

Encyclopédie des tiges en alliage de tungstène

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
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

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 internationale, 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 de 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 de 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
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

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



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

Table des matières

Préface

Contexte de l'écriture et importance pratique

La position stratégique et la valeur fondamentale des tiges en alliage de tungstène

Comment utiliser ce livre

Public cible et objectif de référence

Chapitre 1 : Concepts de base et classification des tiges en alliage de tungstène

1.1 Définition et forme de base des tiges en alliage de tungstène

1.2 Introduction au système d'alliage de tungstène à haute densité (W-Ni-Fe / W-Ni-Cu)

1.3 Tailles, formes et états de surface courants des tiges en alliage de tungstène

1.4 Classification des tiges en alliage de tungstène (par composition, application et méthode de traitement)

1.5 Comparaison des tiges en alliage de tungstène avec les tiges en cuivre-tungstène, les tiges en tungstène pur et autres matériaux

Chapitre 2 : Propriétés physiques et mécaniques des tiges en alliage de tungstène

2.1 Contrôle de la densité, de la gravité spécifique et de la précision dimensionnelle

2.2 Résistance à la traction, limite d'élasticité et allongement

2.3 Dureté et résistance aux chocs

2.4 Conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique et performance à haute température

2.5 Propriétés électriques, réponse magnétique et résistance aux radiations

2.6 Analyse de la résistance à la corrosion et de la stabilité chimique

Chapitre 3 : Technologie de préparation et de formage des tiges en alliage de tungstène

3.1 Préparation des matières premières et propriétés des poudres

3.2 Procédé de pressage par métallurgie des poudres (moulage, pressage isostatique)

3.3 Technologie de frittage et contrôle de l'atmosphère

3.4 Optimisation du traitement thermique et du processus de densification

3.5 Technologie d'usinage et de traitement de surface (meulage, polissage, tournage)

3.6 Nouvelles technologies de préparation : extrusion, laminage et fabrication additive

Chapitre 4 : Essais de performance et évaluation de la qualité des tiges en alliage de tungstène

4.1 Contrôle de l'apparence et des dimensions géométriques

4.2 Méthodes d'analyse de la densité et de la microstructure

4.3 Normes d'essai des propriétés mécaniques (ASTM, GB, ISO)

4.4 Analyse métallographique et caractérisation de la microstructure

4.5 Analyse de la composition chimique (ICP, XRF, ONH)

4.6 Détection de la rugosité de surface et des défauts (inspection visuelle, tomographie par ordinateur)

4.7 Technologies de contrôle non destructif (ultrasons, rayons X, poudre magnétique)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 5 : Domaines d'application typiques des tiges en alliage de tungstène

- 5.1 Contrepoids et composants inertiels aérospatiaux
- 5.2 Tiges en alliage de tungstène pour équipements militaires (noyaux perforants, queues de missiles)
- 5.3 Applications en énergie nucléaire (tiges de protection contre les radiations, structures d'absorption de neutrons)
- 5.4 Tiges structurelles à haute densité pour équipements médicaux (appareils de radiothérapie)
- 5.5 Tiges d'équilibrage dynamique et pièces inertielles rotatives dans les instruments de haute précision
- 5.6 Structures de support et de dissipation thermique dans les industries de l'électronique et des communications

Chapitre 6 : Recherche, développement et amélioration des tiges spéciales en alliage de tungstène

- 6.1 Tiges en alliage de tungstène renforcées par des nanoparticules
- 6.2 Conception et amélioration des performances des tiges en alliage de tungstène microallié
- 6.3 Régulation de la composition des tiges en alliage de tungstène à haute résistance et robustesse
- 6.4 Études de traitement thermique des tiges en alliage de tungstène résistantes aux hautes températures
- 6.5 Revêtement de surface et amélioration de la résistance à l'usure des tiges en alliage de tungstène
- 6.6 Tiges fonctionnelles en alliage de tungstène : conductivité électrique, conductivité thermique et propriétés antimagnétiques

Chapitre 7 : Système de conformité pour les tiges en alliage de tungstène

- 7.1 Normes nationales et industrielles chinoises (GB/T, YS/T)
- 7.2 Système de normes américain (ASTM, MIL)
- 7.3 Normes internationales de l'UE et de l'ISO
- 7.4 Certifications de protection de l'environnement et de sécurité des matériaux (RoHS, REACH, MSDS)
- 7.5 Exigences des systèmes de qualité dans les secteurs aéronautique, militaire et médical

Chapitre 8 : Emballage, stockage et transport des tiges en alliage de tungstène

- 8.1 Méthodes d'emballage et mesures de protection (emballage sous vide, déshydratant)
- 8.2 Conditions de stockage et précautions (contrôle de la température et de l'humidité, prévention de la corrosion)
- 8.3 Réglementation internationale sur le transport et directives de déclaration des marchandises dangereuses
- 8.4 Exigences en matière de surveillance douanière et de licences d'exportation pour les tiges en alliage de tungstène

Chapitre 9 : Structure du marché et tendances de développement des tiges en alliage de tungstène

- 9.1 Aperçu des ressources mondiales en tungstène et de la chaîne industrielle des tiges en alliage
- 9.2 Analyse de la taille du marché et des tendances de croissance des tiges en alliage de tungstène
- 9.3 Principaux fabricants et paysage concurrentiel (Chine, Europe, États-Unis, Japon, Corée du

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sud)

9.4 Analyse des fluctuations des prix des matières premières et de la structure des coûts

9.5 Interprétation des politiques industrielles et de la situation des exportations

9.6 Prévisions de la demande de tiges en alliage de tungstène dans le futur secteur manufacturier haut de gamme

Chapitre 10 : Points de recherche et technologies de pointe des tiges en alliage de tungstène

10.1 Recherche sur les procédés de densification des tiges en alliage de tungstène à haute densité

10.2 Fabrication intelligente et lignes de production automatisées

10.3 Intégration des tiges en alliage de tungstène et de la fabrication additive

10.4 Comparaison et voies de développement des alternatives d'alliages à hautes performances

10.5 Évolution des performances des alliages de tungstène dans des conditions de service extrêmes

Appendice

Annexe 1 : Résumé des paramètres techniques courants des tiges en alliage de tungstène

Annexe 2 : Tableau comparatif des nuances et des compositions chimiques des alliages de tungstène

Annexe 3 : Documents standard et index de référence des tiges en alliage de tungstène

Annexe 4 : Glossaire des alliages de tungstène et abréviations anglaises



Préface

Avec le développement de nouvelles technologies de matériaux et l'essor rapide de l'industrie manufacturière haut de gamme, les alliages fonctionnels hautes performances sont devenus un élément clé du progrès de l'aérospatiale, de la fabrication de précision, des équipements de défense nationale, des systèmes énergétiques et des équipements médicaux. Le tungstène, l'un des métaux ayant le point de fusion le plus élevé du tableau périodique, présente une densité, une dureté et un point de fusion élevés, ainsi qu'une excellente résistance aux radiations, ce qui lui confère des avantages uniques dans les environnements extrêmes. Parmi les nombreux matériaux à base de tungstène, les tiges d'alliages lourds de tungstène sont progressivement devenues un composant clé du système stratégique de matériaux fonctionnels grâce à leurs propriétés physiques uniques, leur stabilité de formage et leur grande adaptabilité.

Les tiges en alliage de tungstène sont généralement constituées de tungstène (W) comme élément principal. Elles sont obtenues par ajout de nickel (Ni), de fer (Fe), de cuivre (Cu) et d'autres métaux pour former des alliages de tungstène haute densité (alliage de tungstène haute densité), préparés par métallurgie des poudres. Leur densité peut atteindre 17,0-18,8 g/cm³, ce qui est bien supérieur à celle des métaux courants tels que l'acier, le cuivre et l'aluminium. C'est un matériau technique offrant une résistance élevée, une bonne usinabilité et une excellente stabilité de service. Face à la demande croissante de structures compactes, de précision de contrôle de l'énergie et de longévité des équipements, la conception et l'application des tiges en alliage de tungstène évoluent constamment vers une densité élevée, une uniformité élevée et une grande pureté.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les tiges en alliage de tungstène sont non seulement utilisées dans les contrepoids traditionnels, tels que l'équilibrage des avions, le réglage d'attitude aérospatiale, les modules inertiels embarqués, etc., mais sont également largement utilisées dans la protection pare-balles, la radioprotection, les composants d'énergie nucléaire, les armes cinétiques, les modules de radiothérapie pour équipements médicaux, les dispositifs de protection contre les rayons X, les rotors inertiels de gyroscopes, les structures d'anodes pour dispositifs à vide électrique, les composants de contrôle thermique pour boîtiers électroniques et d'autres domaines technologiques stratégiques. En particulier dans les munitions à guidage de précision, les projectiles perforants hypervéloces, les expériences de physique des hautes énergies et les projets d'exploration spatiale, les tiges en alliage de tungstène sont devenues des matériaux hautes performances irremplaçables grâce à leur stabilité structurelle et à la précision de leur réponse inertielle.

Actuellement, les ressources mondiales en tungstène sont extrêmement concentrées. La Chine, la Russie, le Kazakhstan, le Portugal et d'autres pays en possèdent les principales. Parmi eux, la Chine se classe au premier rang mondial en termes de réserves prouvées, de production de concentrés et de capacité de traitement en profondeur du minerai de tungstène. Cela constitue une base solide pour la conception, le développement et l'innovation des tiges en alliage de tungstène en Chine. Parallèlement, avec la modernisation rapide du secteur de la fabrication d'équipements de milieu et haut de gamme, les tiges en alliage de tungstène nationales ont progressivement remplacé les produits importés, réalisé des avancées technologiques dans des domaines clés tels que l'aérospatiale, l'ingénierie nucléaire médicale et les contre-mesures électroniques, et constitué des capacités d'approvisionnement de masse.

Cependant, malgré la maturité croissante du système technologique des barres en alliage de tungstène, celui-ci reste confronté à plusieurs défis, notamment : comment améliorer encore la densité de frittage et l'uniformité organisationnelle ? Comment développer une technologie de préparation de barres de forme spéciale adaptée aux exigences structurelles complexes ? Comment équilibrer le rapport résistance/usinabilité des matériaux ? Comment réduire la consommation d'énergie de fabrication et améliorer le taux de recyclage ? Afin de résoudre ces problèmes, de nouvelles voies de traitement et méthodes de fabrication avancées ont émergé ces dernières années, telles que la densification par frittage en phase liquide, l'optimisation des éléments en microalliages, la technologie de pressage isostatique à chaud (HIP), la conception par simulation multi-échelles et l'impression 3D de pièces structurelles en alliage de tungstène, etc., qui ont insufflé un nouveau dynamisme au développement haut de gamme, fonctionnel et intelligent des barres en alliage de tungstène.

C'est dans ce contexte que l'ouvrage « Encyclopédie des tiges en alliage de tungstène » a été rédigé. Il analyse de manière systématique les bases matérielles, le processus de préparation, l'évaluation des performances, le système de normes, l'expansion des applications et les tendances futures des tiges en alliage de tungstène. Il vise à fournir une référence professionnelle détaillée et pratique aux ingénieurs, chercheurs, enseignants et étudiants, ainsi qu'aux responsables des achats stratégiques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

impliqués dans la recherche et le développement de matériaux en alliage de tungstène, la conception de produits, l'optimisation des procédés et les applications industrielles.

