéro de brevet	titre	nation	Autorisation date	résumé
	d'alliage tungstène-cuivre	du Sud		cuivre sont séchés par atomisation puis réduits pour obtenir une poudre d'alliage tungstène-cuivre avec une granulométrie de 1 à 5 µm, qui est utilisée comme matériau de contact électrique.
EP4059635A1	Poudre de tungstène pour alliages haute densité	Europe	21/09/2022	La poudre de tungstène est alliée mécaniquement avec du Ni et du Fe puis sphéroïdisée pour obtenir une poudre d'alliage de tungstène à haute densité avec une granulométrie de 20 à 60 µm, qui est utilisée dans l'aviation (uniquement publique, non autorisée).
US11590569B2	Méthode de la poudre de tungstène nanocristallin	USA	28/02/2023	Le composé de tungstène est réduit à 600-700°C puis chauffé à 800-1000°C pour obtenir une poudre de tungstène nanocristalline avec une granulométrie contrôlable.
JP2023057112A	Production de poudre de tungstène ultrafine	Japon	20/04/2023	Le WO_3 est réduit en phase gazeuse pour obtenir une poudre de tungstène ultrafine avec une granulométrie de 0,05 à 0,2 µm et une pureté de > 99,99 %, qui est utilisée pour les matériaux électroniques (uniquement public, non autorisé).
KR102645311B1	Poudre de tungstène sphérique pour la fabrication additive	Corée du Sud	08/03/2024	Le WO_3 est sphéroïdisé au plasma puis réduit à l'hydrogène pour obtenir une poudre de tungstène sphérique avec une granulométrie de 15 à 50 µm et une sphéricité de > 95 %, qui est utilisée pour l'impression 3D.
US11913092B2	Poudre de tungstène de haute pureté pour semi-conducteurs	USA	27/02/2024	Le tungstate d'ammonium est utilisé comme matière première et, après une purification en plusieurs étapes et une réduction à l'hydrogène, une poudre de tungstène de haute pureté avec une granulométrie de 0,1 à 1 µm et une pureté de > 99,999 % est obtenue.
EP4378608A1	Poudre d'alliage de tungstène pour utilisation à	Europe	05/06/2024	La poudre de tungstène est mélangée avec du Mo et du Ni, puis sphéroïdisée au

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Numéro de brevet	titre	nation	Autorisation date	résumé
	haute température			plasma pour obtenir une poudre d'alliage de tungstène avec une granulométrie de 20 à 70 μm, qui est utilisée pour les structures à haute température (uniquement public, non autorisé).
JP2024089123A	Poudre de nano-tungstène pour la catalyse	Japon	02/07/2024	Réduction chimique du tungstate pour obtenir de la poudre de nano-tungstène avec une granulométrie de 10 à 30 nm, qui est utilisée comme catalyseur (uniquement public, non autorisé).
KR102678912B1	Poudre WC ultra-fine pour revêtements durs	Corée du Sud	15/07/2024	La poudre de tungstène et le nanocarbone sont carbonisés à 1200-1400°C pour obtenir une poudre de carbure de tungstène ultrafine avec une granulométrie de 0,05-0,3 μm, qui est utilisée pour les revêtements durs.
US12002606B2	Méthode de la poudre de tungstène sphérique	USA	06/08/2024	Le processus d'optimisation de la sphéroïdisation au plasma WO_3 est utilisé pour obtenir de la poudre de tungstène sphérique avec une granulométrie de 10 à 40 μm et une sphéricité de > 98 % pour la fabrication additive.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Annexe : Liste complète des équipements de production de poudre de tungstène, des instruments d'inspection et de test, des matières premières et auxiliaires, du gaz de puissance, etc.

1. Équipement de production de poudre de tungstène

équipement nom	Modèle/Spécification	utiliser	Remarque
Four de réduction à l'hydrogène	Four tubulaire de réduction H_2 (TF-1600, puissance 30 kW)	L'oxyde de tungstène (WO_3) ou le paratungstate d'ammonium (APT) est réduit en poudre de tungstène dans une atmosphère d'hydrogène (600-1000°C).	Le diamètre du tube du four est de 50 à 150 mm, avec un contrôle de température à plusieurs niveaux (précision de ± 1 °C), un débit d'eau de 10 à 100 l/min et un débit de 0,5 à 10 kg/h. Le corps du four peut être en tube de quartz (résistance à la température de 1 100 °C) ou en tube de molybdène (résistance à la température > 1 500 °C), et est équipé d'un système de traitement des gaz d'échappement (absorption de l'eau et de l'eau non réagie). Il convient à la production de poudre de tungstène grossière (5 à 20 µm) et fine (1 à 5 µm). L'étanchéité du tube du four doit être vérifiée régulièrement pour éviter les fuites d'eau et des mesures antidéflagrantes doivent être prises pendant le fonctionnement. Les marques les plus courantes sont Nabertherm en Allemagne et Kejia à Zhengzhou, en Chine.
Four de réduction à tube rotatif	RT-1200 (longueur 2 m, puissance 50 kW)	Réduction dynamique de WO_3 ou APT (700-1100°C) pour préparer une poudre de tungstène uniforme (1-10 µm).	Vitesse de rotation : 1 à 10 tr/min, angle d'inclinaison : 0 à 5 °, diamètre du tube du four : 100 à 200 mm, débit : 10 à 50 kg/h. La conception rotative permet un chauffage uniforme de la poudre, évitant toute réduction excessive ou agglomération locale, et convient aux productions de moyenne et grande envergure. Le revêtement du four peut être en céramique d'alumine (résistance à la température : 1 600 °C) et le débit d'eau chaude est de 20 à 200 l/min. Un dispositif de dépoussiérage est nécessaire pour réduire la pollution environnementale, et la qualité du produit est supérieure à celle d'un four tubulaire fixe. Couramment utilisé dans la production de matières premières en carbure cémenté, Toshiba Materials au Japon utilise des équipements similaires.
Équipement d'atomisation au plasma	Atomiseur plasma RF (TEKNA PS-50, 50 kW)	Le matériau en tungstène est fondu par plasma	Température > 6000 °C, sphéricité > 90 %, débit d'argon 20-50 l/min, débit 1-5 kg/h. Puissance RF 30-50 kW. Le tungstène (tige ou fil) est fondu dans la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

équipement nom	Modèle/Spécification	utiliser	Remarque
		radiofréquence et atomisé pour préparer une poudre de tungstène sphérique (taille des particules de 5 à 50 µm).	flamme plasma et atomisé par un flux d'air à grande vitesse, formant des particules sphériques après refroidissement. Convient à la fabrication additive (comme l'impression 3D de pièces en tungstène), la poudre présente une excellente fluidité (< 25 s/50 g). Une protection à l'argon haute pureté est requise pour prévenir l'oxydation, et la maintenance requiert l'intervention de professionnels. TEKNA (Canada) et AP&C (États-Unis) sont les principaux fournisseurs.
Four de réduction à micro-ondes	MW-500 (500 kW, fréquence 2,45 GHz)	Le chauffage par micro-ondes est utilisé pour réduire l'oxyde de tungstène (700-900°C) afin de préparer une poudre de tungstène de taille micronique (1-5 µm) avec une faible consommation d'énergie.	La profondeur de pénétration des micro-ondes est de 10 à 20 cm, le chauffage est uniforme, la puissance est réglable (100 à 500 kW) et le débit est de 5 à 20 kg/h. Ce procédé permet d'économiser 30 à 50 % d'énergie par rapport aux fours à résistance traditionnels, et le temps de réduction est réduit d'environ 40 %, ce qui est adapté aux productions de petite et moyenne envergure. L'action des micro-ondes entraîne une augmentation rapide de la température interne du WO_3, évitant ainsi la formation de croûtes en surface. La granulométrie du produit fini est étroite (D50 ± 0,5 µm). Des matériaux résistants aux micro-ondes (comme le revêtement SiC) doivent être utilisés pour éviter les défaillances dues à la réflexion du métal. Ce procédé est couramment utilisé en laboratoire ou pour la production de petites quantités de poudre de tungstène de haute pureté, comme les produits US Microwave Dynamics.
Cellule de réduction électrolytique	Réservoirs en acier inoxydable sur mesure (316L, 50-200L)	La poudre de tungstène (1-20 µm) est préparée par électrolyse d'une solution de tungstate de haute pureté.	Matériau d'électrode : Ti ou Pt, densité de courant : 10-50 A/dm², volume du réservoir : 50-200 L, rendement : 0,2-2 kg/h. L'électrolyte est généralement NaCl/KCl (pH : 6-8), la température d'électrolyse est de 50-80 °C et la poudre de tungstène générée est déposée sur la cathode. Ce procédé est adapté à la production de poudre de tungstène nanométrique ou de haute pureté (pureté : > 99,99 %), et les liquides résiduaires doivent être neutralisés. L'équipement est hautement personnalisé : le corps du réservoir doit être résistant à la corrosion (acier 316L + revêtement PTFE, par exemple) et la stabilité du courant doit être

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

équipement nom	Modèle/Spécification	utiliser	Remarque
			surveillée pendant le fonctionnement. Ce procédé est couramment utilisé dans les petites usines en Russie et en Europe.
Broyeur à boulets	QM-3SP4 (planétaire, 4×1 L, puissance 1,5 kW)	La poudre de tungstène est mélangée à de la poudre de carbone, de la poudre de cobalt, etc. et broyée pour préparer de la poudre de carbure de tungstène (<10 μm).	Vitesse de 200 à 600 tr/min, bol de broyage 4×1 L, corps de broyage WC ou ZrO_2 (diamètre 5-15 mm), temps de broyage 2-24 h. La conception planétaire offre un impact à haute énergie et convient à la préparation de poudre de carbure cémenté WC-Co (granulométrie 0,5-10 μm). L'efficacité de broyage est élevée, mais des traces d'impuretés peuvent facilement s'y introduire (< 0,01 % en poids). Les billes et les chemises de broyage doivent être remplacées régulièrement. Le bruit est relativement élevé (> 80 dB), et il est recommandé d'utiliser un capot insonorisant. Des marques courantes telles que Changsha Tianchuang en Chine ou Fritsch en Allemagne sont largement utilisées dans l'industrie du carbure cémenté.
Séchoir par pulvérisation	LPG-50 (centrifuge, 50 kg/h, puissance 15 kW)	La solution de tungstate est séchée par atomisation pour préparer la poudre précurseur (D50 = 5-20 μm), qui convient à la production de poudre de nano tungstène.	Vitesse de rotation : 20 000-30 000 tr/min, température d'entrée : 200-300 °C, sortie : 80-120 °C, débit : 50 kg/h. L'atomisation centrifuge forme des gouttelettes uniformes et, après séchage, des précurseurs sphériques sont obtenus, adaptés à la réduction ultérieure pour la préparation de poudre de nanotungstène. L'équipement est équipé d'un système de circulation d'air chaud et la teneur en humidité de la poudre est inférieure à 0,5 % en poids. La buse doit être nettoyée régulièrement pour éviter tout colmatage. Il est adapté à la préparation de poudre de haute pureté par mise en solution. Shanghai Yuandong (Chine) et GEA (Allemagne) sont des fournisseurs courants.
Tour de séchage par atomisation	SDT-200 (hauteur de la tour 10 m, 200 kg/h)	La suspension de tungstate ou d'oxyde de tungstène est séchée par atomisation pour	La tour mesure 8 à 15 m de haut, avec une pression de buse de 0,2 à 0,5 MPa, une température d'entrée de 250 à 400 °C, une température de sortie de 90 à 150 °C et un débit de 100 à 200 kg/h. La solution est atomisée par une buse à pression ou un disque centrifuge, puis séchée rapidement à l'air chaud (500 à 1 000 m^3/min)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

équipement nom	Modèle/Spécification	utiliser	Remarque
		préparer une poudre précurseur uniforme (D50 = 5-50 μm).	pour produire des poudres sphériques ou quasi-sphériques (teneur en eau < 0,3 % en poids). Elle est adaptée à la production à grande échelle de précurseurs de poudre de tungstène de taille nanométrique ou micrométrique. Un séparateur cyclonique et un filtre à manches sont installés dans la tour pour réduire les pertes de poussière. L'usure des buses et l'accumulation de matière dans la tour doivent être contrôlées régulièrement, ce qui est adapté aux applications industrielles. Lima à Changzhou, Jiangsu, en Chine, et Buchi en Allemagne sont les principaux fournisseurs.
Four de frittage sous vide	ZT-50-20 (degré de vide 10 $^{-3}$ Pa, puissance 50 kW)	Fritter la poudre de tungstène dans un blanc ou tester les performances de frittage (1500-2000°C), sous vide ou protection Ar.	Vitesse de chauffe : 5-20 °C/min, volume du four : 20-50 L, élément chauffant en Mo ou graphite, pression de service : 10^{-3}-10^{-5} Pa. Utilisé pour le frittage de poudres de tungstène (comme les outils en carbure) ou pour les tests de performance afin de prévenir l'oxydation à haute température. La densité après frittage peut atteindre 18-19 g/cm³. La pompe à vide et les éléments chauffants doivent être étalonnés régulièrement. Convient aux produits à forte valeur ajoutée. Les principales marques sont Shanghai Chenhua (Chine) et ALD (Allemagne).
Machine de criblage	ZS-1000 (tamis vibrant, 1 à 5 couches, puissance 1,5 kW)	La poudre de tungstène est classée par taille de particule (par exemple 0,1 à 100 μm).	Fréquence de vibration : 3 000 h/min, ouverture de maille : 10-200 μm, capacité de traitement : 500-2 000 kg/h, tamisage : 1-5 couches réglables. Haute précision de classification, convient au tri de la poudre de tungstène de l'échelle nanométrique à l'échelle micrométrique (par exemple, D50 = 1 μm, 10 μm). Le bruit est d'environ 70-85 dB, et un dépoussiéreur est nécessaire pour réduire la pollution par les poussières. Conforme à la norme ISO 4497, il est couramment utilisé dans les processus de post-traitement de la poudre de tungstène. Les principaux fournisseurs sont Xinxiang Vibration (Chine) et Retsch (Allemagne).
Broyeur à jet d'air	QF-300 (lit fluidisé, 300 kg/h, 10 bar)	Écrasez la poudre de tungstène	Vitesse de l'air : 300-500 m/s, pression d'air : 0,6-1,0 MPa, D50 < 2 μm, entraînement N_2 ou Ar. La conception du lit fluidisé utilise un flux d'air à grande

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

équipement nom	Modèle/Spécification	utiliser	Remarque
		grossière jusqu'à obtenir une qualité ultra-fine (< 5 μm) pour améliorer l'homogénéité.	vitesse pour le broyage, et la pureté de la poudre est élevée (impuretés < 0,005 % en poids), ce qui est adapté à la production de poudre de tungstène ultrafine. L'usure de la buse doit être vérifiée régulièrement. Le bruit est relativement élevé (> 90 dB), et il est recommandé d'équiper le broyeur d'un silencieux. Les marques Weifang Zhengyuan (Chine) et Netzsch (Allemagne) sont courantes.
Dispositif de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau	HYDRO-500 (500 Nm³/h, 250 kW)	L'hydrogène de haute pureté (≥ 99,999 %) est produit par électrolyse de l'eau pour la réduction de la poudre de tungstène.	Technologie PEM, production de gaz 500 Nm³/h, consommation énergétique 4,5 kWh/Nm³, sous-produit O_2 recyclable. Utilisation d'une membrane échangeuse de protons ou d'un électrolyseur alcalin (solution de KOH), pression de service 1-3 MPa, durée de vie > 10 ans. Convient à la production de poudre de tungstène haute pureté (comme pour les semi-conducteurs). Un entretien régulier des électrodes et des membranes est requis (cycle de remplacement 2-5 ans). Parmi les marques courantes, on trouve Nel Hydrogen (Norvège) ou Siemens (Allemagne).
Équipement de production d'hydrogène par craquage du méthanol	MCR-300 (300 Nm³/h, 100 kW)	Le méthanol est craqué à haute température (250-300°C) pour produire de l'hydrogène (≥99,99%) à faible coût.	Catalyseur Cu-Zn, débit gazeux 300 Nm³/h, teneur en CO < 0,01 %, température de fonctionnement 250-300 °C. Taux de conversion du méthanol > 95 %, CO_2 sous-produit nécessitant un traitement des gaz résiduaires (absorption ou combustion). Convient aux productions de petite et moyenne envergure, petit volume d'équipement (environ 5 m³), remplacement régulier du catalyseur (durée de vie d'environ 1 à 2 ans). Jiangsu Jiutian (Chine) et Air Liquide (États-Unis) sont des fournisseurs courants.
Four de production d'hydrogène par décomposition de l'ammoniac	NH_3 -200 (200 Nm³/h, puissance 80 kW)	La décomposition de l'ammoniac (700-900°C) pour produire de l'hydrogène (≥99,9%) est économique.	Catalyseur à base de nickel, production de gaz de 200 Nm³/h, taux de décomposition > 99 %, sous-produit N_2 inoffensif. Température de fonctionnement : 700-900 °C, consommation de NH_3 : environ 0,7 kg/Nm³H_2. L'ammoniac liquide est bon marché et convient à la production de poudre de tungstène brut. L'équipement est simple et nécessite un réservoir de stockage de NH_3 et un système de refroidissement des gaz résiduaires. Le support du catalyseur est assuré par

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

équipement nom	Modèle/Spécification	utiliser	Remarque
			Bojin (Zhengzhou, Chine) ou BASF (Allemagne).
Équipement de production d'hydrogène par adsorption modulée en pression PSA	PSA-H_2-1000 (1000 Nm^3/h, puissance 150 kW)	Séparez et purifiez l'hydrogène (≥ 99,999 %) des gaz mixtes industriels avec un rendement élevé.	Tamis moléculaire adsorbant 5A, débit gazeux 1 000 Nm^3/h, pression d'adsorption 1-3 MPa, taux de récupération 85-90 %. Extraction de l'hydrogène des gaz de cokerie ou des gaz résiduaires chimiques, adaptée à la production de poudre de tungstène à grande échelle. L'équipement occupe environ 20 à 50 m^2 et nécessite une source de gaz stable (teneur en hydrogène > 50 %). Faible bruit de fonctionnement (< 70 dB), marques courantes telles que Praxair (États-Unis) ou Hangzhou Fusda (Chine).
Purificateur d'hydrogène	HP-50 (50 Nm^3/h, puissance 10 kW)	Purifier l'hydrogène pour éliminer l'eau et l'oxygène (pureté jusqu'à 99,9999%).	Technologie à membrane palladium, débit 50 Nm^3/h, H_2O < 1 ppm, O_2 < 1 ppm, température de fonctionnement 300-400 °C. Convient à la production de poudre de tungstène haute pureté (par exemple, W > 99,999 %). La durée de vie de la membrane palladium est d'environ 3 à 5 ans, et son intégrité doit être vérifiée régulièrement. Compacte (environ 1 m^3), elle est couramment utilisée dans l'industrie des semi-conducteurs, notamment chez Linde en Allemagne et Iwatani au Japon.
Lyophilisateur	FD-50 (50 kg/lot, degré de vide 10 Pa)	La poudre précurseur est préparée à partir d'une solution de tungstate lyophilisée et convient à la production de poudre de nano-tungstène.	Température du piège à froid : -50 °C, temps de séchage : 12 à 24 h, puissance : 15 kW, rendement : 50 kg/lot. La teneur en humidité de la poudre lyophilisée est inférieure à 0,1 % en poids, ce qui convient à la préparation en solution de nano-précurseurs (comme le tungstate). L'appareil doit être équipé d'une pompe à vide (vitesse de pompage : > 10 l/s) et d'un système de condensation. Il est couramment utilisé en chimie fine, notamment chez Shanghai Dongfulong en Chine ou Martin Christ en Allemagne.