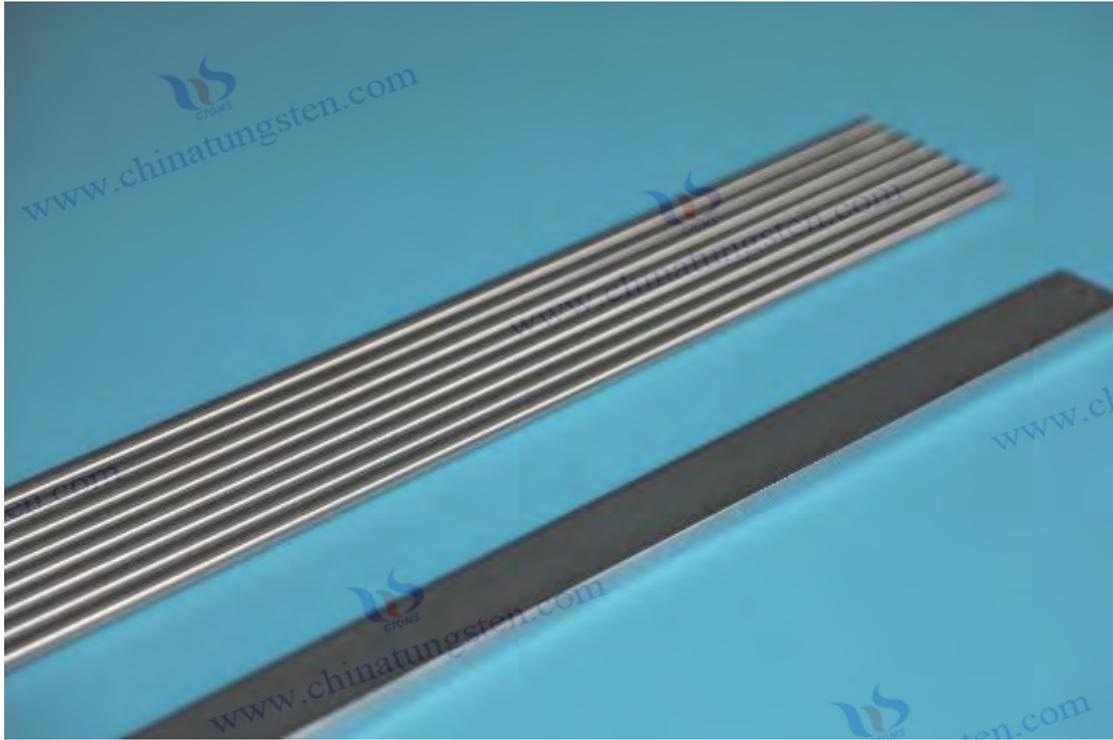
Pour rédiger cet ouvrage, nous nous sommes largement appuyés sur des publications scientifiques nationales et étrangères, des cas d'application en entreprise et des normes nationales et industrielles. Nous nous sommes appuyés sur l'expérience pratique de CTIA GROUP LTD et de ses partenaires dans le domaine des alliages de tungstène depuis de nombreuses années. Nous avons veillé à ce que le contenu soit fiable, la structure systématique, le langage accessible et les textes et illustrations riches. L'ouvrage est divisé en dix chapitres et plusieurs annexes, couvrant les concepts fondamentaux des tiges en alliage de tungstène, leurs propriétés physiques et mécaniques, la métallurgie des poudres et les technologies de formage, les méthodes d'essai et de contrôle qualité, les domaines d'application typiques, le système international de normes, les spécifications d'emballage et de transport, l'analyse des tendances du marché et les tendances technologiques de pointe. Des index terminologiques et des cartes de référence sont également fournis pour faciliter la consultation et l'application en ingénierie.

Nous espérons que cet ouvrage ne se contentera pas d'être un manuel de référence sur la technologie des matériaux, mais servira également de passerelle entre l'application technique et la recherche et développement scientifiques des tiges en alliage de tungstène. Que vous soyez chercheur universitaire, ingénieur dans une entreprise de produits en tungstène ou décideur en conception industrielle, vous y trouverez inspiration théorique, références de cas et conseils pratiques.

En raison de la diversité du contenu et de la quantité d'informations, ce livre présente inévitablement des lacunes et des omissions. Je demande sincèrement aux lecteurs de me critiquer et de me corriger.

GROUPE CTIA LTD
Juillet 2025

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 1 Concepts de base et classification des tiges en alliage de tungstène

1.1 Définition et forme de base de la tige en alliage de tungstène

Les tiges en alliage de tungstène font généralement référence à de longues bandes de matériaux métalliques fabriquées par métallurgie des poudres avec du tungstène (W) comme composant principal et une certaine proportion de métaux de liaison tels que le nickel (Ni), le fer (Fe), le cuivre (Cu), etc. Ce type de tige a une densité extrêmement élevée (généralement entre 17,0 et 18,8 g/cm³), d'excellentes propriétés mécaniques (la résistance à la traction peut atteindre 700 à 1200 MPa), une bonne résistance à la chaleur et à la corrosion, et est largement utilisé dans l'aérospatiale, les équipements militaires, l'ingénierie de l'énergie nucléaire, les équipements médicaux, l'électronique et l'électricité et d'autres domaines haut de gamme.

Les tiges en alliage de tungstène se distinguent par leur excellente aptitude à la mise en œuvre et leur stabilité dimensionnelle, tout en conservant une résistance élevée. Comparées aux matériaux de structure traditionnels tels que le plomb, l'acier, le titane et le cuivre, les tiges en alliage de tungstène présentent une densité et une durabilité supérieures, et constituent une valeur technique irremplaçable dans les domaines des contrepoids inertiels, des blindages de protection et des accessoires de précision.

En termes de forme de base, les tiges en alliage de tungstène existent principalement dans les types suivants :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Tige ronde** : Forme la plus courante, adaptée à diverses utilisations, telles que les composants d'inertie rotatifs, les rotors de gyroscopes, les électrodes et les masselottes d'équilibrage. Son diamètre varie de 1 mm à 100 mm, et sa longueur est généralement comprise entre 50 mm et 1 500 mm. Elle peut être coupée ou tournée selon les besoins.
- **Tige carrée/ tige rectangulaire** : utilisée pour le traitement de pièces avec des exigences spécifiques en matière de forme de section transversale, couramment trouvées dans les supports d'emballage électronique, les contacteurs électriques à haute température, etc.
- **Tige profilée** : Tige de section complexe, telle qu'une rainure, un trou ou une marche, obtenue par extrusion, tournage ou électro-usinage. Elle convient aux structures de connexion spéciales ou aux pièces composites multifonctionnelles.
- **Tige de type broche** : principalement utilisée comme petits contrepoids, composants de positionnement ou conducteurs dans les dispositifs de micro-précision, les équipements médicaux et les composants de vide électrique, généralement avec un diamètre < 5 mm.
- **tige de grande dimension** : utilisée pour les structures porteuses et les composants d'impact à haute énergie, tels que les noyaux perforants supersoniques, les modules de test inertiel, etc., mettant l'accent sur une résistance élevée, une uniformité et une densité élevées.

De plus, avec le développement de la fabrication personnalisée et de l'intégration fonctionnelle, certaines tiges en alliage de tungstène ont été structurellement composites avec des céramiques, des polymères ou des revêtements fonctionnels, ce qui leur confère de multiples fonctions composites telles que la protection thermique, la résistance à la corrosion et le blindage électromagnétique.

En termes d'approvisionnement, les tiges en alliage de tungstène sont généralement disponibles en trois types : tiges polies (surface polie), tiges de tournage (finies) et tiges noires (non traitées). La qualité de surface et les tolérances dimensionnelles varient selon les domaines d'application. Certains produits de précision nécessitent des valeurs $Ra < 0,4 \mu\text{m}$ et une précision dimensionnelle de $\pm 0,01 \text{ mm}$, et sont largement utilisés dans les équipements haut de gamme tels que l'imagerie médicale, les communications par micro-ondes et les instruments inertiels.

Avec le développement de l'ingénierie des matériaux et l'évolution des technologies de transformation, les formes des tiges en alliage de tungstène s'enrichissent constamment. Des tiges pleines traditionnelles à sections égales aux tiges structurelles à gradient fonctionnel, en passant par les tiges structurelles co-cuites multiphasées et même les tiges poreuses imprimées en 3D, elles s'adaptent progressivement aux nouveaux scénarios d'application tels que les environnements de service extrêmes, le contrôle structurel intelligent et l'intégration multifonctionnelle, offrant des solutions de matériaux plus flexibles et plus performantes pour les systèmes de fabrication avancés.

1.2 Introduction au système d'alliage de tungstène lourd (W-Ni-Fe / W-Ni-Cu)

L'alliage lourd de tungstène (THA) est un pseudo-alliage ou système composite métallique à base de tungstène (W), formé par l'ajout d'une certaine proportion de métaux de liaison (tels que le nickel Ni, le fer Fe, le cuivre Cu, etc.). Ses caractéristiques principales sont une densité élevée, une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance élevée, de bonnes performances de traitement mécanique et une stabilité thermique à température ambiante, ainsi qu'un faible coefficient de dilatation thermique et une bonne résistance à la corrosion. L'alliage lourd de tungstène est largement utilisé dans les domaines à forte intensité technologique tels que les composants de contrepoids hautes performances, les composants de radioprotection, les composants perforants militaires, les composants inertiels, etc. C'est l'un des matériaux de structure clés irremplaçables dans la fabrication actuelle d'équipements haut de gamme.

Parmi tous les systèmes d'alliages de tungstène à haute densité, les deux plus représentatifs et les plus matures industriellement sont :

- **Système d'alliage tungstène-nickel-fer (W-Ni-Fe)**
- **Système d'alliage tungstène-nickel-cuivre (W-Ni-Cu)**

La structure de base de ces deux systèmes est une « structure biphasée », c'est-à-dire que les particules de tungstène avec une fraction volumique de plus de 90 % sont la phase principale, et elles sont étroitement liées par une phase de liaison continue (matrice) composée de nickel et de fer ou de cuivre, formant ainsi une structure d'alliage à haute densité et haute uniformité.

Alliage de tungstène W-Ni-Fe : type principal industriel à haute résistance

Le système W-Ni-Fe est l'alliage de tungstène le plus performant et le plus largement utilisé. Sa composition typique est la suivante :

- **Tungstène (W) :** 90–97 % en poids
- **Nickel (Ni) :** 3 à 7 % en poids
- **Fer (Fe) :** 1 à 3 % en poids
- **Plage de densité :** 17,0–18,5 g/cm³

Cet alliage présente une résistance à la traction extrêmement élevée (généralement jusqu'à 900-1200 MPa), une bonne ductilité à la rupture (allongement pouvant atteindre 10-30 %) et, grâce à sa teneur en fer, ses propriétés magnétiques sont ajustables. Il convient aux applications exigeant des propriétés mécaniques exceptionnelles, telles que les composants inertiels, les contrepoids sismiques et les pièces structurelles résistantes aux charges dynamiques.

avantage :

- Haute résistance et bonne résistance à l'usure
- Traitement thermique
- Applicable aux pièces structurelles militaires et aux dispositifs inertiels aérospatiaux

défaut :

- La teneur en Fe le rend magnétique, ce qui ne convient pas pour lester certains appareils électroniques.
- La résistance à la corrosion est légèrement inférieure à celle du système Ni-Cu

Alliage de tungstène W-Ni-Cu : faibles propriétés magnétiques et conductivité élevée

L'alliage W-Ni-Cu remplace le fer par du cuivre pour former une phase de liaison amagnétique ou faiblement magnétique. Sa composition typique est la suivante :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Tungstène (W)** : 90–95 % en poids
- **Nickel (Ni)** : 2 à 5 % en poids
- **Cuivre (Cu)** : 2–4 % en poids
- **Plage de densité** : 17,0–18,0 g/cm³

Ce type d'alliage de tungstène a une résistance à la traction légèrement inférieure (environ 700 à 900 MPa), mais présente une meilleure conductivité électrique et une meilleure résistance à la corrosion, et sa perméabilité magnétique est proche de 1. C'est un matériau structural non magnétique typique et il est largement utilisé dans l'électronique, le vide, les équipements de diagnostic médical et d'autres équipements qui ont des exigences extrêmement élevées en matière de contrôle des interférences électromagnétiques.

avantage :

- Non magnétique ou faiblement magnétique, adapté aux instruments de précision
- La conductivité thermique et la conductivité électrique sont meilleures que celles du système W-Ni-Fe
- Forte résistance à la corrosion de l'eau de mer, adapté aux domaines marin et médical

défaut :

- La résistance à la traction et la ténacité sont légèrement faibles, ne conviennent pas aux structures à charge dynamique élevée
- Coût légèrement plus élevé et fabrication légèrement plus difficile

Autres systèmes d'alliages de tungstène en développement

des systèmes d'alliages de tungstène ont été développés dans le sens de la fonctionnalisation et du haut de gamme ces dernières années, tels que :

- **Système W-Ni-Co** : utilisé pour remplacer les problèmes magnétiques contenant du fer et améliorer la résistance à la chaleur
- **Système W-Cu** : adapté aux dispositifs à flux thermique élevé, tels que les modules de refroidissement microélectroniques
- **Tige composite structurelle en W-Polymère** : Une structure composite tungstène-polymère développée pour résoudre la contradiction entre le poids et la transformabilité
- **d'alliage de nano-tungstène : Introduction** de poudre de nano-tungstène ou de particules de composés intermétalliques (tels que TiC , LaB₆) pour améliorer la densité du matériau et la résistance

Caractéristiques de la structure organisationnelle et points de contrôle des performances

Les alliages de tungstène haute densité sont des structures composites biphasées « particules de tungstène + phase liante ». La fraction volumique des particules de tungstène dépasse 85 % et joue le rôle principal de support de charge. La phase liante Ni-Fe ou Ni-Cu détermine la ductilité et l'aptitude à la transformation. L'uniformité de l'organisation, la granulométrie des particules de tungstène et la continuité de la phase liante déterminent les propriétés mécaniques finales et la durée de vie de la tige.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Répartition des particules de tungstène** : La taille des particules est généralement comprise entre 10 et 50 μm . Plus la taille des particules est petite, meilleure est la liaison à l'interface et meilleures sont les propriétés mécaniques.
- **Densité de frittage** : Le contrôle de la porosité $< 0,5 \%$ permet d'améliorer la résistance et la conductivité thermique ;
- **Rapport de liant** : un taux trop faible entraînera une fragilité élevée et des difficultés de traitement ; un taux trop élevé entraînera une densité réduite et une résistance insuffisante, généralement contrôlé à 3-10 % en poids ;
- **Uniformité de la composition** : empêche la ségrégation ou l'agglomération des éléments et améliore la consistance du produit ;
- **Contrôle de la microstructure** : Le frittage en phase liquide et le traitement thermique peuvent permettre un raffinement des grains et une structure uniforme, améliorant ainsi la résistance à la fatigue.

Conclusion

Les tiges en alliage de tungstène, systèmes W-Ni-Fe et W-Ni-Cu, répondent à deux applications clés : **les structures à haute résistance et l'électronique faiblement magnétique. Leur flexibilité en termes de contrôle de composition, de régulation organisationnelle et d'adaptation des performances garantit leur caractère irremplaçable dans l'aérospatiale, la défense nationale, l'électronique de précision, le génie nucléaire médical et d'autres domaines. Grâce aux progrès technologiques, les limites de performance et les possibilités d'application des tiges en alliage de tungstène dans la fabrication haut de gamme seront encore élargies grâce au microalliage, au nanorenforcement et aux composites fonctionnels.**

1.3 Tailles, formes et états de surface courants des tiges en alliage de tungstène

En tant que matériau de structure haute performance, les tiges en alliage de tungstène présentent des tailles, des formes et des états de surface variés selon les industries et les environnements d'utilisation. Leur géométrie et leurs caractéristiques de surface influencent non seulement la précision d'assemblage et la durée de vie, mais aussi directement l'efficacité de l'usinage, la stabilité structurelle et la fiabilité de service. Par conséquent, une compréhension approfondie des formes standardisées et personnalisées des tiges en alliage de tungstène est essentielle à la conception des produits et au choix des matériaux d'ingénierie.

1. Dimensions

Les tiges en alliage de tungstène sont généralement divisées en deux catégories : standardisées et personnalisées selon leur utilisation. Les spécifications courantes incluent le diamètre (ou longueur latérale), la longueur, la circularité, la rectitude et les tolérances dimensionnelles.

- **Gamme de diamètres** : 1 mm à 200 mm, les spécifications les plus couramment utilisées sont de 3 mm à 100 mm ;
- **Plage de longueur** : 10 mm ~ 2000 mm, les barres traitées de manière conventionnelle sont principalement contrôlées à 50 mm ~ 1000 mm ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Tolérance de longueur** : généralement $\pm 0,5$ mm, l'usinage de précision peut atteindre $\pm 0,1$ mm ;
- **Erreur de rectitude** : les produits de qualité industrielle sont contrôlés à $0,5$ mm/m et les produits de qualité de précision peuvent atteindre $0,1$ mm/m ;
- **Contrôle de la coaxialité et de la verticalité** : Les tiges en alliage de tungstène utilisées pour les pièces dynamiques nécessitent une cohérence géométrique plus élevée, généralement contrôlée dans la plage de $\pm 0,02$ mm.

Pour les barres utilisées dans des domaines spécifiques (tels que les armes balistiques, les gyroscopes à grande vitesse et les systèmes optiques de précision), le contrôle de la dilatation thermique et la cohérence des dimensions de livraison doivent également être pris en compte. Le contrôle qualité est généralement réalisé en combinaison avec la modélisation CAO et des systèmes de détection tridimensionnelle.

2. Classification des formes.

La conception des formes et de la structure des tiges en alliage de tungstène doit répondre aux exigences d'intégration de différents composants mécaniques, unités de contrôle thermique, connexions électriques ou éléments inertiels. Les principales formes peuvent être résumées comme suit :

1. **Tige ronde solide** : La structure la plus courante, adaptée à la plupart des contrepoids industriels, électrodes et composants inertiels.
2. **Tige creuse** : Elle a pour fonction de réduire le poids ou de refroidir le liquide et est souvent utilisée dans les domaines médical et aérospatial.
3. **Tige carrée / rectangulaire** : Convient aux structures de cadre, aux bases de contact électrique, etc.
4. **Tige profilée** : Avec des conceptions spéciales telles que des fentes, des trous, des évidements, des chanfreins, etc., elle est principalement utilisée pour les pièces d'assemblage personnalisées et les structures intégrées complexes.
5. **Micro Rod** : Le diamètre est inférieur à 2 mm, principalement utilisé dans les composants micro-ondes, la médecine nucléaire, les gyroscopes de précision ou les systèmes MEMS.
6. **Tiges étagées/coniques** : adaptées aux occasions de forte inertie ou de transmission de puissance, répondant aux besoins d'intégration fonctionnelle et structurelle.

3. État de surface

La qualité de la tige en alliage de tungstène influence directement sa résistance à la fatigue, sa précision d'ajustage, sa protection contre la corrosion et sa durée de vie. Les états de surface courants sont les suivants :

1. Le fritté

est une surface non traitée avec une couche de film d'oxyde noir, qui convient à l'usinage ultérieur ou aux pièces structurelles sans surface exposée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. **la tige tournée**

est grossièrement traitée et la rugosité est généralement de Ra 1,6-3,2 μm , ce qui convient aux accessoires de précision moyenne.

3. **Les tiges de terre**

sont rectifiées cylindriquement avec précision pour avoir une excellente qualité de surface et une cohérence dimensionnelle, avec Ra inférieur à 1,0 μm , et sont largement utilisées dans les équipements médicaux et électroniques.

4. **La tige polie**

est ensuite traitée pour obtenir une finition miroir, avec une valeur Ra de 0,2 à 0,4 μm . Elle est souvent utilisée dans les dispositifs exigeant une esthétique soignée, à faible frottement ou liés à l'optique.

5. **La tige revêtue**

utilise la galvanoplastie, le placage chimique ou le PVD pour former une surface fonctionnelle, telle qu'un revêtement Ni, Cr, TiN, pour améliorer la résistance à la corrosion, le contact électrique ou la résistance à l'usure.

6. **Le traitement de surface spécial (électropoli / finition plasma)**

convient aux environnements très propres, aux occasions de rayonnement élevé ou aux équipements de technologie médicale / nucléaire pour améliorer la densité de surface et éliminer les microfissures.

4. Niveau de précision

Selon la précision du traitement et les exigences de test, les tiges en alliage de tungstène peuvent être divisées en trois catégories suivantes :

- **Qualité industrielle (qualité standard)** : Convient pour la protection générale, le support structurel, les composants de contrepoids, tolérance dimensionnelle $\pm 0,5\text{ mm}$;
- **Grade de précision** : Applicable aux composants mobiles, aux composants de guidage et aux systèmes inertiels, avec une tolérance contrôlée à $\pm 0,1\text{ mm}$, Ra $< 1,6\ \mu\text{m}$;
- **Qualité ultra-précise** : utilisée dans les systèmes médicaux, aérospatiaux et gyroscopiques, avec une tolérance dimensionnelle jusqu'à $\pm 0,01\text{ mm}$, Ra $< 0,4\ \mu\text{m}$, et nécessite des normes de test CND et de qualification métallographique.

Face à la demande croissante du marché pour des structures de formes spéciales et des pièces fonctionnelles composites, les tiges en alliage de tungstène affichent une tendance croissante vers des produits haut de gamme, personnalisés et intelligents en termes de taille, de structure et de traitement de surface. À l'avenir, grâce à des technologies de fabrication de pointe telles que l'usinage laser, le micro-fraisage, la rectification ultra-précise, le conditionnement plasma, etc., les tiges en alliage de tungstène continueront d'accroître leur potentiel technique dans des applications clés telles que les structures complexes, les vibrations haute fréquence, les champs thermiques extrêmes et les contrepoids de précision.

1.4 Classification des tiges en alliage de tungstène (par composition/utilisation/méthode de traitement)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les tiges en alliage de tungstène sont largement utilisées dans de nombreux secteurs clés tels que l'aérospatiale, l'énergie nucléaire, le médical, l'industrie militaire et la fabrication haut de gamme. Elles sont de types variés et ont des usages variés. Afin d'optimiser l'organisation du système de production, de guider le choix des matériaux et d'optimiser les procédés, il est généralement nécessaire de classer systématiquement les tiges en alliage de tungstène selon différentes dimensions. Les trois méthodes de classification les plus courantes sont : la composition, l'utilisation et la méthode de traitement.

1. Classification par ingrédients

Les tiges en alliage de tungstène sont principalement composées de tungstène (W) et de métaux de liaison (tels que Ni, Fe, Cu, Co, etc.). Selon les différents systèmes d'alliages, elles peuvent être divisées en :

1. Tige en alliage W-Ni-Fe

- Teneur : W 90–97 %, Ni 2–7 %, Fe 1–3 %
- Caractéristiques : Alliage magnétique, haute résistance, bonne ductilité
- Application : composants inertiels, contrepoids militaires, pièces structurales à haute résistance

2. Tige en alliage W-Ni-Cu

- Contenu : W 90 à 95 %, Ni 2 à 5 %, Cu 2 à 4 %
- Caractéristiques : non magnétique ou faiblement magnétique, bonne conductivité thermique, forte résistance à la corrosion
- Application : équipement médical, médecine nucléaire, composants de contre-mesures électroniques

3. Tige en alliage W-Cu

- Contenu : W 70 à 90 %, Cu 10 à 30 %
- Caractéristiques : Excellente conductivité électrique et thermique, adaptée aux appareils haute puissance
- Application : électrodes, radiateurs, contacts sous vide, etc.