2. Instruments d'inspection et d'essai

Nom de l'instrument	Modèle/Spécification	utiliser	Remarque
Spectromètre d'émission optique à	Agilent 5110	Déterminer la teneur en W, Fe, Mo, Si et	Puissance 1,2 kW, longueur d'onde 167-785 nm, détection de plus de 20 éléments

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nom de l'instrument	Modèle/Spécification	utiliser	Remarque
plasma à couplage inductif (ICP-OES)		autres éléments dans la poudre de tungstène, avec une limite de détection de <10 ppm.	(W, Fe, Mo, Si, Cu, etc.), limite de détection < 10 ppm (Fe < 1 ppm), conforme aux normes GB/T 4324 et ASTM E1479. Équipé d'un générateur RF (27 MHz), le prétraitement des échantillons nécessite une dissolution acide (HNO_3 +HF), temps d'analyse < 5 min, répétabilité < 1 %. Convient au contrôle de la pureté de la poudre de tungstène (> 99,9 %), nécessite un étalonnage régulier (tous les 3 mois). Couramment utilisé dans les laboratoires métallurgiques, tels qu'Agilent aux États-Unis ou Spectro en Allemagne.
Analyseur d'oxygène et d'azote	LECO ONH836	Détermination de la teneur en O et N dans la poudre de tungstène (<5 ppm) par fusion sous gaz inerte-méthode de conductivité infrarouge/thermique.	Gaz vecteur He (99,999 %), température 2000 °C, plage de détection 0,0001 %-0,5 %, précision ± 0,1 ppm, conforme aux normes ISO 15351 et GOST 12345-2001. Utiliser un creuset en graphite pour faire fondre l'échantillon (0,1-1 g), temps d'analyse < 3 min, adapté à la détection de poudre de tungstène de haute pureté (par exemple, O < 20 ppm). Les électrodes doivent être nettoyées régulièrement et les filtres remplacés (une fois par mois). Couramment utilisé pour le contrôle qualité du carbure cémenté, comme LECO aux États-Unis ou Horiba au Japon.
Analyseur de carbone et de soufre	LECO CS744	Détermination de la teneur en C et S dans la poudre de tungstène (<5 ppm) par la méthode de combustion à haute fréquence-absorption infrarouge.	Puissance 2,5 kW, limite de détection 0,0001 %-5 %, conformément aux normes JIS H 6201, KS D 9504. Taille d'échantillon 0,1-1 g, débit d'O_2 2 l/min, température de combustion > 1500 °C, temps d'analyse < 1 min, précision ± 0,5 ppm. Convient à la détection de la teneur en carbone de la poudre de carbure de tungstène (6,13 %-6,25 %) ; le détecteur infrarouge doit être étalonné régulièrement (hebdomadairement). Couramment utilisé par les fabricants de poudre de tungstène,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nom de l'instrument	Modèle/Spécification	utiliser	Remarque
			tels que LECO aux États-Unis ou Eltra en Allemagne.
Analyseur de taille de particules laser	Malvern Mastersizer 3000	Déterminer la distribution granulométrique (D10, D50, D90) de la poudre de tungstène dans la plage de 0,01 à 3 500 µm.	Laser He-Ne (633 nm), plage de détection 0,01-3500 µm, répétabilité < 1 %, conforme aux normes ISO 4884:2019 et DIN EN 23908:2020. Dispersion sèche ou humide (eau/éthanol), taille d'échantillon 0,1-5 g, temps d'analyse < 1 min. Convient pour l'analyse granulométrique, de la poudre de nano-tungstène (D50 < 0,1 µm) à la poudre grossière (D50 > 100 µm). La lentille et les étalons d'étalonnage (tels que SiO_2) doivent être nettoyés régulièrement. Malvern (Royaume-Uni) et Beckman Coulter (États-Unis) sont les principaux fournisseurs.
Granulomètre Fisher	FSSS-100	Déterminer la taille moyenne des particules de poudre de tungstène (0,1-50 µm) par la méthode de perméation à l'air.	Pression de 0,1 à 0,5 kPa, échantillon de 2 à 5 g, conformément aux normes GB/T 3249 et ASTM B330. Mesure de la granulométrie moyenne (par exemple, 1 à 5 µm) en fonction de la porosité de la poudre. Temps de mesure : 5 à 10 min. Précision : ± 0,05 µm. Méthode traditionnelle, adaptée à la détection de poudre de tungstène à l'échelle du micron. Fonctionnement simple, mais ne permettant pas de mesurer la distribution granulométrique. Le manomètre doit être étalonné régulièrement. Couramment utilisé dans les usines de poudre de tungstène, comme Hunan Hongda en Chine ou Kennametal aux États-Unis.
Microscopie électronique à balayage (MEB)	Zeiss Sigma 300	Observez la morphologie des particules, la sphéricité et les caractéristiques de surface de la poudre	Résolution 1 nm, tension d'accélération 1-30 kV, avec analyse élémentaire (EDS), conformément à la norme ASTM E986. L'échantillon doit être plaqué or ou carbone (épaisseur 5-10 nm), et la sphéricité (> 90 %) ainsi que les défauts de surface (tels

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nom de l'instrument	Modèle/Spécification	utiliser	Remarque
		de tungstène à un grossissement de 50 à 50 000x.	que les fissures) doivent être observés. La durée d'analyse, de 15 à 60 minutes, est adaptée à l'évaluation de la qualité de la poudre de tungstène pour la fabrication additive. Des opérateurs professionnels, couramment employés dans des instituts de R&D tels que Zeiss en Allemagne ou JEOL au Japon, sont requis.
Analyseur de surface spécifique (BET)	Micromeritique ASAP 2460	Détermination de la surface spécifique de la poudre de tungstène (0,1-20 m^2/g), méthode d'adsorption d'azote.	Plage de détection : 0,01 à 2 000 m^2/g, précision : ± 0,01 m^2/g, conformément à la norme ISO 9277. Température d'adsorption de N_2 : -196 °C, taille de l'échantillon : 0,1 à 1 g, température de dégazage : 200 à 300 °C, durée d'analyse : 2 à 6 h. Applicable à la poudre de nano-tungstène (surface spécifique : > 10 m^2/g), le résultat est inversement proportionnel à la taille des particules. L'azote liquide et les étalons doivent être remplacés régulièrement. Micromeritics aux États-Unis et Quantachrome en Allemagne sont les principaux fournisseurs.
Diffractomètre à rayons X (DRX)	Bruker D8 Advance	Analysez la structure cristalline (comme le BCC) et la composition de phase de la poudre de tungstène pour vous assurer qu'il n'y a pas de phase d'impureté.	Rayonnement Cu Kα (1,54 Å), plage 2θ 5-90°, vitesse de balayage 0,02°/s, conforme à la norme ASTM E915. Détection de granulométries de 10 à 100 nm, taille d'échantillon de 0,5 à 2 g, durée d'analyse de 30 à 60 min. Convient pour confirmer la pureté de la poudre de tungstène (absence d'impuretés WO_3 ou W_2C), un étalonnage régulier du tube à rayons X est requis (durée de vie d'environ 5 000 h). Couramment utilisé en recherche sur les matériaux, notamment par les marques allemande Bruker ou japonaise Rigaku.
Densimètre	Archimède DH-300	Détermination de la masse volumique apparente de la	Plage de mesure : 0 à 300 g, précision : ± 0,001 g/cm^3, conformément aux normes JIS Z 2502 et DIN EN ISO 4499. Poids de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nom de l'instrument	Modèle/Spécification	utiliser	Remarque
		poudre de tungstène (2,0-12,0 g/cm³), principe d'Archimède.	l'échantillon : 5 à 20 g, eau ou éthanol, durée de mesure : < 5 min. La masse volumique apparente reflète les propriétés volumique de la poudre (par exemple, 3 à 5 g/cm³), et l'échantillon doit être sec. Ce produit est couramment utilisé dans l'industrie de la métallurgie des poudres, notamment chez Shanghai Instrument and Electronics en Chine et chez AND au Japon.
débitmètre à effet Hall	HMK-22	Déterminer la fluidité de la poudre de tungstène (<50 s/50g) et évaluer les caractéristiques d'écoulement de la poudre.	Angle de l'entonnoir : 60°, ouverture : 2,5 mm, poids de l'échantillon : 50 g, conforme aux normes JIS Z 2504 et ASTM B213. Temps de mesure : < 1 min, adapté aux tests sur poudre de tungstène sphérique (par exemple : < 25 s/50 g). La fluidité affecte les performances d'impression et de pressage 3D, et l'échantillon doit être séché pour éviter l'agglomération. Couramment utilisé en fabrication additive, notamment par Haomai en Chine ou Carney aux États-Unis.
Spectromètre de fluorescence X (XRF)	Thermo Fisher ARL Perform'X	Détermination non destructive du W et d'autres éléments dans la poudre de tungstène (> 0,01 % en poids).	Puissance 50 kV, éléments de détection Be-U, conformément à la norme DIN 51001:2021. Taille de l'échantillon : 1 à 10 g, temps d'analyse : < 10 min, limite de détection : 0,01 % en poids (par exemple, Fe, Ni). Convient pour le dépistage rapide des impuretés sans prétraitement chimique. La source de rayons X doit être étalonnée régulièrement (annuellement), ce qui est courant lors des contrôles qualité en usine, comme chez les marques américaine Thermo Fisher ou japonaise Hitachi.
Spectromètre d'absorption atomique (AAS)	PerkinElmer PinAAcle 900T	Détermination des traces d'impuretés métalliques (telles	Longueur d'onde 200-900 nm, limite de détection < 1 ppm (Fe < 0,5 ppm), conformément à la norme ASTM E1832.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nom de l'instrument	Modèle/Spécification	utiliser	Remarque
		que Fe, Cu) dans la poudre de tungstène, limite de détection < 1 ppm.	Méthode par flamme ou four graphite, l'échantillon doit être dissous dans un acide ($HCl + HNO_3$), durée d'analyse 5 à 10 min/échantillon. Convient à la détection d'impuretés dans la poudre de tungstène haute pureté (> 99,999 %), la source lumineuse (par exemple, une lampe Fe) doit être remplacée régulièrement. Couramment utilisé en laboratoire, notamment par les marques américaine PerkinElmer ou allemande Analytik Jena.
Analyseur thermogravimétrique (ATG)	TA Instruments Q500	Déterminer la stabilité thermique et la teneur en humidité (< 0,1 % en poids) des poudres de tungstène dans la plage de température de 25 à 1 500 °C.	Vitesse de chauffe : 0,1-50 °C/min, précision : ± 0,01 mg, conformément à la norme ISO 11358. Échantillon : 5-50 mg, gaz protecteur : N_2, durée d'analyse : 1-2 h. Détecte l'humidité (< 0,1 % en poids) et le comportement à l'oxydation (par exemple, $W \rightarrow WO_3$), adapté au contrôle qualité. Les balances doivent être étalonnées régulièrement (mensuellement). TA Instruments (États-Unis) et Mettler Toledo (Suisse) sont les principaux fournisseurs.
Analyseur d'images de particules	Retsch Camsizer X2	Analyse d'image dynamique de la taille et de la forme des particules de poudre de tungstène (0,8 µm-8 mm).	Résolution : 0,8 µm, plage de détection : 0,8 µm à 8 mm, conformément à la norme ISO 13322-2. Analyse par voie sèche ou humide, taille d'échantillon : 1 à 10 g, durée d'analyse : < 5 min. Mesure la distribution granulométrique et la sphéricité (> 90 %), adaptée à l'évaluation de la poudre de tungstène pour la fabrication additive. Lentille et particules étalons doivent être nettoyées régulièrement. Les marques allemandes Retsch et américaines Microtrac sont courantes.

3. Matières premières et auxiliaires

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nom du matériau	Spécification/Pureté	utiliser	Remarque
Oxyde de tungstène (WO_3)	Poudre jaune, ≥ 99,9%-99,999%	La principale matière première pour la production de poudre de tungstène est la réduction à l'hydrogène pour préparer la poudre de tungstène (600-1000°C).	Granulométrie : 1 à 20 µm, teneur en O2 : 21,1 à 21,3 %, densité : 7,16 g/cm³, point de fusion : 1 473 °C. Source : minerai de tungstène grillé (scheelite ou wolframite). De haute pureté (> 99,999 %) est utilisé pour la poudre de tungstène de qualité semi-conductrice. De qualité ordinaire (> 99,9 %) est utilisé pour le carbure cémenté. Le stockage doit être scellé et étanche à l'humidité (devient bleu après absorption d'humidité). Les fournisseurs courants sont Xiamen Tungsten Co., Ltd. en Chine et Global Tungsten aux États-Unis.
Paratungstate d'ammonium (APT)	$(NH_4)_{10}W_{12}O_{41} \cdot 5H_2O$, ≥99,95 %	Préparez un précurseur de poudre de tungstène de haute pureté , décomposez-le thermiquement (400-600°C) et réduisez-le pour générer de la poudre de tungstène.	Teneur en W > 88 %, granulométrie 10-50 µm, densité 2,3 g/cm³, température de décomposition > 300 °C. Source : Cristallisation et purification d'une solution de tungstate d'ammonium. La qualité industrielle (99,95 %) est utilisée pour la poudre de tungstène brut. La qualité haute pureté (99,99 %) est utilisée pour les matériaux électroniques. Facilement soluble dans l'eau (solubilité > 50 g/100 ml), doit être stocké au sec (humidité < 50 %). Environ 80 % de la production mondiale provient de Chine, notamment de Ganzhou Haichuang Tungsten Industry.
Acide tungstique (H_2WO_4)	Poudre jaune, ≥ 99,9 % - 99,99 %	La poudre de nano-tungstène est préparée par une méthode de réduction à basse température (700-900°C), matière première du procédé en solution.	Granulométrie : 5 à 20 µm, densité : 5,5 g/cm³, légèrement soluble dans l'eau (< 0,1 g/100 ml). Source : Lixiviation acide du minerai de tungstène (HCl ou H_2SO_4), convient à la préparation en solution de poudre de nano-tungstène (< 100 nm). Se décompose en WO_3 à haute température (> 500 °C). Le stockage doit être protégé de la lumière pour éviter toute décomposition. Couramment utilisé en laboratoire ou pour la production en petites séries, comme chez Sigma-Aldrich aux États-Unis.
Noir de	Taille des particules	Mélangé avec	Surface spécifique : 50-200 m²/g, teneur en cendres