4. Systèmes d'alliages spéciaux (tels que W-Ni-Co, W-Re, W- TiC)

- Caractéristiques : Performances spéciales à haute température ou résistance améliorée aux radiations
- Application : composants de contrôle thermique aérospatiaux, matériaux nucléaires, systèmes de contre-mesures laser

5. Alliage modifié dopé

- terre (Y_2O_3 , CeO_2), carbure (TiC , ZrC), etc.
- Fonction : Améliorer la microstructure, augmenter la résistance à haute température ou à la corrosion

2. Classification par finalité

Selon les scénarios d'utilisation spécifiques des tiges en alliage de tungstène, elles peuvent être divisées dans les catégories suivantes :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Tige de tungstène pour structure

- Fonction : support de charge, support de structure à haute température, pièces de rotor
- Applications typiques : structures inertielles de satellites, gyroscopes, axes de centrage de moteurs

2. Tige de tungstène pour la protection

- Fonction : Protection contre les rayons X, les rayons gamma et les rayonnements neutroniques
- Applications : CT médical, réacteurs nucléaires, conteneurs de transport d'isotopes

3. Tige de tungstène cinétique militaire

- Fonction : impact à haute densité, perforation d'armure, destruction par énergie cinétique
- Application : noyau APFSDS, matériau de noyau hautement explosif, contrepoids de dérive

4. Tiges de tungstène pour appareils électroniques

- Fonction : conductivité électrique et thermique, diffusion thermique, absorption des micro-ondes
- Application : Emballage de puces, structure de refroidissement, contact électrique d'électrodes

5. Tiges de tungstène pour dispositifs médicaux

- Fonction : aiguille de radiothérapie, composant de modulation de l'intensité tumorale, micro contrepoids
- Exigences : non magnétique, ultra-propre, haute densité

6. Tige de tungstène pour la recherche scientifique

- Applications : accélérateurs de particules, cibles de sources de neutrons, anodes sous vide, instruments expérimentaux

3. Classification par méthode de traitement

Les tiges en alliage de tungstène varient selon le procédé de fabrication. Les méthodes de traitement les plus courantes sont :

1. Tiges pressées par métallurgie des poudres (CIP / moulées)

- Procédé : pressage isostatique à froid, pressage uniaxial suivi d'un frittage à haute température
- Caractéristiques : organisation dense, moulage par lots

2. Tige pressée isostatique à chaud (tige HIP)

- Procédé : Après encapsulation, l'ensemble est densifié sous haute température et haute pression
- Avantages : Densité ultra-élevée, porosité extrêmement faible, adapté aux exigences de fiabilité élevées

3. Tiges extrudées

- Procédé : L'alliage de tungstène devrait être extrudé à chaud en longues bandes
- Application : Communication micro-ondes, composants de contrôle thermique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. **Tiges de tournage/tiges de meulage**
 - Procédé : Des tiges finies de haute précision sont obtenues par usinage
 - Caractéristiques : $Ra < 1 \mu m$, tolérance dimensionnelle $\pm 0,01 mm$
5. **Tiges moulées par injection (procédé MIM)**
 - Caractéristiques : Convient aux barres de structure petite et complexe
 - Application : Pièces médicales en tungstène, micro-systèmes inertiels
6. **Tige vierge frittée (tige à peau noire)**
 - Statut : Non traité ou seulement coupé au préalable, adapté à un traitement personnalisé ultérieur
7. **Tiges de tungstène imprimées en 3D (additif) Fabrication)**
 - Statut : Encore au stade exploratoire, adapté aux produits en petites séries avec des structures complexes et des exigences flexibles

Résumer

En tant que matériau structurel fonctionnel, la classification des tiges en alliage de tungstène constitue non seulement la base de la standardisation et de la sérialisation des produits, mais joue également un rôle important dans la conception des performances, la sélection des procédés et la promotion commerciale. La composition du matériau permet de clarifier le système, de positionner précisément la fonction en fonction de l'objectif et d'obtenir le meilleur équilibre entre qualité et efficacité grâce au procédé. À l'avenir, avec l'évolution de la fabrication haut de gamme vers l'intelligence et la personnalisation, le système de classification multidimensionnel des tiges en alliage de tungstène s'affinera et tendra à être numérisé et modulaire, offrant ainsi un soutien plus scientifique et systématique à la recherche et au développement de matériaux et aux applications industrielles.

1.5 Comparaison entre la tige en alliage de tungstène et la tige en cuivre de tungstène, la tige de tungstène et d'autres matériaux

Les tiges en alliage de tungstène, les tiges en cuivre et les tiges en tungstène pur sont des matériaux à base de tungstène couramment utilisés dans l'industrie. En raison de leurs propriétés physiques et de leurs domaines d'application différents, ils jouent un rôle important dans les secteurs de la fabrication et de l'électronique. Comprendre leurs différences vous aidera à faire des choix judicieux lors de la conception et de la sélection des matériaux.

1.5.1 Comparaison de la composition et des propriétés de base

| Type de matériau | Ingrédients principaux | Densité (g/cm ³) | dureté | Conductivité thermique | Conductivité | Résistance mécanique | Caractéristiques principales |
|------------------------------|--|------------------------------|-----------|------------------------|----------------|----------------------|--|
| Tige en alliage de tungstène | Tungstène + éléments d'alliage tels que le nickel, | 17,0 ~ 18,5 | Plus haut | moyen | Faible à moyen | à excellent | Haute densité, haute résistance, les propriétés mécaniques sont meilleures que |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------|-------------|------------|------------|-----------|---------|--|
| | le fer ou le cuivre | | | | | | celles de la tige de tungstène pur |
| Tige de cuivre et de tungstène | Tungstène + Cuivre | 14,0 ~ 16,0 | moyen | Très élevé | Plus haut | mieux | Combinant la haute densité du tungstène avec la bonne conductivité électrique et thermique du cuivre, il offre d'excellentes performances de gestion thermique |
| Tige de tungstène pur | Tungstène | 19,3 | Très élevé | Faible | Faible | Fragile | Densité la plus élevée, résistance aux températures élevées, dureté élevée, mais relativement fragile |

1.5.2 Densité et poids

- **Les tiges de tungstène** ont la teneur en tungstène la plus élevée et la densité la plus élevée (19,3 g/cm³), elles conviennent donc aux applications avec des exigences extrêmement élevées en matière de poids et de densité, telles que les contrepoids, le blindage contre les radiations, etc.
- **Les tiges en alliage de tungstène** ont une densité légèrement inférieure, mais restent des matériaux à haute densité, et leur résistance est meilleure que celle du tungstène pur, ce qui les rend adaptées à la fabrication de pièces à haute résistance et à haute densité.
- **La tige de cuivre tungstène** a une densité inférieure à celle du tungstène et des alliages de tungstène car elle est dopée au cuivre, mais le cuivre a une excellente conductivité thermique, ce qui le rend plus populaire dans les situations où une gestion thermique est requise.

1.5.3 Conductivité thermique et électrique

- **Les tiges de cuivre tungstène** présentent une teneur en cuivre plus élevée et une conductivité thermique et électrique nettement supérieure à celles des tiges en alliage de tungstène et des tiges de tungstène pur. Elles sont donc largement utilisées dans les radiateurs électroniques, les électrodes et les dispositifs électroniques sous vide.
- **Les tiges en alliage de tungstène** sont moyennes et la conductivité électrique est inférieure à celle du cuivre tungstène, mais meilleure que celle du tungstène pur, ce qui convient aux structures mécaniques et aux composants à haute température.
- **Les tiges de tungstène pur ont une conductivité thermique et électrique relativement faible** et sont plus couramment utilisées dans les environnements nécessitant une résistance aux températures élevées et une densité élevée.

1.5.4 Propriétés mécaniques et aptitude à la transformation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Les tiges en alliage de tungstène** présentent une ténacité et une résistance mécanique nettement améliorées grâce à l'ajout d'éléments d'alliage. Leurs performances d'usinage sont supérieures à celles du tungstène pur et elles conviennent parfaitement à l'usinage de pièces complexes.
- **La tige de cuivre tungstène** combine la résistance du tungstène et la ductilité du cuivre, avec une bonne ténacité et une bonne résistance à la fatigue thermique, mais la teneur en cuivre limite ses performances à haute température.
- **Les tiges de tungstène pur** présentent une dureté et une fragilité élevées, sont difficiles à usiner et sujettes aux fissures. Elles sont principalement utilisées dans les environnements à haute température et pour la fabrication de pièces structurales.

1.5.5 Domaines d'application typiques

| Matériel | Exemples d'application |
|---------------------------------------|---|
| Tige en alliage de tungstène | Contrepoids de poids, pièces structurales à haute résistance, noyaux perforants, pièces aérospatiales |
| Tige de cuivre et de tungstène | Électrodes, radiateurs, composants de tubes à vide, dispositifs à micro-ondes |
| Tige de tungstène pur | Pièces de four à haute température, filaments, blindage contre les radiations, matériaux pour l'industrie nucléaire |

Résumer

Les tiges en alliage de tungstène, en cuivre-tungstène et en tungstène pur présentent chacune leurs avantages. Les tiges en alliage de tungstène sont largement utilisées dans les structures mécaniques grâce à leur densité élevée et à leur résistance mécanique. Les tiges en cuivre-tungstène sont devenues un matériau indispensable dans l'industrie électronique grâce à leur excellente conductivité thermique et électrique. Les tiges en tungstène pur sont adaptées aux environnements spécifiques à haute température et aux radiations grâce à leur densité extrêmement élevée et à leur résistance aux hautes températures. Un choix judicieux des matériaux nécessite une prise en compte complète de facteurs tels que la densité, la résistance, la conductivité thermique et l'environnement d'application.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

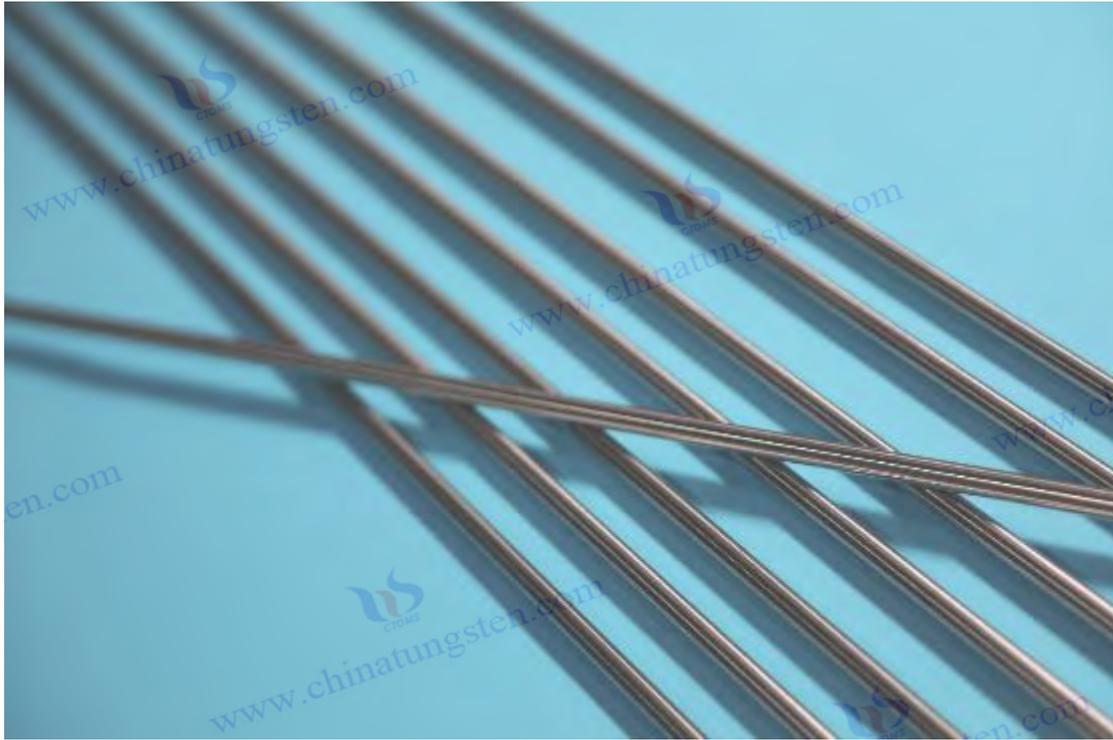
Official website: www.tungsten-alloy.com



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



Chapitre 2 Propriétés physiques et mécaniques des tiges en alliage de tungstène

2.1 Contrôle de la densité, de la gravité spécifique et de la précision dimensionnelle

En tant que matériau à haute densité, le contrôle de la densité et de la taille des tiges en alliage de tungstène est directement lié à leurs performances et aux exigences de qualité des applications ultérieures. Un contrôle précis de la densité et de la taille est essentiel pour garantir la stabilité et la régularité des tiges en alliage de tungstène.