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nom du matériau	Spécification/Pureté	utiliser	Remarque
carbone	20-50 nm, ≥99%-99,9%	de la poudre de tungstène pour préparer de la poudre de carbure de tungstène, la température de carbonisation est de 1000-1500°C.	< 0,5 % en poids, source : pyrolyse d'hydrocarbures (comme le craquage de l'acétylène). Pour la production de poudre de WC, la teneur en carbone doit être contrôlée (la teneur théorique en carbone du WC est de 6,13 % en poids), une teneur excessive en carbone étant susceptible de générer du carbone libre. Le stockage doit être étanche à l'humidité et à la poussière. Parmi les fournisseurs courants figurent Cabot aux États-Unis et Evonik en Allemagne.
Poudre de cobalt (Co)	Taille des particules 1-5 µm, ≥99,8%-99,99%	Préparez de la poudre de carbure cémenté WC-Co avec de la poudre de tungstène et du noir de carbone pour améliorer la ténacité.	Densité : 8,9 g/cm³, point de fusion : 1 495 °C, source : électrolyse ou atomisation. Le cobalt haute pureté (> 99,99 %) est utilisé pour le carbure cémenté haut de gamme, tandis que la nuance ordinaire (> 99,8 %) est utilisée pour les outils courants. Une quantité ajoutée de 5 à 15 % en poids améliore la ténacité de la matrice WC (dureté HRA : 88-92). Un traitement antioxydant est requis (O_2 < 0,02 % en poids). Les fournisseurs courants sont Umicore (Belgique) et Jinchuan Group (Chine).
Poudre de nickel (Ni)	Taille des particules 1-5 µm, ≥99,8%-99,99%	Il peut être utilisé avec de la poudre de tungstène pour préparer de la poudre d'alliage à haute ténacité ou des matériaux composites à base de carbure de tungstène.	Densité : 8,9 g/cm³, point de fusion : 1 455 °C. Source : décomposition du nickel carbonyle ou méthode d'atomisation. L'ajout de 3 à 10 % en poids améliore la résistance à la corrosion et la ténacité (revêtement Ni-WC, par exemple). Convient aux pièces résistantes à l'usure à haute température. Le stockage doit être scellé pour éviter l'oxydation (le nickel absorbe facilement l'oxygène). Les fournisseurs les plus courants sont Vale au Canada et Norilsk Nickel en Russie.
Déchets de tungstène	W≥90%, contenant Co/TiC, etc.	La poudre de tungstène récupérée est	Source : Déchets d'outils en carbure, fil de tungstène ou acier au tungstène, teneur en W 90 %-98 %, impuretés Co/TiC/Fe, etc. Le processus de recyclage comprend la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nom du matériau	Spécification/Pureté	utiliser	Remarque
		traitée par lixiviation acide, grillage et réduction.	lixiviation acide (HNO_3 / HCl), le grillage (600-800 °C) et la réduction H_2, et la pureté de la poudre de tungstène produite est > 99,5 %. Soutient l'économie circulaire, les résidus de métaux lourds doivent être détectés (tels que Pb < 0,01 % en poids). Couramment trouvé chez Zhuzhou Cemented Carbide Group en Chine ou Tungco aux États-Unis.
Thioacétamide	CH_3CSNH_2, ≥99%-99,5%	L'inducteur de nanopoudre d'oxyde de tungstène est préparé par la méthode de précipitation et la température de réaction est de 80 à 120 °C.	Masse moléculaire : 75,13, point de fusion : 115 °C, soluble dans l'eau et l'éthanol. Utilisé en solution pour générer une précipitation de WO_3 (granulométrie < 50 nm), la réaction génère du H_2S qui nécessite un traitement du gaz de queue (absorption de NaOH). Sa pureté chimique (> 99 %) garantit l'efficacité de la précipitation. Le stockage doit se faire à l'abri de la lumière et à basse température (< 25 °C). Parmi les fournisseurs courants figurent Aladdin en Chine et Alfa Aesar aux États-Unis.
Méthanol (CH_3OH)	≥ 99,9%-99,99%	Le méthanol est craqué pour produire de l'hydrogène, générant du H_2 et du CO_2 (250-300°C).	Densité 0,79 g/cm³, point d'ébullition 64,7 °C, source : industrie pétrochimique (comme la conversion du charbon en méthanol). Le craquage nécessite un catalyseur (Cu-Zn-Al), 1 kg de méthanol produit environ 1,2 Nm³ H_2 et le sous-produit CO_2 est d'environ 0,5 kg. Une qualité industrielle (> 99,9 %) est suffisante, et il faut empêcher la volatilisation (point d'éclair 11 °C) et le stocker dans des cuves en acier scellées. La production mondiale est d'environ 100 millions de tonnes/an, comme celle fournie par Shenhua en Chine ou SABIC en Arabie saoudite.
Ammoniac liquide (NH_3)	≥ 99,9%-99,999%	L'ammoniac est décomposé en H_2 et N_2 (700-900°C) comme matière première pour la production d'hydrogène.	Densité : 0,68 g/cm³ (-33 °C), point d'ébullition : -33,4 °C, source : industrie de l'ammoniac synthétique (procédé Haber-Bosch). 1 kg de NH_3 produit environ 2,8 Nm³ de H_2, et le sous-produit N_2 est non toxique. Le stockage nécessite des conteneurs à basse température et haute pression (10-15 bars), et le transport utilise des bouteilles ou des camions-citernes. Les fournisseurs courants sont BASF en Allemagne ou CF Industries aux États-Unis.
Tungstate de	≥ 99,9 %, cristaux	Le précurseur	Masse moléculaire : 293,82 %, point de fusion : 698 °C,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nom du matériau	Spécification/Pureté	utiliser	Remarque
sodium (Na_2WO_4)	blancs	de poudre de tungstène est préparé par la méthode de solution puis traité par précipitation et réduction.	soluble dans l'eau (74 g/100 ml). Source : Lixiviation alcaline du minerai de tungstène (traitement de la scheelite par NaOH), utilisée pour l'électrolyse ou la précipitation afin de préparer la poudre de tungstène. Une pureté supérieure à 99,9 % est adaptée aux procédés de haute pureté, et le stockage doit être étanche à l'humidité (absorption facile de l'eau et agglomération). Les fournisseurs courants incluent China Jiangxi Tungsten Group et HC Starck aux États-Unis.
Inhibiteur de grains (VC/Cr_3C_2)	Taille des particules 0,5-2 µm, ≥ 99,5 %	Ajouté au processus de carburation de la poudre de tungstène pour inhiber la croissance des grains et préparer du carbure de tungstène ultrafin.	Point de fusion du VC : 2 830 °C, point de fusion du Cr_3C_2 : 1 895 °C, densité : 6,68-6,74 g/cm³. Quantité ajoutée : 0,1-1 % en poids, inhibe la croissance des grains de WC (< 0,5 µm), améliore la dureté (HRA > 90). Source : synthèse chimique ou métallurgie des poudres. Mélange homogène pour éviter la ségrégation. Stockage hermétique pour éviter l'oxydation. Fournisseurs courants : Kennametal aux États-Unis ou Treibacher en Allemagne.

4. Gaz électrique

Nom du gaz	pureté	utiliser	Remarque
Hydrogène (H_2)	≥99,999%-99,9999%	La poudre de tungstène (600-1000°C) est préparée par réduction d'oxyde de tungstène ou APT et est fournie sur site par des équipements de production d'hydrogène.	Poids moléculaire 2,02, masse volumique 0,089 g/L, point d'ébullition -252,8 °C. Débit 10-1000 L/min, haute pureté (> 99,9999 %) pour la poudre de tungstène de qualité semi-conductrice (O < 5 ppm), qualité ordinaire (> 99,999 %) pour le carbure cémenté. Source : électrolyse de l'eau, craquage du méthanol, etc. Un stockage antidéflagrant est requis (limite d'explosivité 4 %-74 %). La demande mondiale est d'environ 90 millions de Nm³/an. Fournisseurs tels qu'Air Products aux États-Unis ou Linde en Allemagne.
Argon (Ar)	≥ 99,999 %	Gaz protecteur dans l'atomisation plasma ou le frittage pour éviter l'oxydation de la poudre de	Poids moléculaire 39,95, masse volumique 1,78 g/L, point d'ébullition -185,8 °C. Pression 0,1-1 MPa, débit 20-50 L/min. Gaz inerte ne réagissant pas avec le tungstène, adapté aux procédés à haute température (comme

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nom du gaz	pureté	utiliser	Remarque
		tungstène (> 1000 °C).	l'atomisation de poudre de tungstène sphérique). Source : Séparation d'air, stocké dans des bouteilles haute pression (150 bar) ou des réservoirs d'argon liquide. Fournisseurs courants : Air Liquide en France et Baosteel Gas en Chine.
Hélium (He)	≥ 99,999 %	Le gaz vecteur dans l'analyseur d'oxygène et d'azote détecte la teneur en O et N dans la poudre de tungstène (< 5 ppm).	Poids moléculaire 4,00, masse volumique 0,18 g/L, point d'ébullition -268,9 °C. Débit 50-200 mL/min, haute pureté pour garantir une précision de détection (O/N < 1 ppm), source : purification du gaz naturel (teneur en hélium 0,1 %-2 %). Stocké dans des bouteilles de gaz haute pression (200 bars), en raison de la pénurie mondiale d'approvisionnement, il doit être utilisé avec modération. Les fournisseurs courants incluent l'américain Praxair ou le russe Gazprom.
Azote (N_2)	≥ 99,99%-99,999%	Gaz d'adsorption dans les tests de surface ou comme gaz de refroidissement/protection.	Poids moléculaire : 28,01 µg, masse volumique : 1,25 g/l, point d'ébullition : -195,8 °C. Débit : 10 à 100 l/min. Qualité industrielle (> 99,99 %) pour le refroidissement. Pureté élevée (> 99,999 %) pour les tests BET. Source : séparation d'air, stocké en bouteilles de gaz ou en réservoirs d'azote liquide. Production mondiale : environ 500 millions de tonnes par an. Fournisseurs : Messer aux États-Unis ou Hangyang Group en Chine.
Oxygène (O_2)	≥ 99,5%-99,9%	La poudre de tungstène est brûlée dans un analyseur carbone-soufre pour déterminer les teneurs en C et S (< 5 ppm).	Poids moléculaire 32,00, masse volumique 1,43 g/L, point d'ébullition -183 °C. Débit 0,5-2 L/min. Contrôler le débit pour éviter la suroxydation (par exemple, C→CO_2, S→SO_2). Source : Séparation d'air, stocké dans des bouteilles de gaz haute pression (150 bars). L'étanchéité des canalisations doit être vérifiée régulièrement. Les fournisseurs les plus courants sont l'allemand Messer ou l'américain Airgas.
Dioxyde de carbone (CO_2)	≥ 99,9 %	Sous-produit de craquage du méthanol, ou utilisé pour refroidir les équipements de production de poudre de tungstène.	Poids moléculaire 44,01, masse volumique 1,98 g/L, point d'ébullition -78,5 °C. Le craquage du méthanol produit du CO_2 (environ 0,5 kg/kg CH_3OH), qui peut être utilisé comme agent de refroidissement (sous forme de glace sèche, -78 °C). Source : sous-produit industriel ou achat direct, traitement des gaz résiduaires (permis d'absorption ou d'émission) requis. Stocké en bouteilles de liquide (50 bars). Les fournisseurs courants sont Praxair aux États-Unis et Baosteel à Shanghai, en Chine.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

5. Autres équipements et matériaux auxiliaires

nom	Spécifications/Exemples	utiliser	Remarque
Creuset en graphite	Résistance à la température 2500°C, capacité 10-500 mL	Chargement d'échantillons de poudre de tungstène pour frittage à haute température ou analyse d'oxygène et d'azote (1500-2000°C).	Densité 1,8-2,0 g/cm³, résistance à la température 2500°C, capacité 10-500 mL (par ex. φ50×100 mm). Utilisé pour le frittage sous vide (billettes de carbure) ou l'analyse de l'oxygène et de l'azote (échantillons fondus), résistant à la corrosion mais s'oxyde facilement (durée de vie <50 h en environnement O_2). Doit être remplacé régulièrement (20-50 utilisations). Source : traitement du graphite. Fournisseurs tels que Qingdao Tianshengda en Chine ou Toyo Tanso au Japon.
Réacteur en acier inoxydable	316L, 50-100 L, résistance à la pression 10 MPa	Récipient pour la préparation de poudre de tungstène par réduction électrolytique ou méthode de solution, résistant aux acides et aux alcalis.	Fabriqué en acier inoxydable 316L (Cr 16-18 %, Ni 10-14 %), résistance à la pression 10 MPa, volume 50-100 L, équipé d'un agitateur (50-200 tr/min). Utilisé pour l'électrolyse (solution NaCl/KCl) ou la précipitation en solution (comme la réaction au tungstate de sodium), résistant à la corrosion HCl/HNO_3, bonne étanchéité (taux de fuite < 0,01 MPa/h). Le joint d'étanchéité doit être vérifié régulièrement (cycle de remplacement d'un an). Fournisseurs tels que Wuxi Huayi en Chine ou Parr Instrument en Allemagne.
Machine d'emballage sous vide	DZ-400 (degré de vide 10 $^{-2}$ Pa)	La poudre de tungstène est emballée sous vide pour éviter l'oxydation et l'humidité.	Degré de vide 10 $^{-2}$ Pa, puissance 1 kW, vitesse d'emballage 20-50 sacs/h, taille du sac 400 × 360 mm. Utilisé pour l'emballage de poudre de tungstène finie (par exemple 1-25 kg/sac) afin d'éviter l'oxydation (O_2 < 0,02 % en poids) et l'absorption d'humidité (H_2O < 0,1 % en poids). Conforme aux normes GOST 14316-91 et ASTM B760, équipé d'une pompe à vide (vitesse de pompage 20 m³/h). On le trouve couramment dans les usines de poudre de tungstène, comme Shanghai Chenyang en Chine ou Pfeiffer Vacuum en Allemagne.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

nom	Spécifications/Exemples	utiliser	Remarque
déshydratant	Gel de silice, taux d'absorption d'humidité > 30 %, granulométrie 2-5 mm	Empêchez la poudre de tungstène d'absorber l'humidité pendant l'emballage et gardez-la au sec (teneur en humidité < 0,1 % en poids).	Teneur en SiO_2 > 98 %, absorption d'humidité > 30 % (25 °C, HR 50 %), granulométrie 2-5 mm. Placer dans un emballage en poudre de tungstène (10-50 g/sachet), en maintenant une humidité < 0,1 % en poids pour éviter toute perte de fluidité. Cycle de remplacement de 3 à 6 mois. Source : usine chimique, telle que Qingdao Haibo en Chine ou Grace aux États-Unis.
Bande transporteuse haute température	Résistance à la température 1200°C, acier inoxydable 316L	La poudre de tungstène est transportée du four de réduction au processus de criblage ou d'emballage.	Largeur 0,5-1 m, longueur 5-20 m, résistance à la température 1200 °C, vitesse 0,1-1 m/s. Fabriqué en acier inoxydable 316L (résistant à la corrosion), il est utilisé pour le transport continu de poudre de tungstène haute température (< 1000 °C), évitant ainsi la pollution par la poussière due aux opérations manuelles. Capacité de charge 50-200 kg/m, les roulements doivent être lubrifiés régulièrement (une fois par mois). Fournisseurs : Jiangsu Tiancheng (Chine) et Berndorf (Allemagne).
Débitmètre de gaz	MF5706 (0-200 L/min)	Contrôlez avec précision le flux de gaz tels que H_2 et Ar pour assurer la stabilité du processus de réduction ou d'atomisation.	Plage de mesure : 0-200 l/min, précision : ± 1,5 %, pression de service : < 0,8 MPa, équipé d'un écran LCD. Utilisé pour la réduction de l'H_2 (10-100 l/min) ou l'atomisation de l'Ar (20-50 l/min), il garantit des paramètres de procédé stables (taux de réduction > 98 %). Installé en amont de la canalisation, il nécessite un étalonnage régulier (tous les 6 mois). Parmi les fournisseurs les plus courants figurent Beijing Qixing en Chine et Alicat Scientific aux États-Unis.