2.1.1 Densité et gravité spécifique

- **La masse volumique** est la masse d'un matériau par unité de volume et constitue l'indicateur clé de la qualité des tiges en alliage de tungstène. La masse volumique des tiges en alliage de tungstène est généralement comprise entre 17,0 et 18,5 g/cm³, et sa valeur spécifique dépend de la teneur en tungstène et de la proportion d'éléments d'alliage.
- **La densité** est le rapport entre la masse volumique du matériau et celle de l'eau. La masse volumique de l'eau étant de 1 g/cm³, la densité d'une tige en alliage de tungstène est sensiblement égale à sa masse volumique.

Un contrôle précis de la densité peut garantir que le matériau atteint les propriétés physiques attendues, telles que les exigences de répartition précise du poids, la résistance mécanique et l'effet de blindage électromagnétique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un écart de densité trop important entraînera des fluctuations dans les performances du produit et, dans les cas graves, affectera l'assemblage et l'ajustement des pièces ainsi que la sécurité du produit final.

2.1.2 Facteurs clés du contrôle de la densité

- **composants de la matière première** : Plus la teneur en tungstène est élevée, plus la densité est élevée. Un rapport raisonnable entre le tungstène et les éléments d'alliage (tels que le nickel, le fer et le cuivre) est essentiel pour contrôler la densité.
- **Paramètres du procédé de frittage** : la température, la durée et le contrôle de l'atmosphère ont un impact significatif sur la densité. Une température de frittage trop basse peut facilement entraîner une augmentation de la porosité et une diminution de la densité ; une température de frittage trop élevée peut entraîner une surcuisson et une diminution des performances du matériau.
- **Taille et uniformité des particules de poudre** : Une poudre fine et un mélange uniforme contribuent à améliorer la densité, à réduire la porosité et à augmenter la densité du matériau.
- **Travail à froid et traitement thermique** : Des procédés appropriés de forgeage, d'extrusion et de traitement thermique peuvent éliminer davantage la porosité interne du matériau et améliorer la densité.

2.1.3 Contrôle de la précision dimensionnelle

La longueur, le diamètre et les dimensions extérieures d'une tige en alliage de tungstène varient selon sa valeur de conception. Un contrôle dimensionnel de haute précision garantit la stabilité et la fiabilité des tiges en alliage de tungstène pendant l'usinage, l'assemblage et l'utilisation.

- **La tolérance dimensionnelle** est généralement déterminée en fonction des exigences et des normes du client. En général, la tolérance de diamètre peut être contrôlée dans une plage de $\pm 0,01$ mm à $\pm 0,05$ mm.
- **La rugosité de surface** contribue également à la précision dimensionnelle. Un bon état de surface peut réduire la difficulté d'usinage et améliorer les performances des pièces.
- Des équipements de traitement et des instruments de mesure avancés (tels que des machines de mesure tridimensionnelles et des jauges de diamètre laser) sont utilisés pour garantir une précision et une cohérence dimensionnelles élevées.

2.1.4 Mesures techniques pour le contrôle de la précision dimensionnelle

- **Équipement de traitement CNC** : utilisez des tours et des meuleuses CNC de haute précision pour le traitement afin de garantir une précision dimensionnelle stable.
- **Détection en ligne et contrôle de rétroaction** : Un système de mesure automatique est utilisé pendant le processus de production pour surveiller les écarts dimensionnels en temps réel et effectuer des ajustements .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Optimisation du procédé de traitement thermique** : contrôler la déformation lors du traitement thermique pour éviter la perte de contrôle dimensionnelle.
- **Spécifications de processus strictes** : y compris la découpe, le meulage, le polissage et d'autres processus pour garantir que chaque étape du traitement répond aux exigences dimensionnelles.

résumé

Les tiges en alliage de tungstène sont essentielles pour garantir leurs hautes performances. La précision de la densité influence directement les propriétés mécaniques et les effets d'application du matériau. Un contrôle rigoureux de la précision dimensionnelle garantit les performances de traitement du produit et la fiabilité de l'assemblage final. L'optimisation du ratio de matières premières, des paramètres de traitement et des technologies de traitement et de test avancées permet de garantir efficacement que les propriétés physiques et mécaniques des tiges en alliage de tungstène répondent aux exigences de conception.

2.2 Résistance à la traction, limite d'élasticité et allongement

Les tiges en alliage de tungstène sont des indicateurs importants de leur capacité à supporter des charges dans des applications pratiques. Parmi ces paramètres, la résistance à la traction, la limite d'élasticité et l'allongement sont essentiels pour évaluer la résistance et la plasticité des matériaux. La compréhension et la maîtrise de ces paramètres de performance contribueront à garantir la sécurité et la fiabilité des tiges en alliage de tungstène pendant leur fabrication et leur utilisation.

2.2.1 Résistance à la traction

La résistance à la traction désigne la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter lors d'un essai de traction, reflétant sa capacité à résister à la rupture. La résistance à la traction des tiges en alliage de tungstène est généralement élevée, comprise entre 600 et 1 200 MPa, et sa valeur spécifique dépend de la composition de l'alliage, du procédé de fabrication et du traitement thermique.

- Une teneur élevée en tungstène augmente généralement la résistance à la traction du matériau, mais un rapport de tungstène trop élevé peut entraîner une réduction de la ténacité.
- Grâce à une conception d'alliage raisonnable et à un processus de traitement thermique, la plasticité et la ténacité du matériau peuvent être améliorées tout en garantissant une résistance élevée.
- Les tiges en alliage de tungstène à haute résistance à la traction conviennent aux pièces mécaniques et aux pièces structurelles qui supportent de grandes charges de traction.

2.2.2 Limite d'élasticité

La limite d'élasticité est la valeur de contrainte à laquelle un matériau commence à subir une déformation plastique permanente lorsqu'il est soumis à une contrainte, reflétant sa limite

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

élastoplastique. La limite d'élasticité des tiges en alliage de tungstène est généralement légèrement inférieure à la résistance à la traction, généralement comprise entre 400 et 900 MPa.

- La limite d'élasticité affecte la marge de sécurité du matériau dans les applications pratiques.
- Pour les tiges en alliage de tungstène, une limite d'élasticité plus élevée signifie qu'elles peuvent supporter des contraintes de travail plus importantes pendant l'utilisation sans déformation permanente.
- La limite d'élasticité peut être efficacement améliorée en optimisant la température de frittage et le traitement thermomécanique ultérieur.

2.2.3 Allongement

L'allongement est la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement avant de se rompre, généralement exprimé en pourcentage. Il s'agit d'un indicateur clé pour mesurer la ténacité et la plasticité d'un matériau. L'allongement des tiges en alliage de tungstène est généralement faible, compris entre 1 et 10 %.

- Un faible allongement indique que le matériau est cassant et sujet à la rupture ; un allongement élevé indique que le matériau a une bonne capacité de déformation plastique.
- Les éléments d'alliage tels que le nickel et le fer ajoutés à l'alliage de tungstène contribuent à augmenter l'allongement et rendent le matériau moins sujet aux fissures fragiles.
- L'augmentation de l'allongement est bénéfique pour le formage et l'utilisation sûre des tiges en alliage de tungstène dans des conditions de travail complexes.

2.2.4 Facteurs affectant les performances mécaniques

- **Rapport de composition** : Plus la teneur en tungstène est élevée, plus la résistance est élevée, mais l'allongement peut diminuer ; l'ajout d'éléments d'alliage tels que le nickel et le fer peut améliorer la ténacité.
- **Processus de frittage** : La température, le temps et l'atmosphère de frittage affectent directement la microstructure et la densité du matériau, affectant ainsi la résistance et la plasticité.
- **Traitement thermique et usinage** : Des traitements thermiques appropriés tels que le recuit, le vieillissement et les procédés d'usinage (forgeage, extrusion) peuvent ajuster la structure interne du matériau et améliorer les propriétés mécaniques.
- **Granulométrie** : Une structure de grain fine et uniforme contribue à améliorer la résistance et la ténacité.

résumé

La résistance à la traction, la limite d'élasticité et l'allongement des tiges en alliage de tungstène sont des indicateurs importants pour mesurer leurs propriétés mécaniques globales. En optimisant la composition et le contrôle du procédé, les tiges en alliage de tungstène peuvent obtenir une plasticité appropriée tout en garantissant une résistance élevée, répondant ainsi aux exigences de performance des matériaux de différentes applications industrielles. La maîtrise de ces paramètres de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

performance est essentielle à l'assurance qualité et au développement des applications des tiges en alliage de tungstène.

2.3 Dureté et résistance aux chocs

La dureté et la résistance aux chocs des tiges en alliage de tungstène sont des indicateurs importants pour évaluer leur résistance à l'usure et aux dommages, et jouent un rôle essentiel pour garantir la stabilité et la durée de vie des matériaux dans des conditions de travail complexes. Un contrôle rigoureux de la dureté et de la résistance aux chocs est essentiel pour obtenir des performances équilibrées des tiges en alliage de tungstène.

2.3.1 Dureté

La dureté reflète la capacité d'un matériau à résister à la déformation plastique locale et à l'usure, et est généralement mesurée à l'aide de méthodes telles que la dureté Brinell (HB), la dureté Rockwell (HRC) ou la dureté Vickers (HV).

- Les tiges en alliage de tungstène sont généralement comprises entre **200 et 400 HB**, et la valeur spécifique varie en fonction de la teneur en tungstène et du type et de la proportion d'éléments d'alliage.
- Une teneur élevée en tungstène correspond généralement à une dureté plus élevée, et l'ajout d'éléments d'alliage tels que le nickel et le fer peut ajuster l'équilibre entre dureté et ténacité.
- Les alliages de tungstène à dureté plus élevée conviennent à la fabrication de pièces résistantes à l'usure et de composants résistants aux rayures.
- La dureté peut être encore augmentée par un traitement thermique (tel qu'un traitement de vieillissement).

2.3.2 Résistance aux chocs

La résistance aux chocs est la capacité d'un matériau à résister à une force externe soudaine sans se rompre, et est généralement évaluée par le test d'impact Charpy ou le test d'impact Izod.

- Les tiges en alliage de tungstène ont généralement une résistance aux chocs modérée à bonne, avec une énergie d'absorption d'impact typique allant de **5 à 20 J/cm²**.
- La résistance aux chocs est considérablement affectée par la structure du grain du matériau, les éléments d'alliage et le processus de traitement thermique.
- L'ajout d'éléments tels que le nickel et le fer à l'alliage peut améliorer considérablement la ténacité et la résistance aux chocs du matériau et réduire le risque de fracture fragile.
- Un traitement thermomécanique optimisé (par exemple, forgeage, extrusion) peut également contribuer à améliorer la résistance aux chocs.

2.3.3 Équilibre entre dureté et résistance aux chocs

nécessitent généralement de trouver le meilleur équilibre entre dureté et résistance aux chocs :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Bien qu'une dureté trop élevée améliore la résistance à l'usure, elle peut rendre le matériau cassant et réduire sa résistance aux chocs.
- Une dureté appropriée combinée à une bonne ténacité peut garantir que le matériau est à la fois résistant à l'usure et difficile à casser dans des environnements d'utilisation à haute intensité.
- Les tiges en alliage de tungstène, telles que la conception de la composition de l'alliage, le contrôle des paramètres de frittage et l'optimisation des procédures de traitement thermique et de travail à froid, sont la clé pour atteindre l'équilibre des performances.

résumé

La dureté et la résistance aux chocs sont deux aspects importants des propriétés physiques et mécaniques des tiges en alliage de tungstène. Grâce à un dosage approprié des matériaux et à un contrôle rigoureux du procédé, des tiges en alliage de tungstène alliant dureté élevée et bonne résistance aux chocs peuvent être obtenues, répondant ainsi aux exigences de différents secteurs industriels en matière de résistance à l'usure et aux dommages. Un équilibre judicieux des performances peut améliorer la fiabilité des applications et la durée de vie des tiges en alliage de tungstène.