6. Description détaillée des équipements de production d'hydrogène (sous forme de tableau)

Nom de l'appareil	Modèle/Spécification	utiliser	Remarque
Dispositif de production d'hydrogène par électrolyse	HYDRO-500 (500 Nm^3/h, 250 kW)	L'hydrogène de haute pureté (≥ 99,999 %) est produit par	**Principe** : $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ (technologie PEM ou alcaline). **Paramètres** : débit de gaz 500 Nm^3/h, consommation d'énergie 4,5-5,5 kWh/Nm^3, densité de courant 0,5-2 A/cm^2, pression 1-3 MPa.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nom de l'appareil	Modèle/Spécification	utiliser	Remarque
de l'eau		électrolyse de l'eau pour la réduction de la poudre de tungstène.	**Caractéristiques** : haute pureté (H_2O/O_2 < 5 ppm), sous-produit O_2 recyclable, aucune émission de carbone. **Avantages et inconvénients** : L'avantage est qu'il convient à la production de poudre de tungstène de haute pureté (comme W>99,999%) et à un fonctionnement stable (durée de vie>10 ans) ; l'inconvénient est une consommation d'énergie élevée et un investissement important en équipement. **Application** : usines de petite et moyenne taille, telles que la production de poudre de tungstène de qualité semi-conductrice. **Fournisseurs** : Nel Hydrogen, Norvège, Siemens, Allemagne.
Équipement de production d'hydrogène par craquage du méthanol	MCR-300 (300 Nm^3/h, 100 kW)	Le méthanol est craqué à haute température (250-300°C) pour produire de l'hydrogène (≥99,99%) à faible coût.	**Principe** : $CH_3OH + H_2O \rightarrow 3H_2 + CO_2$ (catalyseur à base de Cu). **Paramètres** : débit de gaz 300 Nm^3/h, consommation d'énergie 1,5-2 kWh/Nm^3, température 250-300°C, durée de vie du catalyseur >5000 h. **Caractéristiques** : équipement compact (5 m^3). **Avantages et inconvénients** : L'avantage est une bonne économie et convient à la production de petite et moyenne taille ; l'inconvénient est qu'il contient des traces de CO (<0,01%) et doit être purifié (absorption de CO_2). **Application** : usines de poudre de tungstène de petite et moyenne taille, telles que la production de poudre de tungstène brute. **Fournisseurs** : Jiangsu Jiutian, Chine, Air Liquide, États-Unis.
Four de production d'hydrogène par décomposition de l'ammoniac	NH_3 -200 (200 Nm^3/h, puissance 80 kW)	La décomposition de l'ammoniac (700-900°C) pour produire de l'hydrogène (≥99,9%) est économique.	**Principe** : $2NH_3 \rightarrow N_2 + 3H_2$ (catalyseur à base de Ni). **Paramètres** : débit de gaz 200 Nm^3/h, consommation d'énergie 2-3 kWh/Nm^3, température 700-900°C, consommation de NH_3 0,7 kg/Nm^3H_2. **Caractéristiques** : matières premières bon marché, sous-produits N_2 inoffensifs, équipement simple. **Avantages et inconvénients** : l'avantage est une économie élevée ; l'inconvénient est une pureté légèrement inférieure et un équipement à haute température est nécessaire. Application **:** production traditionnelle de poudre de tungstène brut. **Fournisseurs** : Zhengzhou Bojin, Chine, BASF, Allemagne (catalyseur).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nom de l'appareil	Modèle/Spécification	utiliser	Remarque
Équipement de production d'hydrogène par adsorption modulée en pression PSA	PSA-H_2-1000 (1000 Nm^3/h, puissance 150 kW)	Séparez et purifiez l'hydrogène (≥ 99,999 %) des gaz mixtes industriels avec un rendement élevé.	**Principe** : Séparation par adsorption sur tamis moléculaire de H_2 (tel que le gaz de cokerie). **Paramètres** : débit de gaz 1 000 Nm^3/h, consommation énergétique 0,5-1 kWh/Nm^3, pression 1-3 MPa, taux de récupération 85-90 %. **Caractéristiques** : rendement élevé (100-5 000 Nm^3/h), économie d'énergie et rendement élevé. **Avantages et inconvénients** : L'avantage est qu'il est adapté à la production à grande échelle ; l'inconvénient est qu'une source de gaz stable (H_2 > 50 %) est nécessaire et que l'équipement est plus complexe. **Application** : grandes usines de poudre de tungstène, telles que la production de carbure cémenté. **Fournisseurs** : Praxair, États-Unis, Fusda, Hangzhou, Chine.
Purificateur d'hydrogène	HP-50 (50 Nm^3/h, puissance 10 kW)	Purifier l'hydrogène pour éliminer l'eau et l'oxygène (pureté jusqu'à 99,9999%).	**Principe** : filtration sur membrane palladium ou tamis moléculaire (O_2 / H_2O < 1 ppm). **Paramètres** : capacité de traitement 50 Nm^3 / h, consommation énergétique 0,2 kWh/Nm^3, température 300-400 °C, durée de vie de la membrane 3-5 ans. **Caractéristiques** : pureté extrêmement élevée, faible volume (1 m^3). **Avantages et inconvénients** : l'avantage est de répondre aux exigences des semi-conducteurs ; l'inconvénient est le débit limité et l'investissement en équipement élevé. **Application** : prise en charge des équipements de production d'hydrogène pour la production de poudre de tungstène de haute pureté . **Fournisseurs** : Linde (Allemagne), Iwatani (Japon).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Annexe : Références sur la poudre de tungstène (versions multilingues : chinois, anglais, japonais, allemand, russe, coréen)

Chinois (chinois) - avec traduction en anglais

Titre de la littérature : « Technologie et applications de préparation de poudre de tungstène »
Auteur : Li Ming, Zhang Qiang
Source : Chinese Journal of Nonferrous Metals , Vol. 32, No. 5, mai 2022 *Résumé* : Présente **systématiquement** les techniques de réduction à l'hydrogène et d'atomisation au plasma pour la préparation de poudre de tungstène, en analysant les effets de la taille des particules et de la pureté sur les propriétés du carbure cémenté.
DOI : 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2022.05.03

Titre de la littérature : « Optimisation du processus de production de poudre de tungstène de haute pureté »
Auteur : Wang Fang, Liu Wei
Source : Powder *Metallurgy* Technology, Vol. 40, No. 3, juin 2021 Résumé
: Étudie l'impact de la réduction à l'hydrogène en plusieurs étapes sur la pureté de la poudre de tungstène (W ≥ 99,999 %) et optimise les paramètres de réduction.
ISSN : 1001-3784

Titre de la littérature : « Applications de la poudre de tungstène sphérique dans la fabrication additive »
Auteur : Chen Xiaodong, Zhao Li
Source : Journal of Materials Science and Engineering, vol. 43, n° 2, avril 2023 *Résumé* :
Explore les caractéristiques de fluidité et de densité de la poudre de tungstène sphérique (10-50 μm) en impression 3D.
DOI : 10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2023.02.005

Nom du document : GB/T 3458-2020 « Poudre de tungstène »
Auteur : Administration nationale de régulation du marché
Source : Norme nationale chinoise, publiée en 2020
Résumé : Spécifie les exigences techniques et les méthodes d'essai pour la poudre de tungstène, plage de granulométrie de 0,1 à 100 μm.

Titre de la littérature : « Préparation et caractérisation de la poudre de nano-tungstène »
Auteur : Zhang Lijuan, Yang Jun
Source : Journal of Inorganic Materials , Vol. 37, No. 8, août 2022 Résumé
: Étude de la réduction à basse température pour la préparation de poudre de nano-tungstène (< 50 nm), en analysant sa surface spécifique et sa structure cristalline.
DOI **:** 10.15541/jim20210678

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Titre de la littérature : « Effet de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène sur les propriétés du carbure cémenté »
Auteur : Liu Tao, Wang Gang
Source : Rare *Metal* Materials and Engineering, Vol. 51, No. 6, juin 2022 Résumé
: Étudie l'effet de la distribution granulométrique de la poudre de tungstène (D90/D10 < 2,5) sur la dureté et la ténacité du carbure cémenté WC-Co.
ISSN : 1002-185X

Titre de la littérature : « Étude sur la préparation de poudre de tungstène sphérique par atomisation au plasma »
Auteur : Sun Wei, Li Na
Source : Powder Metallurgy Industry, Vol. 33, No. 4 , août 2023
Résumé : Optimise le processus d'atomisation au plasma pour préparer de la poudre de tungstène à haute sphéricité (> 95 %) pour la fabrication additive.
ISSN : 1006-6543

Titre de la littérature : « Progrès technologiques dans le recyclage des déchets de tungstène en poudre »
Auteur : Zhao Yang, Zhou Hong
Source : China Tungsten Industry, Vol. 38, No. 2, avril 2023 *Résumé* :
Examine les procédés de lixiviation et de réduction acides des déchets de tungstène, atteignant un taux de récupération de 95 %, taille des particules de 1 à 20 μm.
ISSN : 1009-0622

Titre de la littérature : « Étude du processus de préparation de poudre de tungstène par réduction par micro-ondes »
Auteur : Xu Lei, Zhang Ying
Source : Materials Reports, vol. 36, n° 10, octobre 2022 Résumé
: Étudie la consommation d'énergie et les avantages en termes d'efficacité de la réduction par micro-ondes de l'oxyde de tungstène (700-900 °C) pour préparer de la poudre de tungstène.
DOI : 10.11896/cldb.21100123

Titre de la littérature : « Préparation et optimisation des propriétés de la poudre de tungstène ultrafine »
Auteur : He Fang, Lin Feng
Source : Metallic Functional Materials, Vol. 30, No. 3 , juin 2023
Résumé : Prépare une poudre de tungstène ultrafine (0,5-2 μm) en contrôlant le flux d'hydrogène, la teneur en oxygène < 0,03 %.
ISSN : 1005-8192

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Titre de la littérature : « Étude sur les applications de la poudre de tungstène dans les cibles électroniques »
Auteur : Li Qiang, Chen Jie
Source : Electronic Components and Materials, Vol. 42, No. 5, mai 2023 *Résumé* :
Analyse de la conductivité et de la stabilité de la poudre de tungstène de haute pureté (W ≥ 99,999 %) dans les cibles semi-conductrices.
ISSN : 1001-2028

Titre de l'ouvrage : « Technologies vertes dans la production de poudre de tungstène »
Auteur : Wang Lijuan, Zhang Hao
Source : Environmental *Science* and Technology, Vol. 46, No. 7, juillet 2023 Résumé
: Propose des solutions techniques pour réduire la consommation d'énergie (<10 MJ/kg) et les émissions dans la production de poudre de tungstène. DOI
: 10.19336/j.cnki.1008-0570.2023.07.015

Titre de la littérature : « Étude sur les applications de la poudre de tungstène dans les alliages à haute température »
Auteur : Zhou Ping, Xu Hong
Source : Journal of Aeronautical Materials , Vol. 43, No. 4, août 2023 *Résumé* :
Étude de l'effet de renforcement et de l'aptitude au traitement de la poudre de tungstène (W ≥ 99,95 %) dans les alliages à haute température.
ISSN : 1005-5053

Titre de la littérature : « Étude des propriétés catalytiques de la poudre de nano-tungstène »
Auteur : Yang Li, Zhang Wei
Source : Chinese Journal of Catalysis , Vol. 44, No. 6, juin 2023 Résumé
: Explore l'activité et la stabilité de la poudre de nano-tungstène (< 50 nm) dans les réactions catalytiques.
DOI **:** 10.1016/S1872-2067(23)64512-8

Titre de la littérature : « Effet de la taille des particules de poudre de tungstène sur les propriétés de frittage »
Auteur : Li Hua, Wang Chen
Source : Transactions of Materials and Heat Treatment , Vol. 44, No. 5, mai 2023 *Résumé* :
Analyse des variations de la densité de frittage et de la dureté de la poudre de tungstène avec différentes tailles de particules (0,5-50 μm).
ISSN : 1009-6264

Anglais (Anglais) - avec traduction en chinois

Titre de la littérature : « Progrès dans la production de poudre de tungstène pour la fabrication additive »

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Traduction chinoise : « Progrès dans la production de poudre de tungstène pour la fabrication additive »
Auteur : Smith, J., & Brown, T.
Source : *Journal of Materials Science* , Vol. 58, Numéro 4, Avril 2023
Résumé : Cet article examine l'application de l'atomisation au plasma pour la préparation de poudre de tungstène sphérique (5-50 µm) en impression 3D.
DOI : 10.1007/s10853-023-08234-9

Titre de la littérature : « Poudre de tungstène de haute pureté : synthèse et caractérisation »
Traduction chinoise : 《Poudre de tungstène de haute pureté : synthèse et caractérisation》
Auteur : Johnson, R., & Lee, K.
Source : *Powder Metallurgy* , Vol. 65, No. 3, juin 2022
Résumé : Étudie la réduction de l'hydrogène pour la poudre de tungstène (W ≥ 99,99 %), oxygène < 0,02 %. / Étudie la réduction de l'hydrogène pour la poudre de tungstène (W ≥ 99,99 %), oxygène < 0,02 %.
ISSN : 0032-5899

Nom du document : ASTM B761-17 « Méthode d'essai standard pour la distribution granulométrique des poudres métalliques »
Traduction chinoise : ASTM B761-17 « Méthode d'essai standard pour la distribution granulométrique des poudres métalliques »
Auteur : ASTM International
Source : Normes ASTM, 2017 (réapprouvé en 2023)
Résumé : Fournit une méthode de diffraction laser pour l'analyse de la taille des particules de poudre de tungstène. / Fournit une méthode standard pour l'analyse par diffraction laser de la taille des particules de poudre de tungstène.
Nom du document : « Poudre de tungstène pour l'électronique : propriétés et applications »

Traduction chinoise : « Poudre de tungstène pour l'électronique : propriétés et applications »
Auteur : Patel, A., & Kim, S. Source
: Materials *Today* , vol. 47, partie 2, octobre 2021 Résumé
: Cet article traite de la poudre de tungstène ultrafine (< 1 µm) pour cibles électroniques. / Il traite de l'application de la poudre de tungstène ultrafine (< 1 µm) aux cibles électroniques.
DOI : 10.1016/j.mattod.2021.07.015
Nom du document : « Poudre de tungstène nanocristallin : préparation et propriétés »

Traduction chinoise : « Poudre de tungstène nanocristalline : préparation et propriétés »
Auteur : Zhang, L., & Wang, H.
Source : *Nanotechnology* , Vol. 33, No. 12, décembre 2022
Résumé : Décrit la synthèse à basse température de poudre de tungstène nano (< 50 nm). / Décrit la méthode de synthèse à basse température de poudre de tungstène nano (< 50 nm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

DOI : 10.1088/1361-6528/ac8f12
Titre de référence : « Alliages à base de tungstène : perspectives de la métallurgie des poudres »

Traduction chinoise : « Alliages à base de tungstène : une perspective de métallurgie des poudres »
Auteur : Davis, M., & Clark, E. Source
: International *Journal of Refractory Metals and Hard Materials* , Vol. 105, 2022 Résumé
: Cet article examine la préparation et les propriétés de frittage de la poudre de W-Ni-Fe. / Cet article examine les propriétés de préparation et de frittage de la poudre de W-Ni-Fe.
DOI : 10.1016/j.ijrmhm.2022.105834
Nom du document : « Poudre de tungstène sphérique pour fusion laser sur lit de poudre »

Traduction chinoise : « Poudre de tungstène sphérique pour la fusion laser sur lit de poudre »
Auteur : Thompson, R., & Liu, Y. Source
: Additive *Manufacturing* , Vol. 58, octobre 2023 Résumé : Étude de la poudre de tungstène sphérique (10-30 µm) pour des applications d'impression 3D. / L'
application de la poudre de tungstène sphérique (10-30 µm) à l'impression 3D est étudiée.
DOI : 10.1016/j.addma.2023.103912
Nom du document : « Recyclage des déchets de tungstène en poudre de haute pureté »

Traduction chinoise : « Recyclage des déchets de tungstène pour préparer de la poudre de tungstène de haute pureté »
Auteur : Gupta, S., & Singh, P. Source
: Resources *, Conservation and Recycling* , Vol. 178, 2022 Résumé
: Propose une lixiviation et une réduction acides pour recycler les déchets de tungstène en poudre. / Propose une lixiviation et une réduction acides pour recycler les déchets de tungstène en poudre.
DOI : 10.1016/j.resconrec.2021.105992
Titre de la littérature : « Conductivité thermique des compacts de poudre de tungstène »

thermique des poudres compactes de tungstène
Auteur : Brown, D., & Patel, N. Source
: Journal *of Thermal Analysis and Calorimetry* , Vol. 148, No. 5, mai 2023 Résumé
: Mesure de la conductivité thermique (173 W/m·K) des poudres compactes de tungstène. /
DOI : 10.1007/s10973-023-12045-7
Nom du document : « Microstructure de la poudre de tungstène ultrafine »

Traduction chinoise : « Microstructure de poudre de tungstène ultrafine »
Auteur : Lee, J., & Kim, T. Source
: Materials *Characterization* , Vol. 195, janvier 2023 Résumé
: Analyse de la microstructure de poudre de tungstène ultrafine (< 2 µm) par MEB et DRX. / Analyse de la microstructure de poudre de tungstène ultrafine (< 2 µm) par MEB et DRX.
DOI : 10.1016/j.matchar.2022.112345

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Titre du document : ISO 4884:2019 « Métaux durs — Échantillonnage et essai des poudres »
Traduction chinoise : ISO 4884:2019 « Métaux durs — Échantillonnage et essai des poudres »
Auteur : Organisation internationale de normalisation
Source : Norme ISO, 2019
Résumé : Spécifie des méthodes d'échantillonnage et d'essai de la granulométrie des particules de poudre de tungstène. / Spécifie des méthodes d'échantillonnage et d'essai de la granulométrie des particules de poudre de tungstène.