2.4 Conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique et performance à haute température

Les tiges en alliage de tungstène sont largement utilisées dans de nombreux domaines industriels, notamment dans les environnements à haute température et à forte charge thermique. Leur conductivité thermique, leur coefficient de dilatation thermique et leur performance à haute température influencent directement la stabilité et la durée de vie du matériau. La compréhension et l'optimisation de ces propriétés thermophysiques sont essentielles à la conception de produits en alliage de tungstène hautes performances.

2.4.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique est la capacité d'un matériau à transférer la chaleur. La conductivité thermique de l'alliage de tungstène se situe entre celle du tungstène pur et celle des autres alliages, généralement comprise entre **70 et 120 W / (m · K)**.

- Le tungstène lui-même a une excellente conductivité thermique (environ $170 \text{ W / (m \cdot K)}$), mais l'ajout d'éléments d'alliage tels que le nickel et le fer réduira la conductivité thermique globale.
- L'alliage de tungstène répond à de nombreuses applications nécessitant une dissipation rapide de la chaleur, telles que les radiateurs électroniques, les outillages à haute température et les équipements d'échange de chaleur.
- La densité et la structure des grains du matériau ont un impact significatif sur la conductivité thermique, et les processus de frittage et de traitement thermique doivent être contrôlés pour améliorer la densité et optimiser la conductivité thermique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.4.2 Coefficient de dilatation thermique (CTE)

Le coefficient de dilatation thermique indique la capacité d'un matériau à se dilater sous l'effet des variations de température. Le coefficient de dilatation thermique de l'alliage de tungstène est relativement faible, de l'ordre de $4,5 \times 10^{-6}$ à $6,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

- Le faible coefficient de dilatation thermique permet à l'alliage de tungstène de présenter de faibles variations dimensionnelles et une faible contrainte thermique dans les environnements à haute température, ce qui le rend adapté à une utilisation dans les équipements de précision et les pièces structurelles à haute température.
- L'ajout d'éléments d'alliage augmentera légèrement le coefficient de dilatation thermique, mais il restera bien inférieur à celui de nombreux matériaux métalliques couramment utilisés (tels que le cuivre et l'aluminium).
- La stabilité du coefficient de dilatation thermique est très importante pour éviter les fissures de fatigue thermique lors du soudage, de l'assemblage et de l'utilisation.

2.4.3 Performances à haute température

Les tiges en alliage de tungstène présentent d'excellentes propriétés à haute température, notamment un point de fusion élevé, une bonne résistance à haute température et une résistance à la fatigue thermique.

- Le point de fusion du tungstène atteint $3\,422 \text{ °C}$. Bien que légèrement inférieur, l'alliage de tungstène conserve de bonnes propriétés mécaniques dans un environnement à plus de $1\,500 \text{ °C}$.
- Sa résistance à l'oxydation à haute température est légèrement inférieure à celle du tungstène pur, et il doit être revêtu en surface ou utilisé dans une atmosphère protectrice pour éviter les dommages dus à l'oxydation.
- L'alliage de tungstène le rend largement utilisé dans l'aérospatiale, l'industrie militaire et la fabrication de fours à haute température.
- La résistance à la fatigue thermique détermine la durée de vie du matériau lors de cycles répétés de chauffage et de refroidissement. L'optimisation de la composition et de la microstructure du matériau peut améliorer sa résistance à la fatigue thermique.

résumé

Les tiges en alliage de tungstène présentent une bonne conductivité thermique et un coefficient de dilatation thermique faible et stable, ce qui leur confère une excellente performance dans les environnements à haute température. Leur résistance à haute température et leur résistance à la fatigue thermique garantissent une utilisation fiable dans des conditions de travail extrêmes. Grâce à une conception rationnelle des matériaux et à l'optimisation des procédés, les propriétés thermophysiques des tiges en alliage de tungstène peuvent être encore améliorées pour répondre aux besoins des secteurs les plus exigeants.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.5 Propriétés électriques, réponse magnétique et résistance aux rayonnements

Les tiges en alliage de tungstène trouvent des applications importantes dans certains domaines spécifiques tels que les dispositifs électroniques, le blindage magnétique et l'industrie nucléaire. Leurs propriétés électriques, leur réponse magnétique et leur résistance aux radiations sont des indicateurs clés pour évaluer l'applicabilité des matériaux. La maîtrise de ces propriétés permettra d'optimiser la conception des matériaux et d'élargir leur champ d'application.

2.5.1 Propriétés électriques

L'alliage de tungstène est considérablement affecté par la composition de l'alliage et est généralement inférieur à celui du tungstène pur mais supérieur à celui des autres alliages de métaux lourds.

- La conductivité électrique du tungstène pur est relativement élevée, environ 18×10^6 S/m, mais la conductivité électrique de l'alliage de tungstène tombe généralement à $5 \sim 12 \times 10^6$ S/m en raison de la présence d'éléments d'alliage tels que le nickel et le fer.
- La résistivité de l'alliage de tungstène est supérieure à celle du tungstène pur et convient aux applications qui nécessitent une certaine résistance mais également une résistance élevée, telles que les éléments de résistance, les matériaux d'électrodes, etc.
- L'optimisation du rapport de composition et du processus de traitement thermique peut améliorer les propriétés électriques et atteindre un équilibre entre résistance et conductivité.

2.5.2 Réponse magnétique

Le tungstène est un matériau paramagnétique. Les propriétés magnétiques des alliages de tungstène dépendent principalement du type et de la teneur en éléments d'alliage.

- L'ajout d'éléments du groupe du fer (tels que le fer et le nickel) améliorera la réponse magnétique de l'alliage, qui peut présenter un certain ferromagnétisme ou paramagnétisme.
- L'alliage de tungstène a un impact sur sa stabilité dans les matériaux de blindage magnétique et les environnements de champ magnétique.
- Dans certaines applications, les alliages de tungstène à faible réponse magnétique sont préférés pour éviter les interférences du champ magnétique.

2.5.3 Résistance aux radiations

Le tungstène et les alliages de tungstène sont largement utilisés dans l'industrie nucléaire et la radioprotection en raison de leur numéro atomique et de leur densité élevés, et présentent une bonne résistance aux radiations.

- L'alliage de tungstène a un excellent effet de blindage sur les rayonnements électromagnétiques tels que les neutrons et les rayons gamma, et est souvent utilisé dans les matériaux de protection des réacteurs nucléaires et les couvercles de protection des équipements radioactifs.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- L'ajout d'éléments d'alliage ne réduit généralement pas de manière significative la résistance aux radiations, mais il convient de prêter attention à l'uniformité et à la densité de l'alliage pour éviter la pénétration des radiations.
- L'alliage de tungstène présente une bonne stabilité structurelle et une bonne résistance aux dommages causés par les radiations dans les environnements irradiés et convient à une utilisation à long terme.

résumé

Les tiges en alliage de tungstène constituent la base de leur application dans les domaines de l'électronique, du blindage magnétique et de l'industrie nucléaire. En ajustant la composition de l'alliage et les paramètres de fabrication, les performances peuvent être optimisées et personnalisées pour répondre aux besoins des différents environnements industriels et optimiser la valeur d'utilisation globale du matériau.

2.6 Analyse de la résistance à la corrosion et de la stabilité chimique

Les tiges en alliage de tungstène sont exposées aux agents chimiques et à l'air humide dans divers environnements industriels. Leur résistance à la corrosion et leur stabilité chimique sont des propriétés essentielles pour garantir une utilisation fiable à long terme du matériau. Une analyse approfondie de la résistance à la corrosion des alliages de tungstène peut orienter le choix des matériaux et la conception des mesures de protection.

2.6.1 Résistance à la corrosion

L'alliage de tungstène présente une bonne résistance à la corrosion, qui se manifeste principalement par :

- **des milieux acides et alcalins** , en particulier d'excellentes performances dans les environnements neutres ou acides faibles, et convient aux équipements chimiques et aux composants d'instruments.
- **Un film d'oxyde stable se forme à la surface du tungstène** , ce qui peut isoler efficacement le milieu corrosif et retarder la corrosion supplémentaire du matériau.
- Dans un acide oxydant fort (tel que l'acide nitrique, l'acide perchlorique), la résistance à la corrosion de l'alliage de tungstène peut être remise en question et des mesures de protection doivent être prises.
- La teneur et la répartition des éléments d'alliage (tels que le nickel et le fer) influencent la résistance globale à la corrosion de l'alliage de tungstène. Une structure uniforme de l'alliage contribue à améliorer l'uniformité et la résistance à la corrosion.

2.6.2 Stabilité chimique

L'alliage de tungstène se caractérise par la stabilité de ses propriétés chimiques dans divers environnements. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Le point de fusion élevé et la stabilité thermique** rendent l'alliage de tungstène stable à haute température et dans un environnement difficile, et difficile à décomposer ou à déformer.
- Il présente une bonne stabilité dans la plupart des milieux chimiques courants tels que l'eau et les solutions alcalines.
- À l'air et à température ambiante, le film d'oxyde à la surface de l'alliage de tungstène peut empêcher une oxydation supplémentaire et améliorer la durabilité du matériau.
- Lorsqu'il est utilisé dans des environnements extrêmes tels que des acides forts ou des alcalis, une couche de protection du matériau ou un processus spécial est nécessaire pour améliorer la stabilité.

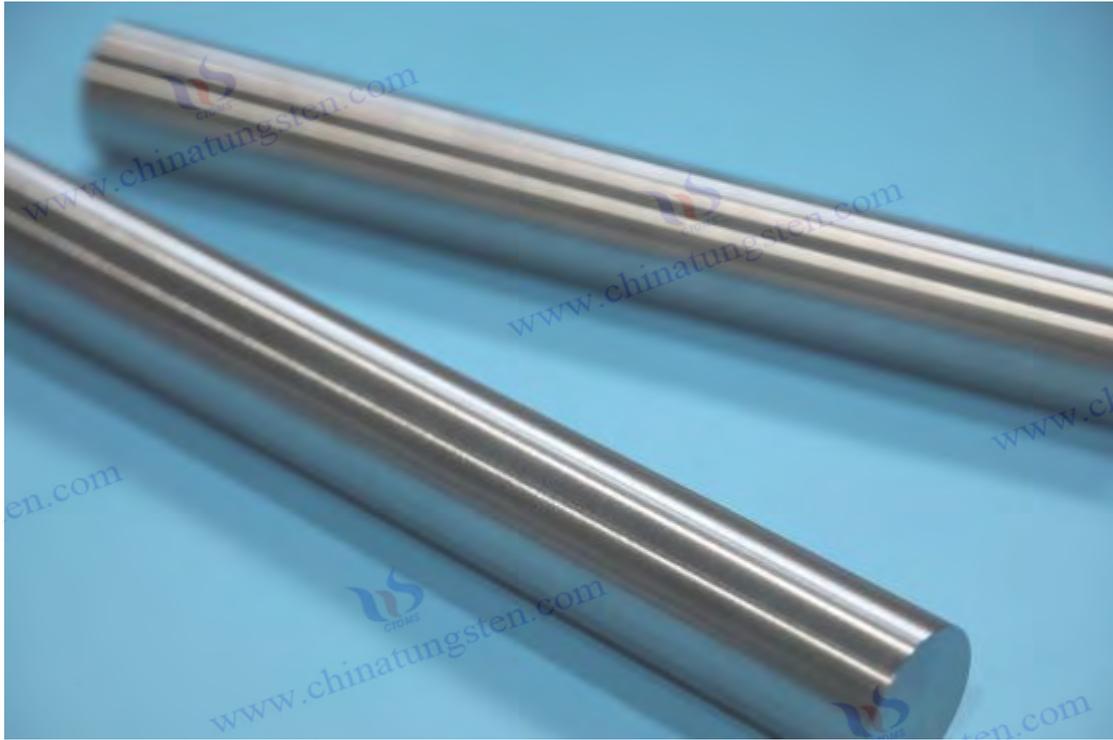
2.6.3 Facteurs affectant la résistance à la corrosion et la stabilité chimique

- **Composition et microstructure de l'alliage** : Le type et la répartition des éléments d'alliage affectent la formation et la stabilité du film d'oxyde et donc le comportement à la corrosion.
- **Traitement de surface** : Le polissage, la pulvérisation ou le traitement de revêtement peuvent améliorer efficacement la résistance à la corrosion du matériau.
- **Les conditions environnementales** : température, concentration du milieu, valeur du pH, etc. affectent directement le taux de corrosion et la durée de vie du matériau.
- **Procédé de fabrication** : La haute densité et la microstructure uniforme aident à réduire les points de corrosion et à prolonger la durée de vie.

résumé

Les tiges en alliage de tungstène présentent une excellente résistance à la corrosion et une excellente stabilité chimique, et conviennent à une utilisation dans divers environnements difficiles. Grâce à une conception rationnelle de la composition de l'alliage, à l'optimisation des procédés de fabrication et à l'adoption de mesures de protection de surface, la résistance à la corrosion et la durée de vie des tiges en alliage de tungstène peuvent être améliorées pour répondre aux besoins de différents secteurs industriels.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 3 Technologie de préparation et de formage des tiges en alliage de tungstène

3.1 Préparation des matières premières et caractéristiques de la poudre

La qualité des tiges en alliage de tungstène dépend fortement de la pureté, de la granulométrie, de la morphologie et de l'homogénéité du mélange des matières premières utilisées. Une préparation rigoureuse des matières premières et un contrôle rigoureux des propriétés de la poudre sont essentiels pour obtenir d'excellentes propriétés physiques et mécaniques et une excellente stabilité des tiges en alliage de tungstène. Cette section détaille la sélection des matières premières, le prétraitement, la préparation de la poudre et l'influence de leurs propriétés sur les procédés ultérieurs et les performances du produit lors de la préparation des tiges en alliage de tungstène.

3.1.1 Sources et types de poudre de tungstène

La poudre de tungstène est la matière première principale pour la production de tiges en alliage de tungstène. Les poudres de tungstène les plus couramment utilisées sont :

- **Poudre de tungstène chimiquement réduite** : obtenue par réduction du tungstate dans l'hydrogène, avec une pureté élevée et une bonne morphologie des particules, adaptée à la préparation d'alliages de tungstène hautes performances.
- **Poudre de tungstène à réduction carbothermique** : préparée par la méthode de réduction carbothermique, avec un faible coût, mais une teneur en impuretés relativement élevée et une large distribution granulométrique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Poudre de tungstène séchée par pulvérisation** : utilisée pour produire de la poudre de tungstène de haute qualité avec des particules uniformes et une morphologie de particules régulière, ce qui est pratique pour le pressage et le frittage ultérieurs.
- **Poudre de tungstène sphérique** : préparée par sphéroïdisation au plasma et d'autres technologies, avec une bonne fluidité et densité apparente, adaptée à l'alliage de tungstène haute performance de la métallurgie des poudres.

Lors de la sélection de la poudre de tungstène, la pureté, la taille des particules, la morphologie et les facteurs de prix doivent être pris en compte de manière exhaustive pour répondre aux exigences spécifiques du processus et aux normes de performance.

3.1.2 Sélection de la poudre d'élément d'alliage

Les alliages de tungstène sont généralement dopés avec des éléments d'alliage tels que le nickel, le fer et le cuivre, mélangés à de la poudre de tungstène. La granulométrie et la morphologie de la poudre d'alliage influencent grandement l'uniformité du mélange et les propriétés finales du matériau.

- **Poudre de nickel** : La poudre de nickel sphérique est couramment utilisée avec une taille de particule uniforme, ce qui est bénéfique pour améliorer l'uniformité du mélange et la densité de frittage.
- **Poudre de fer** : utilisez de la poudre de fer de haute pureté et à faible teneur en oxygène pour éviter que les impuretés n'affectent les propriétés du matériau.
- **Poudre de cuivre** : La poudre de cuivre sphérique ou en paillettes est couramment utilisée. Une bonne conductivité thermique est particulièrement importante pour la préparation d'alliages tungstène-cuivre.

La poudre d'élément d'alliage doit maintenir une distribution uniforme des particules et éviter l'agglomération pour garantir l'uniformité de la composition de l'alliage à l'échelle microscopique.

3.1.3 Procédé de prétraitement des poudres

Le prétraitement des poudres est essentiel pour améliorer les performances des particules et les effets de mélange. Les méthodes de prétraitement les plus courantes sont les suivantes :

- **Traitement de séchage** : éliminer l'humidité adsorbée sur la surface de la poudre pour éviter la formation de pores pendant le processus de frittage.
- **Criblage et calibrage** : Les poudres de différentes granulométries sont séparées par des tamis pour obtenir des poudres mixtes avec une distribution granulométrique uniforme et améliorer la densité de pressage.
- **Activation de surface** : Activer mécaniquement ou chimiquement la poudre pour améliorer la force de liaison entre les particules et favoriser la densité de frittage.
- **Mélange et homogénéisation** : Utilisez des broyeurs à boulets, des mélangeurs et d'autres équipements pour mélanger uniformément pendant une longue période afin d'assurer une distribution uniforme des éléments d'alliage et d'éviter des performances inégales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1.4 Distribution granulométrique et morphologie des poudres

La distribution granulométrique a une influence importante sur la densité, les propriétés mécaniques et les performances de traitement des tiges en alliage de tungstène :

- **Une poudre fine** est bénéfique pour améliorer la densité de frittage et les propriétés mécaniques, mais une poudre trop fine est facile à agglomérer, ce qui affecte la fluidité et les performances de traitement.
- **La poudre grossière** a une bonne fluidité, mais présente une grande porosité et une faible densité lors du frittage.
- **La distribution granulométrique idéale** est généralement une distribution à large spectre, c'est-à-dire que la poudre fine remplit les espaces entre les poudres grossières pour obtenir une densité élevée.

Apparence:

- **La poudre sphérique** présente une bonne fluidité et une bonne densité apparente, ce qui est propice au processus de pressage et de frittage.
- **Les poudres irrégulières** ont tendance à former des vides entre les poudres, mais elles contribuent parfois à améliorer la résistance mécanique du verrouillage.

3.1.5 Mélange de poudre et contrôle des proportions

La qualité des alliages de tungstène dépend fortement du bon dosage et de l'homogénéité du mélange entre le tungstène et les éléments d'alliage. Dans les alliages de tungstène classiques, comme le système W-Ni-Fe, la teneur en tungstène est généralement supérieure à 90 %, et la proportion d'éléments d'alliage est relativement faible.

- Un équipement de pesage de haute précision est utilisé pour garantir l'exactitude des ingrédients.
- Utiliser un équipement de mélange homogénéisant efficace (broyeur à boulets, mélangeur à tambour, etc.) pour un mélange complet. La durée et la vitesse doivent être optimisées pour éviter l'agglomération de la poudre ou toute modification de sa morphologie.
- Pendant le processus de mélange, une quantité appropriée de lubrifiant (tel que de l'alcool polyvinylique, de la paraffine) peut être ajoutée pour améliorer la fluidité de la poudre et les performances de compression.

3.1.6 Fluidité et masse volumique apparente de la poudre

- **La fluidité** affecte l'uniformité et l'efficacité du formage lors du pressage de la poudre. Une poudre peu fluide peut facilement entraîner une densité de pressage inégale, affectant ainsi la qualité du frittage ultérieur.
- **La densité apparente** détermine la quantité de charge de poudre et la densité de pressage pendant le pressage, et constitue un facteur clé pour améliorer la densité et les propriétés mécaniques du matériau.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La fluidité et la densité apparente sont généralement ajustées et contrôlées par la morphologie de la poudre, la distribution granulométrique et le processus de prétraitement.

3.1.7 Contrôle de la pureté chimique et des impuretés des poudres

- Les éléments d'impureté tels que l'oxygène, le carbone, l'azote, le soufre, etc. affecteront considérablement les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion de l'alliage de tungstène.
- Utilisez des matières premières de haute pureté et un environnement de production propre pour contrôler strictement la pureté chimique de la poudre.
- Utiliser un traitement sous vide ou sous atmosphère protectrice pour réduire l'oxydation et l'adsorption des impuretés.

résumé

La préparation des matières premières et l'optimisation des propriétés des poudres sont essentielles à la fabrication performante de tiges en alliage de tungstène. Une sélection rationnelle de poudres de tungstène et d'éléments d'alliage de haute pureté, de granulométrie appropriée et de bonne morphologie, combinée à des procédés de prétraitement et de mélangeage scientifiques, permet d'améliorer efficacement la densité et les propriétés mécaniques de l'alliage de tungstène, constituant ainsi une base solide pour les processus ultérieurs de formage, de frittage et de traitement thermique. Un système de poudre de haute qualité est essentiel pour garantir la stabilité des performances et l'excellente qualité des tiges en alliage de tungstène.

3.2 Procédé de pressage par métallurgie des poudres (moulage, pressage isostatique)

La fabrication de tiges en alliage de tungstène est une technique de pressage par métallurgie des poudres. Le mélange homogène de poudre d'alliage de tungstène sous une pression donnée permet d'obtenir un corps vert présentant une forme et une densité préliminaires, servant de base au frittage et au traitement thermique ultérieurs. Le choix du procédé de pressage et le contrôle des paramètres influencent directement la densité, l'uniformité et les performances ultérieures du corps vert, et constituent un élément important du processus de préparation des tiges en alliage de tungstène.

3.2.1 Principes de base du pressage de poudre

Le pressage par métallurgie des poudres consiste à utiliser une pression mécanique pour mettre en contact et imbriquer les particules de poudre, réduire leur porosité et former une billette crue dotée d'une certaine résistance mécanique. Ce procédé repose principalement sur le réarrangement, la déformation plastique et le compactage des particules de poudre.

- **Étape de réarrangement** : les particules de poudre se déplacent et se réorganisent par compression, réduisant ainsi les espaces entre les poudres.
- **Étape de déformation plastique** : Les particules sont comprimées et déformées plastiquement, remplissant davantage les vides.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Étape de compaction** : atteint la densité maximale et forme un corps solide.

La morphologie, la distribution granulométrique et la fluidité de la poudre ont un impact significatif sur l'effet de pressage.

3.2.2 Pressage uniaxial

Le moulage par compression est la méthode de pressage la plus couramment utilisée pour la préparation des tiges en alliage de tungstène. La poudre est pressée dans le moule par pression uniaxiale pour former l'ébauche souhaitée.

Caractéristiques du procédé :

- **L'équipement a une structure simple** et un fonctionnement pratique et convient à la production de masse.
- **La pression de formage est élevée, atteignant généralement 200 à 600 MPa**, ce qui augmente efficacement la densité de la poudre.
- **La conception du moule est flexible** et peut répondre à diverses exigences de forme et de taille de section transversale.
- **La force est unidirectionnelle, la distribution de densité est inégale** et la densité au centre du corps vert est inférieure à celle de la surface, ce qui peut provoquer une déformation lors du frittage ultérieur.