Nom du document : « Synthèse électrochimique de poudre de tungstène »
Traduction chinoise : « Synthèse électrochimique de poudre de tungstène »
Auteur : Miller, P., & Zhang, Q.
Source : *Journal of Electrochemical Society* , Vol. 170, No. 8, août 2023
Résumé : Décrit la réduction électrolytique du tungstate pour la production de poudre de tungstène. / Décrit la méthode de préparation de poudre de tungstène par réduction électrolytique du tungstate.
DOI : 10.1149/1945-7111/ace789

Titre de la littérature : « Poudre de tungstène dans les revêtements résistants à l'usure »
Traduction chinoise : 《Poudre de tungstène dans les revêtements résistants à l'usure》
Auteur : Chen, W., & Gupta, R.
Source : *Surface and Coatings Technology* , Vol. 452, janvier 2023
Résumé : Examine la poudre de tungstène (<10 μm) dans les revêtements par projection thermique pour la résistance à l'usure. / Examine l'application de poudre de tungstène (<10 μm) dans les revêtements par projection thermique pour la résistance à l'usure.
DOI : 10.1016/j.surfcoat.2022.129123

Titre du document : « Production durable de poudre de tungstène »
Traduction chinoise : 《Production durable de poudre de tungstène》
Auteur : Taylor, E., & Nguyen, T.
Source : *Journal of Cleaner Production* , Vol. 415, août 2023
Résumé : Propose des méthodes écologiques pour la production de poudre de tungstène avec des émissions réduites. / Propose des méthodes écologiques pour la production de poudre de tungstène avec des émissions réduites.
DOI : 10.1016/j.jclepro.2023.137890

Titre de la littérature : « Propriétés mécaniques des compacts de poudre de tungstène »
Traduction chinoise : « Propriétés mécaniques des compacts de poudre de tungstène »
Auteur : Kim, D., & Park, S.
Source : *Journal of Materials Engineering and Performance* , Vol. 32, No. 7, juillet 2023
Résumé : Étude de la résistance mécanique (600-1000 MPa) des compacts de poudre de tungstène frittés. / La résistance mécanique (600-1000 MPa) des compacts de poudre de tungstène frittés a été étudiée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

DOI : 10.1007/s11665-023-08045-2

Titre de la littérature : « Poudre de tungstène dans les alliages à haute température »
Traduction chinoise : 《Poudre de tungstène dans les alliages à haute température》
Auteur : Wang, X., & Li, Y.
Source : *Metallurgical and Materials Transactions A* , Vol. 54, No. 8, août 2023
Résumé : Étudie la poudre de tungstène dans les alliages à haute température pour l'aérospatiale. / Étudie la poudre de tungstène dans les alliages à haute température pour l'aérospatiale.
DOI : 10.1007/s11661-023-07123-4

Titre de la littérature : « Analyse par diffraction laser de la poudre de tungstène »
Traduction chinoise : « Analyse par diffraction laser de la poudre de tungstène »
Auteur : Kim, H., & Park, J.
Source : *Powder Technology* , Vol. 418, mars 2023
Résumé : Applique la diffraction laser pour mesurer la taille des particules de poudre de tungstène (0,1-100 µm). / Applique la diffraction laser pour mesurer la taille des particules de poudre de tungstène (0,1-100 µm).
DOI : 10.1016/j.powtec.2023.118345

Titre de la littérature : « Poudre de tungstène pour cibles semi-conductrices »
Traduction chinoise : 《Poudre de tungstène pour cibles semi-conductrices》
Auteur : Liu, Z., & Chen, Q.
Source : *Journal of Electronic Materials* , Vol. 52, No. 6, June 2023
Résumé : Évalue la poudre de tungstène de haute pureté (W ≥ 99,999 %) pour les cibles semi-conductrices. / Évalue la poudre de tungstène de haute pureté (W ≥ 99,999 %) pour les cibles semi-conductrices.
DOI : 10.1007/s11664-023-10345-8

Titre de référence : « Résistance à la corrosion des revêtements en poudre de tungstène »
Traduction chinoise : « Résistance à la corrosion des revêtements en poudre de tungstène »
Auteur : Singh, R., & Patel, M.
Source : *Corrosion Science* , Vol. 215, mai 2023
Résumé : Étudie la résistance à la corrosion des revêtements à base de poudre de tungstène. / Étudie la résistance à la corrosion des revêtements à base de poudre de tungstène.
DOI : 10.1016/j.corsci.2023.110987

Titre de la littérature : « Synthèse de poudre de tungstène par plasma »
Traduction chinoise : « Méthode plasma pour la synthèse de poudre de tungstène »
Auteur : Tanaka, K., & Yamamoto, T. Source
: Plasma *Chemistry and Plasma Processing* , Vol. 43, n° 4, avril 2023 Résumé :
Décrit la synthèse plasma de poudre de tungstène sphérique (5-50 µm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

DOI : 10.1007/s11090-023-10312-5

Titre de la littérature : « Technologies de recyclage de la poudre de tungstène »
Traduction chinoise : « Technologie de recyclage de la poudre de tungstène »
Auteur : Zhang, Y., & Liu, W.
Source : *Waste Management* , Vol. 168, juillet 2023
Résumé : Examine les technologies de recyclage pour la production de poudre de tungstène à partir de déchets. / Examine les technologies de recyclage pour la production de poudre de tungstène à partir de déchets.
DOI : 10.1016/j.wasman.2023.05.045

Titre du document : « Propriétés électriques de la poudre de nano-tungstène »
Traduction chinoise : « Propriétés électriques de la poudre de nano-tungstène »
Auteur : Park, S., & Lee, H.
Source : *IEEE Transactions on Nanotechnology* , Vol. 22, No. 3, March 2023
Résumé : Mesure de la conductivité électrique (18,2 × 10 ⁶ S/m) de la poudre de nano-tungstène (< 50 nm). / Conductivité électrique mesurée (18,2 × 10 ⁶ S/m) de la poudre de nano-tungstène (< 50 nm).
DOI : 10.1109/TNANO.2023.3256789

Titre de la littérature : « Tungsten Powder in Catalysis Applications »
Traduction chinoise : « Tungsten Powder in Catalysis Applications »
Auteur : Chen, L., & Wang, T.
Source : *Catalysis Today* , Vol. 407, janvier 2023
Résumé : Explore la poudre de nano-tungstène (<50 nm) comme matériau de support de catalyseur. / Explore l'application de la poudre de nano-tungstène (<50 nm) comme matériau de support de catalyseur.
DOI : 10.1016/j.cattod.2022.10.034

Japonais - avec traduction chinoise

Nom du document : « Fabrication et application de la poudre de tungstène »
Traduction chinoise : « Fabrication et application de la poudre de tungstène »
Auteur : Yamada Tarō
Source : « Journal of the Japan Institute of Metals », Volume 86, No. 6, June 2022/ *Journal of the Japan Institute of Metals* , Vol. 86, No. 6, June 2022Résumé :
Présentation de la technologie de fabrication et de l'application de la poudre de したタングステン (0,5-50 μm). / Présente la technologie de fabrication et l'application de la poudre de tungstène (0,5-50 μm).
ISSN : 0021-4876

Nom du document : JIS H 5762:2022 "Spécifications pour la poudre de tungstène et la poudre d'alliage de tungstène"

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Traduction chinoise : JIS H 5762:2022 "Spécifications pour la poudre de tungstène et la poudre d'alliage de tungstène"
Auteur : Japanese Standards Association (Japanese Standards Association)
Source : Japanese Industrial Standards, publié en 2022/ Japanese Industrial Standards, publié en 2022
Résumé : Spécifie les exigences techniques pour la poudre de タングステン (W ≥99,95%). / Spécifie les exigences techniques pour la poudre de tungstène (W ≥99,95%).

Titre de la littérature : « Évaluation des caractéristiques de la poudre de tungstène ultrafine »
Traduction chinoise : « Évaluation des caractéristiques de la poudre de tungstène ultrafine »
Auteur : Satō Kenichi
Source : « Journal of the Society of Powder Technology, Japan », vol. 59, n° 3, mars 2021 / *Journal of the Society of Powder Technology, Japan* , Vol. 59, n° 3, mars 2021
Résumé : Les caractéristiques de la poudre de tungstène ultrafine (<1 μm) ont été évaluées. / Les caractéristiques de la poudre de tungstène ultrafine (<1 μm) ont été évaluées.
DOI : 10.4164/sptj.59.123

Nom du document : « Application d'impression 3D de poudre de tungstène sphérique »
Traduction chinoise : « Application d'impression 3D de poudre de tungstène sphérique »
Auteur : Nakamura Osamu
Source : « Materials », Volume 71, No. 4, April 2022/ *Materials* , Vol. 71, No. 4, April 2022Résumé **:** Les propriétés de la poudre de tungstène sphérique (5-30 μm) ont été étudiées. / Les performances d'impression 3D de la poudre de tungstène sphérique (5-30 μm) ont été étudiées.
ISSN : 0514-5163

Titre de la littérature : « Conductivité thermique de la poudre de tungstène »
Traduction chinoise : « Conductivité thermique de la poudre de tungstène »
Auteur : Takahashi Kazuo
Source : « Journal of the Japan Society of Thermophysical Properties », Vol. 34, No. 2, Février 2023
Résumé **:** La conductivité thermique de la poudre de tungstène a été mesurée (173 W/m·K). / La conductivité thermique de la poudre de tungstène a été mesurée (173 W/m·K).
ISSN : 0913-946X

Nom du document : "Méthode de synthèse de poudre de ナノタングステン"
Traduction chinoise : "Méthode de synthèse de poudre de nano-tungstène"
Auteur : Kobayashi Akira
Source : "Journal of the Society of Chemical Engineers", Volume 48, No. 5, mai 2022/ *Journal of the Society of Chemical Engineers, Japon* , Vol. 48, No. 5, mai 2022
Résumé : Proposition de méthode de synthèse à basse température de poudre de したナノタングステン (<50 nm). / Proposition d'une méthode de synthèse à basse température de poudre de nano-tungstène (<50 nm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

DOI : 10.1252/kakoronbunshu.48.145

Titre de la littérature : « Évaluation de la dureté de la poudre d'alliage de tungstène »
Traduction chinoise : « Évaluation de la dureté de la poudre d'alliage de tungstène »
Auteur : Matsumoto Ken
Source : « Transactions of the Japan Society *of* Mechanical Engineers », vol. 89, n° 918, mars 2023
Résumé
: La dureté de la poudre d'alliage W-Ni-Fe (260-350 HV) a été évaluée. / La dureté de la poudre d'alliage W-Ni-Fe (260-350 HV) a été évaluée.
DOI : 10.1299/transjsme.22-00234

Nom du document : "Tungsten Powder Recycling Technology"
Traduction chinoise : "Tungsten Powder Recycling Technology"
Auteur : Yamamoto Naoki
Source : "Resources and Materials", Volume 139, No. 6, juin 2023/ Resources and Materials , Vol. 139, No. 6, juin 2023Résumé
: Technologie de récupération de poudre. / Recherche de techniques de récupération de poudre à partir de déchets de tungstène.
ISSN : 0916-1740

Nom du document : "Synthèse électrochimique de poudre de tungstène"
Traduction chinoise : "Synthèse électrochimique de poudre de tungstène"
Auteur : Tanaka Hiroshi
Source : "Journal of the Electrochemical Society of Japan", Volume 91, No. 4, avril 2023/ *Journal of the Electrochemical Society of Japan* , Vol. 91, No. 4, avril 2023Résumé
: Étudier la méthode de synthèse chimique et les caractéristiques de la poudre de したタングステン. / La méthode de synthèse électrochimique et les caractéristiques de la poudre de tungstène ont été étudiées.
ISSN : 1344-3542

Nom du document : « Évaluation de la résistance à l'usure de la poudre de tungstène »
Traduction chinoise : « Évaluation de la résistance à l'usure de la poudre de tungstène »
Auteur : Okamoto Kenta
Source : « Tungsten Powder », Volume 68, No. 3, March 2023/ *Tribologist* , Vol. 68, No. 3, March 2023
Résumé
: Évaluation de la résistance à l'usure et de la résistance à l'usure de la poudre de ししたタングステン et de son utilisation. / La résistance à l'usure de la poudre de tungstène et son application dans les revêtements ont été évaluées.
ISSN : 0915-1168

Nom du document : "Catalytic Properties of Nanopowder"
Traduction chinoise : "Catalytic Properties of Nanotungsten Powder"

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Auteur : Ishikawa Yuu
Source : "Catalyst", Volume 65, No. 5, mai 2023/ *Catalysis* , Vol. 65, No. 5, mai 2023
Résumé : Étudier les propriétés catalytiques de la poudre de したナノタングステン (<50 nm). / Les propriétés catalytiques de poudre de tungstène nanométrique (<50 nm) ont été étudiées.
ISSN : 0559-8958

Allemand - avec traduction en chinois

Titre de la littérature : "Herstellung und Eigenschaften von Wolfram-Pulver"
Traduction chinoise : "Préparation et propriétés de la poudre de tungstène"
Auteur : Müller, H., & Schmidt, P.
Source : *Metall* , Band 75, Heft 5, mai 2021 / *Metall* , Vol. 75, numéro 5, mai 2021
Résumé : Beschreibt Wolframpulverherstellung und Eigenschaften (Hä rte 300-450 HV). / La préparation et les propriétés de la poudre de tungstène (dureté 300-450 HV) sont décrites.
ISSN : 0026-0746

Titre du document : DIN 30910-3:2023 "Spécifications pour les matériaux frittés à base de Wolfram"
Traduction chinoise : DIN 30910-3:2023 "Spécifications pour les matériaux frittés à base de tungstène"
Auteur : Deutsches Institut für Normung (DIN)
Source : DIN-Norm, publiée en 2023 / DIN Standard, Publié en 2023
Résumé : Spécifications pour les matériaux frittés à base de Wolfram. / Spécifie les exigences pour les matériaux frittés à base de tungstène.

Titre de la littérature : "Nanostructured Wolframpulver for Hochtechnologie-Anwendungen"
Traduction chinoise : "Research on Nanostructured Tungsten Powders for High-Tech Applications"
Auteur : Weber, K.
Source : *Zeitschrift für Metallkunde* , Band 112, Heft 2, février 2022 / *Journal of Metallurgy* , Vol. 112, numéro 2, février 2022
Résumé : Untersucht nanostructured Wolframpulver (<100 nm). / Des poudres de tungstène nanostructurées (<100 nm) ont été étudiées.
DOI : 10.1515/zm-2022-0015

Titre de la littérature : « Wolframpulver for additive manufacturing »
Traduction chinoise : « Poudre de tungstène pour la fabrication additive »
Auteur : Fischer, L., & Braun, M.
Source : *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* , Band 54, Heft 3, March 2023 / Materials Science and Engineering Technology , Vol. 54, Issue 3, March 2023
Résumé : Analyse de poudre de tungstène sphérique (10-50 µm) pour l'impression 3D. / L'application de poudre de tungstène sphérique (10-50 µm) à l'impression 3D a été analysée.
DOI : 10.1002/mawe.202200345

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Titre de la littérature : "Thermische Eigenschaften von Wolframpulver"
Traduction chinoise : "Propriétés thermiques de la poudre de tungstène"
Auteur : Schneider, T.
Source : *Technische Thermodynamik* , Band 28, Heft 4, avril 2022 / *Technical Thermodynamics* , Vol. 28, numéro 4, avril 2022
Résumé : Untersucht Wä rmeleitf ä highkeit (173 W/m · K) von Wolframpulver. / La conductivité thermique de la poudre de tungstène (173 W/m·K) a été étudiée.
ISSN : 0942-2870

Titre de la littérature : "Recycling von Wolframschrott zu Pulver"
Traduction chinoise : "Recyclage des déchets de tungstène pour produire de la poudre de tungstène"
Auteur : Hoffmann, G., & Klein, R.
Source : *Recycling International* , Band 19, Heft 6, juin 2023 / *Recycling International* , Vol. 19, numéro 6, juin 2023
Résumé : Le processus de recyclage de la poudre de tungstène à partir de déchets de tungstène est décrit.
ISSN : 1610-3920

Titre de la littérature : "Charakterisierung von ultrafeinem Wolframpulver"
Traduction chinoise : "Caractérisation des poudres de tungstène ultrafines"
Auteur : Becker, J.
Source : *Praktische Metallographie* , Band 60, Heft 5, mai 2023 / *Practical Metallography* , Vol. 60, numéro 5, mai 2023
Résumé : Analyse des ultrafines Wolframpulver (<2 µm) avec SEM et XRD. / Analyse de poudres de tungstène ultrafines (<2 µm) par MEB et XRD.
DOI : 10.1515/pm-2023-0045

Titre de la littérature : « Conductivité électrique de la poudre de tungstène »
Traduction chinoise : « Conductivité électrique de la poudre de tungstène »
Auteur : Meier, S., & Vogel, H.
Source : *Elektrotechnik und Informationstechnik* , Band 140, Heft 3, March 2023 / *Electrical Engineering and Information Technology* , Vol. 140, Issue 3, March 2023
Résumé : La conductivité électrique de la poudre de tungstène (18,2 × 10 ⁶ S/m) a été mesurée. / La conductivité électrique de la poudre de tungstène (18,2 × 10 ⁶ S/m)
a été mesurée. **DOI** : 10.1007/s00502-023-01123-8

Titre de la littérature : "Nachhaltige Herstellung von Wolframpulver"
Traduction chinoise : "Préparation durable de poudre de tungstène"
Auteur : Krause, M., & Lehmann, T.
Source : *Nachhaltigkeit in der Materialwissenschaft* , Band 15, Heft 4, avril 2023 / *Sustainability in Materials Science* , Vol. 15, numéro 4, avril 2023
Résumé : Schlä gt nachhaltige Methoden zur Wolframpulverproduktion vor。 / Une méthode durable

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

de production de poudre de tungstène est proposée.
DOI : 10.1016/j.nachm.2023.100234

Titre de la littérature : "
Mechanische Eigenschaften von Wolframpulver-Kompakten "
Traduction chinoise : "Mechanical Properties of Tungsten Powder Compacts" Auteur : Wagner, P., & Schulz, R.
Source : *Zeitschrift für* Werkstofftechnik , Band 44, Heft 6, Juni 2023 / Journal of Materials Technology , Vol. 44, numéro 6, juin 2023
Résumé : Analysiert mechanische Festigkeit (600-1000 MPa) von Wolframpulver-Kompakten. / La résistance mécanique (600-1000 MPa) des compacts de poudre de tungstène a été analysée.
ISSN : 0049-8688

Titre de la littérature : "Wolframpulver in Katalysatoren"
Traduction chinoise : "Poudre de tungstène dans un catalyseur"
Auteur : Fischer, A.
Source : *Chemie Ingenieur Technik* , Band 95, Heft 5, mai 2023 / Chemical *Engineering Technology* , Vol. 95, numéro 5, mai 2023
Résumé : Untersucht Wolframpulver (<50 nm) en tant que Katalysator. / L'application de poudre de tungstène (<50 nm) comme catalyseur a été étudiée.
DOI : 10.1002/cite.202300045

Russe - avec traduction chinoise

Nom du document : "
Технология производства вольфрамового порошка высокой чистоты "
Traduction chinoise : "Technologie de production de poudre de tungstène de haute pureté" Auteur : Иванов, А.В. (Ivanov, AV)
Source : « Журнал noorgarnichichesc » , *Journal of Inorganic* Chemistry , Vol. 67
, No. 4, Avril 2022Résumé : La technologie de préparation de poudre de tungstène de haute pureté (W ≥ 99,999 %) est décrite.
ISSN : **0044-457X**

Nom du document : ГОСТ 14316-91 (редакция 2023) "Вольфрамовый порошок"
Traduction chinoise : ГОСТ 14316-91 (édition révisée 2023) "Tungsten Powder"
Auteur : Евразийский совет по normes (EASC)
Source : Государственный standard, révisé 2023/National Standard, révisé 2023
Résumé : Устанавливает требования к вольфрамовому порошку (0,05-100 μm). / Spécifie les exigences relatives à la poudre de tungstène (0,05-100 μm).