Principaux paramètres du processus :

- **Pression de pressage** : Plus la pression est élevée, plus la densité est élevée, mais une pression trop élevée peut provoquer une usure de la matrice ou une rupture de la poudre.
- **Vitesse de pressage** : Le contrôle de la vitesse appropriée peut réduire la rupture des particules de poudre et améliorer l'uniformité de la densité.
- **Temps de maintien** : Un temps de maintien approprié peut permettre aux particules de poudre d'entrer complètement en contact et d'améliorer la résistance du corps vert.
- **Température du moule** : Un chauffage approprié du moule peut aider à améliorer la plasticité de la poudre et à réduire les fissures et les déformations.

application:

Le moulage par compression est adapté à la production de tiges en alliage de tungstène de grande taille et de section simple. Il peut également être utilisé pour préformer des billettes destinées à une seconde transformation.

3.2.3 Pressage isostatique

Le pressage isostatique est une méthode de formage qui permet d'obtenir une densité élevée et une distribution de densité uniforme en appliquant une pression multidirectionnelle uniforme sur le corps de poudre dans un milieu hydraulique ou pneumatique.

Caractéristiques du procédé :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **La pression est transmise uniformément et la densité est uniformément répartie** , évitant ainsi efficacement le problème de gradient de densité pendant le processus de moulage.
- **La direction de la pression est variée, la taille et la forme de la pièce brute sont flexibles** et elle convient aux formes complexes et aux pièces en alliage de tungstène de haute précision.
- **L'investissement en équipement est élevé, le processus est relativement compliqué** et l'efficacité de la production est inférieure à celle du moulage.
- **On le divise généralement en deux catégories : le pressage isostatique à froid (CIP) et le pressage isostatique à chaud (HIP) .**

Principaux paramètres du processus :

- **Plage de pression** : Le pressage isostatique à froid est généralement de 100 à 400 MPa, et le pressage isostatique à chaud peut atteindre un environnement à haute température et haute pression de plus de 100 MPa.
- **Sélection du milieu** : Un liquide (comme l'eau, l'huile) ou un gaz (comme l'azote) est souvent utilisé comme milieu de transmission de pression.
- **Temps de maintien** : s'assurer que la poudre est entièrement compactée et déformée.
- **Contrôle de la température** : Le pressage isostatique à chaud combiné à des températures élevées favorise le frittage de la poudre, améliorant ainsi la densité et les performances.

application:

Le pressage isostatique convient à la préparation de tiges d'alliage de tungstène hautes performances, en particulier de composants clés qui nécessitent une densité uniforme et des propriétés mécaniques stables, tels que les tiges d'alliage pour l'industrie aérospatiale militaire et les équipements médicaux haut de gamme.

3.2.4 Comparaison des avantages et des inconvénients entre le moulage et le pressage isostatique

| projet | Moulage par compression | Pressage isostatique |
|--|--|---|
| Investissement en équipement | Inférieur | Plus haut |
| Vitesse de pressage | Rapide, adapté à la production de masse | Efficacité de production lente et relativement faible |
| Uniformité de la densité | Le gradient de densité est évident et la densité au centre est plus faible | Densité uniforme et peu de défauts |
| Former la complexité | Convient aux sections transversales simples | Convient aux formes complexes |
| Propriétés mécaniques du produit fini | Stable, dépendant du contrôle ultérieur du processus | Haute densité, haute performance |
| coût | Faible | haut |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2.5 Technologies clés et optimisation des processus

- **Optimisation de la conception des moules** : utilisez la technologie de pressage à plusieurs étapes ou de pressage progressif pour réduire le gradient de densité et améliorer l'uniformité du corps vert.
- **Prétraitement de la poudre** : Améliore la fluidité de la poudre et les propriétés de lubrification pour éviter l'agglomération des particules de poudre ou les rayures du moule pendant le pressage.
- **Réglage des paramètres du processus de pressage** : Contrôler raisonnablement la pression, la vitesse et le temps de maintien pour éviter la casse de la poudre et les contraintes résiduelles.
- **Mise à niveau de l'équipement de pressage isostatique** : Adoptez un équipement intégré haute pression et haute température pour réaliser un pressage isostatique (HIP) et améliorer encore la densité du corps vert et les propriétés mécaniques.
- **Combinaison de plusieurs procédés** : Combinaison du moulage par compression et du pressage isostatique pour améliorer l'efficacité de la production et les performances du produit.

3.2.6 Exigences en matière de suppression des déchets verts et de protection de l'environnement

La production moderne d'alliages de tungstène met l'accent sur la protection de l'environnement et la sécurité, et le processus de pressage par métallurgie des poudres doit également être conforme aux normes de protection de l'environnement en vigueur :

- Récupération et traitement des poussières pour éviter la pollution de l'environnement et les risques pour la santé des opérateurs.
- Utilisez des lubrifiants inoffensifs ou peu toxiques pour réduire la pollution des déchets de processus.
- Gérer la consommation d'énergie dans le processus de production et améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'énergie.

résumé

Le pressage par métallurgie des poudres est une étape clé du formage des barres en alliage de tungstène. Le moulage par compression et le pressage isostatique présentent chacun leurs avantages pour répondre aux différentes exigences produits. Une sélection et une optimisation judicieuses des paramètres du pressage garantissent non seulement la densité et l'uniformité de l'ébauche, mais constituent également une base solide pour le frittage et le traitement thermique ultérieurs. Grâce aux progrès technologiques, la combinaison du pressage isostatique et du moulage par compression, ainsi que le développement de nouveaux procédés écologiques, favoriseront la fabrication de barres en alliage de tungstène et favoriseront une efficacité, une qualité et un respect de l'environnement élevés.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3 Technologie de frittage et contrôle de l'atmosphère

Le frittage est un procédé essentiel à la préparation des barres d'alliage de tungstène. Il permet aux particules de poudre de se diffuser et de se combiner grâce à un chauffage à haute température, ce qui permet de densifier la poudre et d'améliorer les propriétés mécaniques. Une technologie de frittage judicieuse et un contrôle de l'atmosphère influencent non seulement la densité, la structure et les performances du matériau, mais aussi la stabilité dimensionnelle et la constance de la qualité du produit fini.

3.3.1 Principes de base et procédés de frittage

Le frittage consiste à chauffer la poudre à sa température de diffusion solide (généralement entre 70 et 90 % de son point de fusion) afin de permettre la diffusion et la liaison entre les particules et de réaliser la densification. Les principaux mécanismes sont les suivants :

- **Diffusion à l'état solide** : les atomes de tungstène et d'éléments d'alliage diffusent à l'interface des particules pour former une liaison limite de grains.
- **Réduction de l'énergie de surface des particules** : Réduction de l'énergie du système par diffusion interfaciale, entraînant la fermeture des pores et la densification.
- **Croissance des grains** : une croissance appropriée des grains est bénéfique pour l'amélioration des propriétés mécaniques, mais une croissance excessive entraînera une dégradation des performances.

Le processus de frittage se divise généralement en trois étapes : préchauffage, isolation et refroidissement. La courbe de température et le temps d'isolation doivent être contrôlés avec précision.

3.3.2 Technologies de frittage courantes

3.3.2.1 Frittage sous atmosphère protectrice

Le frittage est réalisé sous atmosphère protectrice (comme l'hydrogène, l'argon ou un gaz mixte) pour empêcher l'oxydation de l'alliage de tungstène et favoriser la diffusion et l'uniformité des éléments de l'alliage.

- L'atmosphère d'hydrogène peut réduire efficacement les oxydes de surface et améliorer la densité de frittage.
- Une atmosphère inerte à l'argon est adaptée pour éviter les effets néfastes des gaz réducteurs sur certains éléments d'alliage.
- L'exigence de pureté de l'atmosphère est élevée et la teneur en gaz impurs (oxygène, azote, vapeur d'eau) est inférieure au niveau ppm.

3.3.2.2 Frittage sous vide

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'environnement sous vide poussé réduit l'oxydation et améliore la pureté et les propriétés mécaniques du matériau. Le frittage sous vide est adapté à la préparation de produits en alliage de tungstène haut de gamme.

- Le degré de vide atteint généralement $10^{-3} \sim 10^{-5}$ Pa.
- Empêche efficacement l'introduction de gaz impurs pendant le frittage et réduit les pores et les inclusions d'impuretés.
- Les coûts d'investissement et d'exploitation des équipements sont élevés.

3.3.2.3 Pressage isostatique à chaud (HIP)

En combinant le frittage à haute température et la technologie de pressage isostatique à haute pression, une densification ultra-élevée de la poudre d'alliage de tungstène peut être obtenue.

- Une température élevée et une haute pression isotrope sont appliquées simultanément pour favoriser le frittage à cellules fermées et l'élimination des pores de la poudre.
- Améliore considérablement la densité et les propriétés mécaniques du matériau, adapté à la fabrication de composants clés.
- L'équipement est complexe et coûteux, et convient aux produits à forte valeur ajoutée.

3.3.3 Contrôle des paramètres du processus de frittage

- **Température de frittage** : généralement contrôlée entre 1 450 °C et 1 600 °C. Une température trop basse peut entraîner une densité insuffisante, tandis qu'une température trop élevée peut entraîner des grains grossiers et une ségrégation des composants.
- **Temps d'isolation** : dépend de la composition du matériau et de la taille du flan, généralement 1 à 4 heures pour assurer une diffusion et une densification suffisantes.
- **Taux de chauffage** : Contrôlez raisonnablement le taux de chauffage pour éviter une contrainte thermique excessive dans l'ébauche et éviter les fissures.
- **Taux de refroidissement** : Refroidissement modérément lent pour réduire les contraintes thermiques et la déformation structurelle.

3.3.4 Effet et technologie de contrôle de l'atmosphère de frittage

L'atmosphère de frittage joue un rôle décisif dans la microstructure et les propriétés des tiges en alliage de tungstène.

- **Atmosphère réductrice (hydrogène)** : élimine la couche d'oxyde à la surface de la poudre et favorise la liaison entre les particules.
- **Atmosphère inerte (argon)** : empêche la corrosion de l'alliage de tungstène par atmosphère réductrice à haute température, adaptée aux alliages sensibles à la composition.
- **Contrôle de la pureté de l'atmosphère** : utilisez un gaz de haute pureté et équipez-vous d'un dispositif de purification de gaz pour garantir une teneur en oxygène extrêmement faible et éviter l'oxydation et la nitruration.
- **Débit d'air et pression** : Ajustez raisonnablement le débit d'air et la pression pour assurer une atmosphère uniforme et un effet de conduction thermique.

3.3.5 Surveillance et contrôle de la qualité du frittage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- L'analyse thermique (telle que l'analyse thermique différentielle DTA et l'analyse thermogravimétrique TGA) est utilisée pour surveiller la température et les caractéristiques de réaction du processus de frittage.
- L'effet de frittage a été évalué par analyse de la microstructure, détermination de la porosité et tests de propriétés mécaniques.
- Surveillez la composition de l'atmosphère en temps réel pour éviter l'infiltration de gaz impurs.
- La taille et la déformation du produit fini sont testées pour garantir que le produit répond aux exigences de conception.

résumé

La technologie de frittage et le contrôle de l'atmosphère sont au cœur de la préparation des tiges en alliage de tungstène, ce qui influence directement la densité, la microstructure et les propriétés mécaniques du matériau. Le choix d'une méthode de frittage adaptée (protection atmosphérique, pressage isostatique sous vide ou à chaud), associé à un contrôle précis des paramètres du procédé et à une technologie de purification de l'atmosphère, peut améliorer considérablement les performances et la stabilité globales des tiges en alliage de tungstène. À l'avenir, grâce au développement des technologies d'équipement et de la science des matériaux, le processus de frittage gagnera en efficacité et en intelligence, garantissant ainsi une fabrication de haute qualité des tiges en alliage de tungstène.

3.4 Optimisation du processus de traitement thermique et de densification

Les tiges en alliage de tungstène jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de la densité des matériaux, l'optimisation de la microstructure et l'amélioration des propriétés mécaniques. Une conception et une optimisation judicieuses du procédé de traitement thermique permettent non seulement d'éliminer efficacement les contraintes résiduelles lors du frittage, mais aussi de favoriser l'affinage