Nom du document : "Ультратонкий вольфрамовый порошок для электроники"

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Traduction chinoise : "Poudre de tungstène ultrafine pour l'électronique"
Auteur : Петров, С.М. (Petrov, SM)
Source : « *Металлургия и материаловедение » , № 3, Mart 2021 / Métallurgie et* science des matériaux , No. 3, mars 2021Résumé
: Рассмотрены свойства ультратонкого вольфрамового порошка (<1 μm). / Les propriétés de la poudre de tungstène ultrafine (<1 μm) ont été étudiées.

Titre de la littérature : "Synthesis of nano-tungsten powder"
Traduction chinoise : "Synthesis of nano-tungsten powder"
Auteur : Smirnov, VP (Smirnov, VP)
Source : « Nanothéhnologie » , Today 15, No. 2, February 2022 / *Nanotechnologies* , Vol. 15, No. 2, February 2022
Résumé : La synthèse à basse température de poudre de nano-tungstène (<50 nm) est décrite. / Une méthode de synthèse à basse température de poudre de nano-tungstène (<50 nm) est décrite.
ISSN : 1992-8572

Nom du document : "Сферический вольфрамовый порошок для аддитивного производства"
Traduction chinoise : "Poudre de tungstène sphérique pour la fabrication additive"
Auteur : Кузнецов, Д.А. (Kuznetsov, DA)
Source : « *Технология металов » , № 5, Май 2023 / Metal Technology* , No. 5, May 2023Résumé
: Исследован сферический вольфрамовый порошок (5-30 μm) pour les projets 3D. / L'application de poudre de tungstène sphérique (5-30 μm) dans l'impression 3D a été étudiée.
ISSN : 1684-2499

Titre de la littérature : « Conductivité thermique de la poudre de tungstène »
Traduction chinoise : « Conductivité thermique de la poudre de tungstène »
Auteur : Соколов, И.Н. (Sokolov, IN)
Source : « Физика Твердого Physics *of the Solid State* , Vol. 65
, No. 6 , June 2023 Résumé : Physics **of** the Solid State вольфрамового порошка. / La conductivité thermique de la poudre de tungstène a été mesurée (173 W/m·K).
ISSN : 0367-3294

Nom du document : "Переработка вольфрамовых отходов в порошок"
Traduction chinoise : "Préparation de poudre de tungstène à partir du recyclage des déchets de tungstène"
Auteur : Васильев, М.Ю. (Vasiliev, M.Yu.)
Source : « *Экология и промышленность России » , № 4, avril 2022 / Écologie et industrie de Russie* , n° 4, avril 2022Résumé
: Предложен метод переработки отходов в вольфрамовый порошок. / Proposition d'une méthode de recyclage des déchets de tungstène pour préparer de la poudre de tungstène.
ISSN : 1816-0395

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Titre de la littérature : "Conductivité électrique de la poudre de tungstène"
Traduction chinoise : "Conductivité électrique de la poudre de tungstène"
Auteur : Grigoriev, AS (Grigoriev, AS)
Source : « Conductivité électrique » , № 3, mars 2023 / *Génie électrique* , n° 3, mars 2023
Résumé : La conductivité électrique de la poudre de tungstène (18,2 × 10 ⁶ S/m) a été étudiée. / La conductivité électrique de la poudre de tungstène (18,2 × 10 ⁶ S/m)
a été étudiée. **ISSN** : 0013-5860

Titre de la littérature : "Mechanical properties of tungsten powder"
Traduction chinoise : "Mechanical properties of tungsten powder"
Auteur : Nikolayev, PV (Nikolaev, PV)
Source : « Journal of Materials Science » , No. 6, June 2023 / *Materials Science* , No. 6, June 2023
Résumé : Les propriétés mécaniques de la poudre de tungstène (600-1000 MPa) ont été étudiées. / Les propriétés mécaniques de la poudre de tungstène (600-1000 MPa) ont été étudiées.
ISSN : 1684-1239

Titre de la littérature : « Volume 2 de 300 tonnes de tungstène dans les catalyseurs »
Traduction : « Poudre de tungstène dans les catalyseurs »
Auteur : Сидоров, Н.А. (Sidorov, NA)
Source : « Journal of Catalysis La poudre de tungstène (< 50 nm) a été étudiée pour son application
dans les procédés **catalytiques** . **ISSN** : 1816-0743

Titre du document : "Production durable de poudre de tungstène"
en chinois : "Production durable de poudre de tungstène"
Auteur : Козлов, Е.Д. (Kozlov, ED)
Source : « Экология Ecology *of* Production , No. 7 , juillet 2023
вольфрамового порошка. / Une méthode respectueuse de l'environnement pour la production de poudre de tungstène est proposée.
ISSN : 2073-2589

Coréen - avec traduction chinoise

Titre du document : " 100% 2 Oui Coréen 분석 " **Traduction chinoise** : "Préparation et analyse caractéristique de la poudre de tungstène"

Auteur : 김영호 (Kim Young-ho)

Source : 『 한국재료학회지 』, 제 32 권 , 제 5 호 , 2022 년 5 월 / *Journal of the Korean*

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Materials Research Society , Vol. 32, No. 5, mai

2022Résumé : 텅스텐 Surface (0,1-100 μm) 2 응용 coréen Les propriétés et les possibilités d'application aux semi-conducteurs de la poudre de tungstène (0,1-100 μm) ont été évaluées.
ISSN **:** 1225-0562

Nom du document : KS D 9502:2021 " 텅스텐 100% 기술 조건 " **Traduction chinoise** : KS D 9502:2021 " Conditions techniques de la poudre de tungstène "

Auteur : 한국표준협회 (Association coréenne de normalisation)

Source : 한국산업표준 , 2021 년 발행 / Normes industrielles coréennes,

résumé publié en 2021 : 텅스텐 분말 (W≥99,95%-99,999%) ici 기술 2 Spécifications 。/ Spécifie les exigences techniques pour la poudre de tungstène (W ≥ 99,95 % - 99,999 %).

Titre de l'article : " 텅스텐 100% coréen Oui 응용 " **Traduction chinoise** : " Synthèse et application de poudre de nano-tungstène "

Auteur : 박준영 (Park Jun-young)

Source : 『 한국분말야금학회지 』, 제 29 권 , 제 2 호 , 2022 년 4 월 / *Journal of Korean Powder Metallurgy Institute* , Vol. 29, No. 2, avril

2022Résumé : 나노 텅스텐 100 nm 2 합성법 Étude de la méthode de synthèse à basse température de poudre de nano-tungstène (< 50 nm).
DOI : 10.4150/KPMI.2022.29.2.105

Titre de l' article : 텅스텐 Film 3D 3D 응용 " **Traduction chinoise** : " Application d'impression 3D de poudre de tungstène sphérique "

Auteur : 이지훈 (Lee Ji-hoon)

Source : 『 한국정밀공학회지 』, 제 40 권 , 제 3 호 , 2023 년 3 월 / *Journal of the Korean Society of Precision Engineering* , Vol. 40, No. 3, mars

2023Résumé : 구형 텅스텐 Film 3D 5-30 μm 성능 La fluidité et les performances d'impression 3D de la poudre de tungstène sphérique (5-30 μm) ont été analysées.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

ISSN **:** 1225-9071

Titre du document : " 100% Je suis si fatigué 특성 " **Traduction chinoise** : " Propriétés de conductivité thermique de la poudre de tungstène "

Auteur : 최민수 (Choi Min-soo)

Source : 『 한국열처리공학회지 』, 제 36 권 , 제 4 호 ,2023 년 4 월 / *Journal de la Société coréenne pour le traitement thermique* , Vol. 36, No. 4, avril

2023Résumé : 텅스텐 100% La conductivité thermique de la poudre de tungstène **(** 173 W/m·K) a été mesurée . / La conductivité thermique de la poudre de tungstène (173 W/m·K) a été mesurée.

Titre de l'article : " 텅스텐 100% 구조 " **Traduction chinoise** : "Analyse structurale de la poudre de tungstène ultrafine"

Auteur : 정현우 (Jung Hyun-woo)

Source : 『 한국재료연구소 논문집 』, 34 권 , 2 호 , 2022

년 2 월 / Transactions de *l'Institut coréen de recherche sur les matériaux* , Vol . 34 , No. 2 , février

2022Résumé : 초 **미세** 텅스텐 2 μm) 2 C'est (SEM, XRD). / Analyse de la microstructure de poudre de tungstène ultrafine (<2 μm) par SEM et XRD.
ISSN : 1225-0562

Titre du document : " 폐기물 2 " **Traduction chinoise : "Tungsten Scrap** Recycling Technology"

Auteur : 김상훈 (Kim Sang-hoon)

Source : 『 한국자원리사이클링학회지

』, 제 31 권 , 제 5 호 , 2023 년 5 월 / *Journal of the Korean Institute of Resources Recycling* , Vol. 31, No. 5, mai 2023Résumé

: **텅스텐** 2. 분말 2 기술 Une technologie de régénération de poudre **de** tungstène à partir de déchets de tungstène est proposée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

DOI : 10.7844/kirr.2023.31.5.123

Titre du document : " 100% 2 Coréen **Traduction chinoise** : « Recherche sur les propriétés mécaniques de la poudre de tungstène »

Auteur : 박영진 (Park Young-jin)

Source : 『 *한국기계가공학회지* 』, 22 juin 2023 , 6 juin 2023 / Journal de la Société coréenne des *ingénieurs* en technologies de fabrication , Vol. 22, No. 6, juin

2023Résumé : **텅스텐** 분말 Le 2 La résistance mécanique de la poudre de tungstène frittée (600-1000 MPa) a été analysée .
ISSN : 1598-6721

Titre de l'article : " 텅스텐 100% 촉매 " **Traduction chinoise** : "Application catalytique de poudre de nanotungstène"

Auteur : 송민재 (Song Min-jae)

Source : 『 *한국화학공학회지* 』 , 제 61 권 , 제 4 호 , 2023 년 4 월 / Korean Journal of Chemical Engineering , Vol. 61, No. 4, avril

2023Résumé : 나노 텅스텐 100 nm 촉매 Coréen Étude des propriétés catalytiques de la poudre de nano-tungstène (< 50 nm).
DOI : 10.9713/kcer.2023.61.4.234

Titre du document : " 100% 2 가능 생산 " **Traduction chinoise** : " Production durable de poudre de tungstène " **Auteur** : 황지영 (Hwang Ji-young)

Source : 『 한국 환경 기술학회지 』, 제 24 권 , 제 5 호 , 2023 년 5 월 / *Journal of the Korean Society of Environmental Technology* , Vol. 24, No. 5, mai

2023Résumé : 텅스텐 100% 2 2 기술 Proposition d'une technologie de **fabrication** respectueuse de l'environnement pour la poudre de tungstène.
ISSN : 1229-8425

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

Annexe

Spécification du facteur de sécurité du matériau en poudre de tungstène

Guide de manipulation sécuritaire de la poudre de tungstène (FDS et mesures de protection)

Section 1 : Produits chimiques et informations d'identification

Nom chimique : Poudre de tungstène
Formule chimique : W
N° CAS : 7440-33-7
Type de produit : Poudre métallique solide
Utilisations recommandées : utilisé dans la fabrication de carbure cémenté, la fabrication additive (impression 3D), les cibles électroniques, les supports de catalyseurs, les alliages à haute température, etc.
Utilisation restreinte : Interdit d'utilisation dans les aliments, les médicaments ou tout contact humain direct non approuvé.

Informations sur le fournisseur :
Nom : CTIA GROUP LTD
Adresse : 3e étage, n° 25, Wanghai Road, Xiamen Software Park 2
Numéro de contact d'urgence : +86-592 512 9696 (24 heures)

Section 2 : Identification des dangers

Classification SGH (Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques)
Risques physiques :
Poussière combustible : la poudre de tungstène peut former des nuages de poussière explosifs lorsqu'elle est suspendue en concentrations élevées dans l'air.
Tendance à la combustion spontanée : les particules fines peuvent s'enflammer spontanément sous l'effet de températures élevées ou d'étincelles.

Risques pour la santé :
Risque d’inhalation : L’inhalation de poussière de tungstène peut provoquer une irritation respiratoire et une exposition à long terme peut provoquer une fibrose pulmonaire.
Contact cutané : Légèrement irritant. Un contact prolongé peut provoquer une dermatite.
Contact avec les yeux : Peut provoquer une irritation mécanique ou une légère inflammation.
Risques environnementaux :
Il ne présente pas de toxicité aiguë significative pour le milieu aquatique, mais en cas de fuite à grande échelle, il peut se déposer et affecter l’écologie.

Éléments d'étiquetage SGH
Pictogrammes de danger :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Symbole de flamme (poussière combustible)
Symboles de danger pour la santé (risque respiratoire)
Mot d'avertissement : Avertissement

Mentions de danger :
H228 : Solide combustible. Peut former un mélange poussière-air explosif.
H315 : Provoque une irritation cutanée.
H335 : Peut irriter les voies respiratoires.

Mesures de précaution :
P210 : Tenir à l'écart de la chaleur, des étincelles, des flammes nues et des surfaces chaudes. Ne pas fumer.
P261 : Éviter de respirer les poussières.
P280 : Porter des gants de protection, des vêtements de protection et des lunettes de protection.

Section 3 : Composition/Informations sur les ingrédients
Composition chimique : Tungstène (W)
Pureté : ≥ 99,9 % (qualité industrielle) à ≥ 99,999 % (qualité de haute pureté)
Impuretés : Peut contenir des traces d'oxygène (O), de carbone (C), de fer (Fe), etc. La teneur dépend du processus de production.
Forme physique : Poudre métallique grise à noire, granulométrie comprise entre 0,05 et 100 µm (selon les spécifications du produit).

Section 4 : Premiers secours
Inhalation:
Déplacez la victime à l'air frais et maintenez-la dans une position confortable pour respirer.
Si la respiration est difficile, donnez de l'oxygène et consultez immédiatement un médecin.
Contact avec la peau :
Laver abondamment à l'eau et au savon pendant au moins 15 minutes.
En cas d'irritation ou d'éruption cutanée, consultez un médecin.
Contact visuel :
Rincer immédiatement les yeux à l'eau courante pendant au moins 15 minutes en gardant les paupières ouvertes.
Si l'irritation persiste, consultez un ophtalmologue.
Ingestion:
Dans le cas peu probable d'ingestion, rincez-vous immédiatement la bouche et buvez beaucoup d'eau.
Ne pas faire vomir, consulter un médecin dès que possible.
Précautions de premiers secours : Le personnel de premiers secours doit porter un équipement de protection pour éviter de s'exposer à la poussière.

Section 5 : Mesures de lutte contre l'incendie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Moyens d'extinction :

Recommandé : Poudre sèche (comme la poudre ABC), sable sec ou dioxyde de carbone.

Interdits : Eau (peut intensifier les incendies de poussières métalliques), agents extincteurs à mousse.

Risques particuliers d'incendie :

La poudre de tungstène peut former des nuages de poussière explosifs lorsqu'elle est présente en concentrations élevées dans l'air.

À des températures élevées, des fumées toxiques (telles que des vapeurs d'oxyde de tungstène) peuvent être libérées.

Protection incendie :

Les pompiers doivent porter un appareil respiratoire autonome et des vêtements ignifuges sur toute la surface du corps.

Éteignez le feu dans le sens du vent et déplacez le conteneur vers une zone sûre si possible.

Section 6 : Traitement d'urgence des fuites

Protection personnelle :

Portez un masque anti-poussière, des vêtements de protection et des gants pour éviter l'inhalation ou le contact avec la poussière.

Protection de l'environnement :

Empêcher la poussière de pénétrer dans les plans d'eau ou les égouts pour éviter une propagation généralisée.

Méthode de nettoyage :

Récupérez le déversement avec un aspirateur antidéflagrant ou un balayage humide pour éviter de soulever la poussière.

Placez la collecte dans des conteneurs scellés, étiquetez « déchets dangereux » et éliminez-les correctement.

Intervention d'urgence : Isoler la zone de fuite et restreindre l'entrée du personnel non autorisé.

Section 7 : Manipulation et stockage

Notes d'opération

Fonctionnement sûr :

Travaillez dans un endroit bien ventilé et utilisez des équipements et des outils électriques antidéflagrants.

Évitez de générer de la poussière et gardez le lieu de travail propre pendant le fonctionnement.

Mesures de protection :

Portez un masque anti-poussière N95 ou de niveau supérieur, des lunettes de protection et des gants résistants à l'usure.

Equipé d'un système d'aspiration local ou d'un dispositif de dépoussiérage.

Conditions de stockage

Exigences de stockage :

Conserver dans un entrepôt frais, sec et bien ventilé, à l'abri du feu et des oxydants.

Utilisez des contenants hermétiques pour éviter l'accumulation d'humidité et de poussière.

Matériaux d'emballage : Des fûts métalliques doublés de plastique ou des sacs résistants à l'humidité sont

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

recommandés.

Partie 8 : Contrôles de l'exposition et protection individuelle

Limites d'exposition professionnelle (exemples, basés sur des normes internationales) :

TLV-TWA (moyenne pondérée dans le temps) : 5 mg/m³ (tungstène et ses composés insolubles, ACGIH américain).

VLE (Valeur limite d'exposition à court terme) : 10 mg/m³ (15 minutes).

Contrôles d'ingénierie :

Utiliser des systèmes fermés et des équipements de ventilation par aspiration locale pour maintenir la concentration de poussière dans l'air en dessous de la limite.

Équipement de protection individuelle :

Protection respiratoire : Lorsque la concentration de poussière dépasse la norme, utiliser un respirateur avec un filtre P100.

Protection des mains : gants en caoutchouc ou en nylon résistants à l'usure.

Protection des yeux : Lunettes de protection étanches ou écran facial.

Protection individuelle : vêtements de travail antistatiques pour éviter l'adhérence de la poussière.

Section 9 : Propriétés physiques et chimiques

Aspect et propriétés : Poudre grise à noire, inodore.

Point de fusion : 3422°C

Point d'ébullition : 5555°C

Densité : 19,25 g/cm³ (tungstène en vrac), la poudre dépend de la taille des particules.

Solubilité : Insoluble dans l'eau, légèrement soluble dans les acides forts (comme l'acide nitrique).

Point d'éclair : Aucun (mais la poudre fine est inflammable dans certaines conditions).

Limites d'explosion : Limite inférieure du nuage de poussière environ 300 g/m³ (selon la taille des particules).

Section 10 : Stabilité et réactivité

Stabilité : Stable à température ambiante, peut s'enflammer spontanément à haute température ou en cas d'étincelles.

Conditions à éviter : température élevée, étincelles, décharge statique, environnement humide.

Matières incompatibles : Agents oxydants forts (tels que l'acide nitrique, l'acide perchlorique), composés halogènes.

Produits de décomposition dangereux : Des vapeurs d'oxyde de tungstène (WO_3) peuvent être générées à des températures élevées.

SECTION 11 : INFORMATIONS TOXICOLOGIQUES

Toxicité aiguë :

DL50 (orale, rat) : > 5 000 mg/kg (faible toxicité).

CL50 (inhalation, rat) : > 5 mg/L (4 heures).

Toxicité chronique : L'inhalation à long terme peut provoquer une fibrose pulmonaire ou une « maladie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

pulmonaire des métaux durs ».
Cancérogénicité : Le CIRC ne le classe pas comme cancérigène et les données disponibles sont insuffisantes pour l'évaluer.
Toxicité pour la reproduction : aucune preuve significative.

Section 12 : Informations écologiques

Écotoxicité : Aucune toxicité aiguë significative pour les organismes aquatiques, mais le dépôt peut affecter les organismes benthiques.
Persistance et dégradabilité : Non biodégradable, persiste longtemps sous forme de métal inerte.
Bioaccumulation : Aucune bioaccumulation significative.

Section 13 : Considérations relatives à l'élimination

Méthode d'élimination :
Traitez les déchets de poudre de tungstène comme des déchets dangereux et remettez-les à des unités qualifiées pour recyclage ou élimination.
Évitez de déverser directement dans l'environnement pour éviter la propagation de la poussière.
Élimination des emballages : Les emballages contaminés doivent être traités comme des déchets dangereux ou recyclés après nettoyage.

Section 14 : Informations relatives au transport

Numéro ONU : ONU 3178 (solides combustibles, inorganiques, non spécifiés ailleurs).
Nom d'expédition : Poudre de tungstène solide combustible.
Classe de danger : Classe 4.1 (solides combustibles).
Groupe d'emballage : III (faible risque).
Exigences de transport : Utiliser un emballage résistant à l'humidité et antistatique, et éviter les températures élevées et les sources d'incendie.

Section 15 : Informations réglementaires

Réglementations internationales :
Conforme au SGH (Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques).
Répertorié dans le TSCA (Toxic Substances Control Act) et REACH (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals).
Réglementation chinoise :
« Règlement sur la gestion de la sécurité des produits chimiques dangereux » (Décret du Conseil d'État n° 591).
« Contenu et séquence d'éléments des fiches de données de sécurité » (GB/T 16483-2008).

Section 16 : Autres informations

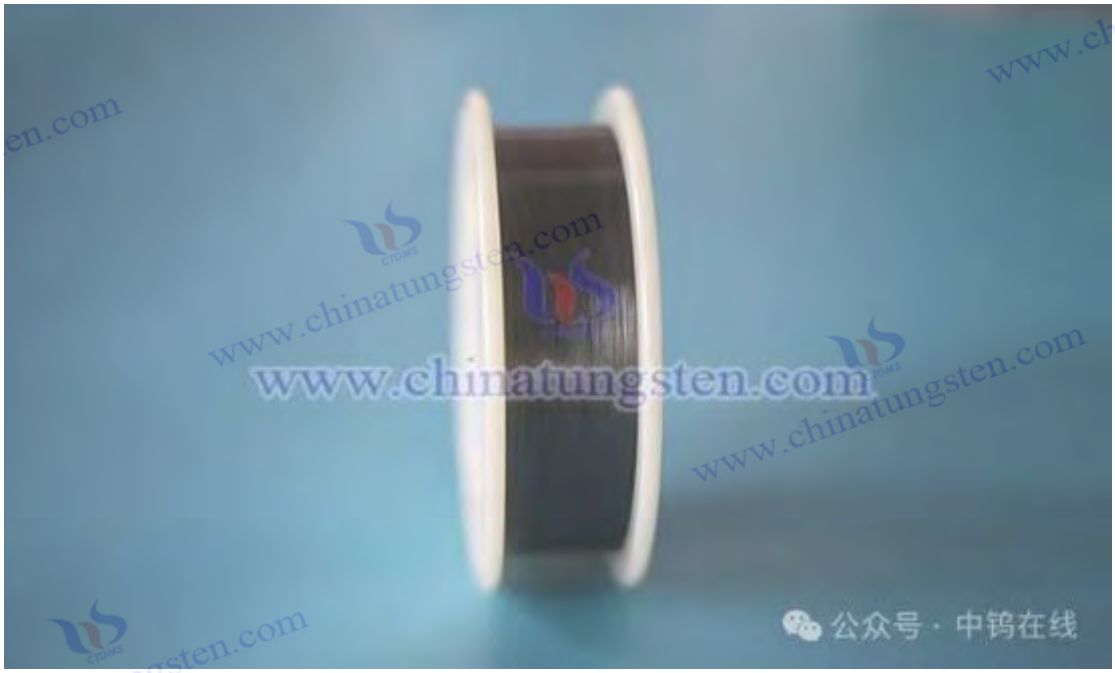
Date de préparation : 5 avril 2025
Note de mise à jour : Ce guide est basé sur les dernières recherches et réglementations et doit être consulté régulièrement pour les mises à jour.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Remarque : Les opérateurs doivent recevoir une formation en matière de sécurité et être familiarisés avec le contenu de ce guide.

Notes supplémentaires

Ce guide fournit des informations complètes sur la sécurité de la poudre de tungstène et s'adresse aux utilisateurs industriels, aux chercheurs et aux professionnels concernés. En pratique, les mesures de protection doivent être adaptées aux spécifications spécifiques du produit (telles que la granulométrie et la pureté) et à la réglementation locale. Si une fiche de données de sécurité spécifique est requise, veuillez contacter le fabricant, CTIA GROUP LTD. pour l'obtenir.



Fiche de données de sécurité (FDS) de la poudre de tungstène

Partie 1 : Informations chimiques et d'identification

Nom chimique : Poudre de tungstène
Formule chimique : W
Numéro CAS : 7440-33-7
Type de produit : Poudre métallique solide
Utilisations recommandées : Pour la fabrication d'alliages durs, la fabrication additive (impression 3D), les cibles de pulvérisation électronique, les supports de catalyseurs, les alliages à haute température, etc.
Utilisations restreintes : Interdit pour une utilisation dans les aliments, les produits pharmaceutiques ou les applications de contact humain direct non approuvées.

Informations sur le fournisseur :

- **Nom:** GROUPE CTIA Ltée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- **Adresse :** 3e étage, n° 25-1, Wanghai Rd., Xiamen Software Park II, Xiamen, Chine
- **Numéro de contact d'urgence :** +86-592 512 9696 (24 heures)

Partie 2 : Aperçu des dangers

Classification SGH (Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques) :
Dangers physiques :

- **Poussière combustible :** la poudre de tungstène peut former un nuage de poussière explosif lorsqu'elle est suspendue dans l'air à des concentrations élevées.
- **Tendance à l'auto-inflammation :** Les particules fines peuvent s'enflammer spontanément sous l'effet de températures élevées ou d'étincelles.

Risques pour la santé :

- **Risque d'inhalation :** L'inhalation de poussière de tungstène peut provoquer une irritation respiratoire ; une exposition prolongée peut entraîner une fibrose pulmonaire.
- **Contact avec la peau :** légère irritation ; un contact prolongé peut provoquer une dermatite.
- **Contact avec les yeux :** Peut provoquer une irritation mécanique ou une légère inflammation.

Risques environnementaux :

- Aucune toxicité aiguë significative pour les milieux aquatiques, mais des déversements à grande échelle peuvent se déposer et affecter les écosystèmes.

Éléments de l'étiquette SGH :

- **Pictogrammes de danger :**
  - Symbole de flamme (poussière combustible)
  - Symbole de danger pour la santé (danger respiratoire)
- **Mot d'avertissement :** Avertissement

Mentions de danger :

- **H228 :** Solide inflammable ; peut former des mélanges poussière-air explosifs.
- **H315 :** Provoque une irritation cutanée.
- **H335 :** Peut irriter les voies respiratoires.

Conseils de prudence :

- **P210 :** Tenir à l'écart de la chaleur, des étincelles, des flammes nues et des surfaces chaudes. Ne pas fumer.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- **P261 :** Éviter de respirer les poussières.
- **P280 :** Porter des gants de protection, des vêtements de protection et des lunettes de protection.

Partie 3 : Composition/Informations sur les ingrédients

Composition chimique : Tungstène (W)
Pureté : ≥ 99,9 % (qualité industrielle) à ≥ 99,999 % (qualité haute pureté)
Impuretés : Peut contenir des traces d'oxygène (O), de carbone (C), de fer (Fe), etc., selon le processus de production.
Forme physique : Poudre métallique grise à noire, granulométrie comprise entre 0,05 et 100 μm (spécifique aux spécifications du produit).

Partie 4 : Premiers secours

Inhalation:

- Déplacez la victime à l'air frais et assurez-vous qu'elle respire régulièrement.
- Si la respiration est difficile, administrez immédiatement de l'oxygène et consultez un médecin.

Contact avec la peau :

- Laver abondamment à l'eau et au savon pendant au moins 15 minutes.
- En cas d'irritation ou d'éruption cutanée, consultez un médecin.

Contact visuel :

- Rincer immédiatement les yeux à l'eau courante pendant au moins 15 minutes en soulevant périodiquement les paupières.
- Si l'irritation persiste, consultez un ophtalmologue.

Ingestion:

- Il est peu probable que cela se produise, mais en cas d'ingestion, rincez-vous la bouche et buvez immédiatement beaucoup d'eau.
- Ne pas faire vomir ; consulter rapidement un médecin.

Notes de premiers soins : Les premiers intervenants doivent porter un équipement de protection pour éviter l'exposition à la poussière.

Partie 5 : Mesures de lutte contre l'incendie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Moyens d'extinction :

- **Recommandé :** extincteurs à poudre sèche (par exemple, poudre sèche ABC), sable sec ou dioxyde de carbone.
- **Interdit :** Eau (peut aggraver les incendies de poussières métalliques), extincteurs à mousse.

Risques d'incendie spécifiques :

- La poudre de tungstène à des concentrations élevées dans l'air peut former des nuages de poussière explosifs.
- Des fumées toxiques (par exemple, des vapeurs d'oxyde de tungstène) peuvent être libérées à des températures élevées.

Protection contre l'incendie :

- Les pompiers doivent porter un appareil respiratoire autonome et des vêtements ignifuges couvrant tout le corps.
- Combattez l'incendie en amont du vent et déplacez les conteneurs vers une zone sûre si possible.

Partie 6 : Mesures en cas de rejet accidentel

Protection personnelle :

- Portez un masque anti-poussière, des vêtements de protection et des gants pour éviter l'inhalation ou le contact avec la poussière.

Protection de l'environnement :

- Empêcher la poussière de pénétrer dans les plans d'eau ou les égouts afin d'éviter une dispersion généralisée.

Méthodes de nettoyage :

- Utilisez un aspirateur antidéflagrant ou un balayage humide pour récupérer les déversements, en évitant la génération de poussière.
- Placez les matériaux collectés dans des conteneurs scellés, étiquetez-les comme « déchets dangereux » et éliminez-les correctement.

Intervention d'urgence : Isoler la zone de déversement et restreindre l'accès au personnel non autorisé.

Partie 7 : Manutention et stockage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Précautions de manipulation :

- **Manipulation sécuritaire :** Travailler dans des zones bien ventilées et utiliser des équipements et outils électriques antidéflagrants. Éviter la production de poussière et maintenir le lieu de travail propre.
- **Mesures de protection :** Porter un masque anti-poussière N95 ou de qualité supérieure, des lunettes de sécurité et des gants résistants. Équiper le local d'aspiration ou de dépoussiérage.

Conditions de stockage :

- **Exigences :** Conserver dans un entrepôt frais, sec et bien ventilé, à l'écart des sources d'inflammation et des comburants. Utiliser des récipients hermétiquement fermés pour éviter l'accumulation d'humidité et de poussière.
- **Matériaux d'emballage :** Les matériaux recommandés comprennent des fûts métalliques avec des doublures en plastique ou des sacs résistants à l'humidité.

Partie 8 : Contrôles de l'exposition et protection individuelle

Limites d'exposition professionnelle (exemple basé sur les normes internationales) :

- **TLV-TWA (moyenne pondérée dans le temps) :** 5 mg/m³ (tungstène et ses composés insolubles, ACGIH, États-Unis).
- **VLE (Valeur limite d'exposition à court terme) :** 10 mg/m³ (15 minutes).

Contrôles d'ingénierie :

- Utiliser des systèmes fermés et une ventilation par aspiration locale pour maintenir les concentrations de poussière en dessous des limites d'exposition.

Équipement de protection individuelle :

- **Protection respiratoire :** Utilisez un respirateur avec un filtre P100 lorsque les niveaux de poussière dépassent les limites.
- **Protection des mains :** Portez des gants en caoutchouc ou en nylon durables.
- **Protection des yeux :** Lunettes de sécurité étanches ou écran facial.
- **Protection du corps :** Vêtements de travail antistatiques pour éviter l'adhérence de la poussière.

Partie 9 : Propriétés physiques et chimiques

Aspect et caractéristiques : Poudre grise à noire, inodore.
Point de fusion : 3422 °C
Point d'ébullition : 5555 °C

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Densité : 19,25 g/cm³ (tungstène en vrac), varie selon la taille des particules de poudre.
Solubilité : Insoluble dans l'eau, légèrement soluble dans les acides forts (par exemple, l'acide nitrique).
Point d'éclair : Aucun (mais la poudre fine est combustible dans des conditions spécifiques).
Limite d'explosivité : Limite inférieure du nuage de poussière d'environ 300 g/m³ (varie selon la taille des particules).

Partie 10 : Stabilité et réactivité

Stabilité : Stable à température ambiante ; peut s'enflammer spontanément à haute température ou avec des étincelles.
Conditions à éviter : Températures élevées, étincelles, décharge électrostatique, environnements humides.
Matières incompatibles : Oxydants forts (p. ex., acide nitrique, acide perchlorique), composés halogènes.
Produits de décomposition dangereux : Peut produire de la vapeur d'oxyde de tungstène (WO_3) à haute température.

Partie 11 : Informations toxicologiques

Toxicité aiguë :

- **DL50 (orale, rat) :** > 5 000 mg/kg (faible toxicité).
- **CL50 (inhalation, rat) :** > 5 mg/L (4 heures).

Toxicité chronique : L'inhalation prolongée peut entraîner une fibrose pulmonaire ou une « maladie pulmonaire des métaux durs ».
Cancérogénicité : Non classé comme cancérogène par le CIRC ; données insuffisantes pour l'évaluation.
Toxicité pour la reproduction : Aucune preuve significative.

Partie 12 : Informations écologiques

Écotoxicité : Aucune toxicité aiguë significative pour la vie aquatique, mais le dépôt de sédiments peut affecter les organismes benthiques.
Persistance et dégradabilité : Non biodégradable ; persiste sous forme de métal inerte dans l'environnement.
Potentiel de bioaccumulation : Aucune bioaccumulation significative.

Partie 13 : Considérations relatives à l'élimination

Méthodes d'élimination :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

- Traitez les déchets de poudre de tungstène comme des déchets dangereux et remettez-les à des entités qualifiées pour recyclage ou élimination.
- Éviter le rejet direct dans l'environnement pour éviter la dispersion des poussières.

Élimination des emballages : Les emballages contaminés doivent être traités comme des déchets dangereux ou nettoyés et recyclés.

Partie 14 : Informations sur le transport

Numéro ONU : ONU 3178 (solide inorganique inflammable, nsa).
Nom d'expédition : poudre de tungstène solide inflammable.
Classe de danger : 4.1 (solides inflammables).
Groupe d'emballage : III (faible risque).
Exigences de transport : utiliser un emballage étanche à l'humidité et antistatique ; éviter les températures élevées et les sources d'inflammation.

Partie 15 : Informations réglementaires

Réglementations internationales :

- Conforme au SGH (Système Général Harmonisé).
- Répertorié sous TSCA (Toxic Substances Control Act, USA) et REACH (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals, UE).

Réglementation chinoise :

- « Règlement sur la gestion de la sécurité des produits chimiques dangereux » (Décret du Conseil d'État n° 591).
- « Fiche de données de sécurité pour les produits chimiques - Contenu et ordre des sections » (GB/T 16483-2008).

Partie 16 : Autres informations

Date de préparation : 5 avril 2025
Notes de mise à jour : Cette ligne directrice est basée sur les recherches et les réglementations les plus récentes ; des mises à jour périodiques doivent être révisées.
Précautions : Les opérateurs doivent recevoir une formation en sécurité et se familiariser avec cette ligne directrice.

Notes supplémentaires

Ce guide fournit des informations complètes sur la sécurité de la poudre de tungstène, destinées aux utilisateurs industriels, aux chercheurs et aux professionnels concernés. En pratique, les mesures de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

protection doivent être adaptées aux spécifications spécifiques du produit (par exemple, la granulométrie, la pureté) et à la réglementation locale. Pour obtenir une fiche de données de sécurité spécifique, veuillez contacter le fabricant, CTIA GROUP .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Annexe G : Tableau comparatif de la terminologie de la poudre de tungstène en chinois, anglais, japonais, allemand, russe et coréen

1. Conditions générales

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
Poudre de tungstène	Poudre de tungstène	Poudre de Tangusten	Poudre de loup	Porochok volant	텅스텐 분말
carbure de tungstène	carbure de tungstène	Carbonisation Tangusten	Wolframkarbid	Carbide вольфрама	탄화텅스텐
Poudre de tungstène de haute pureté	Poudre de tungstène de haute pureté	Poudre de polyester de haute pureté	Poudre de loup à haute teneur en matières grasses	Высокочистый вольфрамовый порошок	고순도 텅스텐 분말
Poudre de nano-tungstène	Poudre de nano-tungstène	Poudre de Nona タングステン	Nanopoudre de loup	Porochok à nanovolframe	나노 텅스텐 분말
Poudre de tungstène sphérique	Poudre de tungstène sphérique	Poudre sphérique タングステン	Poudre de loup sphérique	Volfframe de qualité professionnelle	구형 텅스텐 분말
Poudre de tungstène ultrafine	Poudre de tungstène ultrafine	Poudre ultrafine de タングステン	Poudre de loup ultrafine	de tungstène dans FABRIQUÉ PAR :	초미세 텅스텐 분말

2. Propriétés

Propriétés physiques

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
Taille des particules	Taille des particules	Taille des particules	Première partie	Chips Rashmere	2 Coréen
Distribution granulométrique	Distribution granulométrique	Distribution granulométrique	Allumage partiel	Распределение размеров частиц	입도 분포
Surface	Surface	Surface	Passer la	Удельная	2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
spécifique	spécifique	spécifique	journée	поверхность	
densité	Densité	densité	Étanchéité	Плотность	D'accord
Densité apparente	Densité apparente	Densité	Schüttdichte	Насыпная плотность	겉보기 밀도
Densité de tassement	Densité de taraudage	Densité de tassement	Klopfdichte	Утрамбованная плотность	Pôle 밀도
Liquidité	Fluidité	Liquidité	Voler haut	Testez	2
Point de fusion	Point de fusion	Point de fusion	Schmelzpunkt	Réglage de la température	용융젖
Point d'ébullition	Point d'ébullition	Point d'ébullition	Point latéral	Température de cuisson	끓는점 FABRIQUÉ PAR : CTIA GROUP LTD

Propriétés chimiques

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
pureté	Pureté	Pureté	Reinheit	Caboteta	순도
Teneur en oxygène	Teneur en oxygène	Teneur en acide	Contenance en hydrocarbures	Содержание кислорода	산소 Coréen
Teneur en carbone	Teneur en carbone	Teneur en carbone	Conservation des matières premières	Содержание углерода	탄소 Coréen
Impuretés	Impuretés	Impur	Véronique	Prométhée	2
Oxydation	Oxydabilité	Acidification	Oxydabilité	Ouvrir	Tungstène FABRIQUÉ PAR :

Propriétés mécaniques

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
dureté	Dureté	dureté	Harte	Thvërdostь	경도
Résistance à la compression	Résistance à la compression	Résistance à la compression	Résistance à la pression	Prochaine étape	압축 강도
dureté	Dureté	Dureté	Disponibilité	Ударная вязкость	인성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
Résistance à l'usure	Résistance à l'usure	Résistance à l'usure	Résistance à la traction	Износостойкость	GROUPE CTIA LTD

Propriétés thermiques et électriques

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
Conductivité thermique	Conductivité thermique	Conductivité thermique	Quelle est la meilleure façon de gérer cela ?	Теплопроводность	Je suis si fatigué
Coefficient de dilatation thermique	Coefficient de dilatation thermique	Coefficient de dilatation thermique	Wärmeausdehnungskoeffizient	Коэффициент теплового расширения	2 계수
Conductivité	Conductivité électrique	conductivité électrique	Leitfähigkeit électrique	Électropropulseur	Le
Résistivité	Résistivité électrique	Résistance électrique	Support électrique plus large	Удельное сопротивление	2

3. Équipement de production

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
Four de réduction	Four de réduction	Four de réduction	Rachat	Le voyageur	환원로
Équipement plasma	Équipement plasma	Dispositif à plasma	Plasmaanlage	Плазменное оборудование	플라즈마 장비
Broyeur à boulets	broyeur à boulets	Ballumil	Moulin à boules	Шаровая мельница	볼 Oui
Séchoir par pulvérisation	Séchoir par pulvérisation	Livrée étalée	Sprühtrockner	Распылительная сушилка	분무 건조기
Four de frittage	Four de frittage	Four de frittage	Sinterofen	Espèce de pétillant	소결로
Four à vide	Four à vide	Four à vide	Four à vide	Viagra	2
Four à micro-ondes	Four à micro-ondes	Four à micro-ondes	Micro-ondes	Микроволновая печь	La plus belle Oui
presse	Machine de presse	Presse-machine	Presse	Presse	프레스 기계

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
Machine de criblage	Machine de criblage	Machine de criblage	Siebmachine	Site	2 Fabrication intelligente de tungstène dans FABRIQUÉ PAR :

4. Instruments de test et d'inspection

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
Analyseur de taille de particules laser	Analyseur de taille de particules laser	Analyseur de taille de particules Reser	Analyseur de particules laser	Granulomètre laser	2 personnes
Microscopie électronique à balayage	Microscope électronique à balayage (MEB)	Microscope électronique à balayage (MEB)	Microscope électronique raster (REM)	Microscope électronique à balayage (СЭМ)	SEM
Diffractomètre à rayons X	Diffractomètre à rayons X (DRX)	Dispositif de réflexion des rayons X (DRX)	Diffracteur à rayons X (DRX)	Difractomètre rentable (XRD)	X DRX
Compteur de surface	Analyseur de surface BET	Surface spécifique BET	BET - Analyseur de surface	Analyseur de puissance ultime BET	PARI 2 2
Analyseur d'oxygène et d'azote	Analyseur d'oxygène et d'azote	Appareil d'analyse d'oxygène et d'azote	Analyseur Sauerstoff-Stickstoff	Analyseur de cyslorode et d'azote	Numéro 2
Testeur de dureté	Testeur de dureté	Testeur de dureté	Härteprüfgerät	Fabrication intelligente de tungstène Trierdomer FABRIQUÉ PAR :	Numéro 2
Conductimètre thermique	Conductimètre thermique	Conductimètre thermique	Wä rmeleitf ä higkeitsmessger ä t	Измеритель теплопроводности	suis tellement fatigué
Conductimètre	Conductimètre	Conductimètre électrique	Comment créer un message de haute qualité	Électropropulseurs électriques	Le 측정기

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

microscope	Microscope	Microscope	Microscope	Mokrovokop	현미경

5. Processus de production

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
Réduction de l'hydrogène	Réduction de l'hydrogène	Réduction de l'hydrogène	Production d'eau	Водородное восстановление	2 Coréen
Atomisation au plasma	Atomisation au plasma	Match Maître Plasma	Agent plasma-atomique	Déplacement facile	플라즈마 분무
Réduction des micro-ondes	Réduction des micro-ondes	La renaissance du micro-ondes	Commercialisation	Микроволновое восстановление	La plus belle Coréen
Synthèse électrochimique	Synthèse électrochimique	Synthèse électrochimique	synthétiseur électrochimique	Synthèse électrochimique	2. coréen
Rectification mécanique	Rectification mécanique	Rectification mécanique	boucles mécaniques	Mesure mécanique	기계 2
frittage	Frittage	Frittage	Sintern	Spekanikie	Le
Pressage à chaud	Pressage à chaud	Compression thermique	Appuyez chaudement	Горячее прессование	Oui 2
Recycler	Recyclage	En direct	Recyclage	Peerera Botka	2

6. Applications et utilisations

Applications industrielles

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
carbure cémenté	carbure cémenté	Alliage super dur	Hartmetall	Theuyrdyy Œufs	coréen
Fabrication additive	Fabrication additive	アディティブマニュファクチャリング	Fertirrigation additive	Produit supplémentaire	적층 2
Projection thermique	Projection thermique	Pulvérisation	Thermodynamique	Photographie Trimona	Oui 2
Outils de coupe	Outils de coupe	Outils de coupe	outils de découpe	Instruments de recherche	2 공구
Outils miniers	Outils miniers	Outils miniers	Outils de construction de montagne	Instruments de musique	Le monde 공구

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
Revêtement résistant à l'usure	Revêtement résistant à l'usure	Revêtement résistant à l'usure	Verschlei ß feste Beschichtung	Износостойкое покрытие	내마모 코팅

Applications électroniques et de haute technologie

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
Cible électronique	Cible électronique	Montre électronique	Cible électronique	Machine électronique	2 타겟
Matériaux semi-conducteurs	Matériau semi-conducteur	Matériaux semi-conducteurs	Matériau de remplissage	Matériel polyvalent	2 재료
Dépôt de couches minces	Dépôt de couches minces	Évaporation du film	Réalisation	Нанесение тонкой плёнки	박막 2
Matériaux d'électrodes	Matériau de l'électrode	Matériaux d'électrodes	Génie électrique	Matériel électrique	Le Tungstène fabriqué par :

Aérospatiale et défense

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
Alliages haute température	Alliage haute température	Alliages haute température	Contrôle de la température	Высокотемпературный сплав	고온 Coréen
Alliage de tungstène	Alliage de tungstène	Alliage Tangusten	Alliage de Wolfram	Вольфрамовый сплав	텅스텐 Coréen
Contrepoids	Contrepoids	Attrapez le monde	Poids relatif	Protipovov	균형추
pièces militaires	Composante militaire	Pièces militaires	Composants militaires	Lecteur vidéo	군사 부품

Autres applications

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
Support de catalyseur	Support Catalyst	Support de catalyseur	Porte-catalytes	Catalyseur d'hôtel	촉매 2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
Fil de tungstène	Fil de tungstène	タングステンワイヤー	Wolframdräht	Volframovaya проволока	텅스텐 2
Tige de tungstène	Tige de tungstène	Écluse de Tangusten	Wolframstab	Вольфрамовый стержень	텅스텐 로드
Dispositifs médicaux	Dispositif médical	Machines médicales	Appareils médicaux	Медицинское устройство	의료 기기

7. Sécurité et protection

Chinois	Anglais	japonais	Allemand	russe	coréen
Poussières combustibles	Poussière combustible	Poussières combustibles	Poussiéreux inflammable	Voir les photos	coréen 2
Poussière explosive	Poussière explosive	Poussière explosive	Explosif Staub	Взрывоопасная пыль	폭발성 2
Irritation des voies respiratoires	Irritation respiratoire	Irritation respiratoire	Atmosphère	Раздражение дыхательных путей	호흡기 자극
Lunettes de protection	Lunettes de sécurité	Lunettes de protection	Lunettes de protection	Comment faire un film	보호 고글
gants de protection	Gants de protection	Sac à main de protection	Gants de protection	Защитные перчатки	보호 2
Masques anti-poussière	Masque anti-poussière	Masque anti-poussière	Masque anti-poussière	Masque protecteur	2 2
Échappement local	Ventilation par aspiration locale	Échappement	Absorption locale	Les voyageurs locaux	국부 Le monde Coréen
Déchets dangereux	Déchets dangereux	Déchets dangereux	C'est la réponse	Ouvre la porte	2 폐기물
Mesures de lutte contre l'incendie	Mesures de lutte contre l'incendie	Mesures de prévention des incendies	Mesures de protection contre les incendies	Meres de protection	소방 FABRIQUÉ PAR : Tungsten Intelligence

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Tungsten Powder Introduction

1. Tungsten Powder Overview

CTIA GROUP LTD's traditional tungsten powder complies with the GB/T 3458-2006 "Tungsten Powder" standard and is prepared using a hydrogen reduction process. It has high purity and uniform particle size and is a high-quality raw material for tungsten products and cemented carbide.

2. Tungsten Powder Characteristics

Ultra-high purity: tungsten content ≥99.9%, oxygen content ≤0.20 wt% (fine particles ≤0.10 wt%), and extremely low impurities.

Accurate particle size: Fisher particle size 0.4-20 μm, 6 levels to choose from, with a deviation of only ±10%.

Excellent performance: bulk density 6.0-10.0 g/cm³ , uniform grains, excellent sinterability.

Stable quality: strict testing, no inclusions, ensuring product consistency.

3. Tungsten Powder Specifications

Brand	Fisher particle size (μm)
FW-1	0.4-1.0
FW-2	1.0-2.0
FW-3	2.0-4.0
FW-4	4.0-6.0
FW-5	6.0-10.0
FW-6	10.0-20.0
In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.	

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner sealed plastic bag, outer iron drum, net weight 25kg or 50kg, moisture-proof and shock-proof.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including chemical composition and particle size data, and the shelf life is 12 months.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

For more information about tungsten powder, please visit the website of CTIA GROUP LTD (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Spherical Tungsten Powder Product Introduction

1. Overview of Spherical Tungsten Powder

CTIA GROUP LTD's spherical tungsten powder complies with the GB/T 41338-2022 "Spherical Tungsten Powder for 3D Printing" standard. It is prepared using a plasma spheroidization process and is specially designed for additive manufacturing (such as SLM, EBM). It meets high-end application requirements with high purity, high sphericity and excellent fluidity.

2. Excellent Properties of Spherical Tungsten Powder

Ultra-high purity: tungsten content ≥99.95%, oxygen content ≤0.05 wt%, and extremely low impurities.
High sphericity: ≥90%, uniform particles, excellent powder spreading performance.
Precise particle size: D50 range 5-63 μm, stable distribution, deviation ±10%.
Excellent fluidity: ≤25 s/50g, bulk density ≥9.0 g/cm³ , ensuring printing efficiency.

3. Specifications of Spherical Tungsten Powder

Brand	D50 particle size (μm)
SWP-15	5-15
SWP-25	15-25
SWP-45	25-45
SWP-63	45-63
In addition to basic specifications, parameters such as particle size and purity can be customized according to customer needs.	

4. Spherical Tungsten Powder Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner vacuum aluminum foil bag, outer iron drum, net weight 5kg or 10kg, moisture-proof and shock-proof.
Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size distribution and sphericity data, and the shelf life is 12 months.

5. Contact Information of CTIA GROUP LTD

Email: sales@chinatungsten.com
Tel: +86 592 5129696
For more information about spherical tungsten powder , please visit the website of CTIA GROUP LTD (www.ctia.com.cn)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Introduction of High Purity Tungsten Powder

1. High Purity Tungsten Powder Overview

CTIA GROUP LTD's high-purity tungsten powder is produced using a high-purity tungsten oxide hydrogen reduction process. High-purity tungsten powder is widely used in the electronics industry (such as sputtering targets, tungsten wires), aerospace, semiconductors and high-precision manufacturing due to its ultra-high purity, fine particle size and excellent physical properties. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality tungsten powder products to meet cutting-edge technology needs.

2. High Purity Tungsten Powder Features

Chemical composition: Tungsten (W), high purity metal powder.

Purity: ≥99.99% (4N), with extremely low impurity content.

Appearance: Grey or dark grey powder, uniform color.

Ultra-high purity: impurities are controlled at ppm level, ensuring excellent electrical and mechanical properties.

Fine particles: The particle size can reach 0.1-5 μm, which can meet high-precision applications.

Low oxygen content: oxygen content ≤ 0.02%, improving sintering performance and material stability.

3. High Purity Tungsten Powder Specifications

Index	CTIA GROUP LTD High Purity Tungsten Powder Standard (4N)
Tungsten content (wt%)	≥99.99
Impurities (wt%, max)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0010, Si≤0.0005, Al≤0.0005, Ca≤0.0005, Mg≤0.0005, Na≤0.0010, K≤0.0010, O≤0.0200, C≤0.0050, N≤0.0020, P≤0.0005, S≤0.0005
Water content (wt%)	≤0.02
Particle size (μm, FSSS)	0.1-5.0 (superfine 0.1-1.0, fine 1.0-5.0)
Bulk density (g/ cm^3)	4.5-6.5
Particle size	Provide ultra-fine (0.1-1.0 μm) and fine (1.0-5.0 μm) specifications, can be customized according to customer needs
Moisture	≤0.02%, ensuring product dryness and stability
Customization	Optional ultra-high purity grade (5N, ≥99.999%), with further reduction of impurities (e.g. O≤0.01%)

4. Packaging and Quality Assurance

Packaging: Inner sealed vacuum aluminum foil bag, outer iron barrel or plastic barrel, net weight 5kg, 10kg or 25kg, moisture-proof and oxidation-proof.

Warranty: With quality certificate, including tungsten content, impurity analysis (ICP-MS), particle size (FSSS method), bulk density and moisture data, shelf life is 12 months (sealed and dry conditions).

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129696

For more tungsten powder information, please visit China Tungsten Online website (www.tungsten-powder.com)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved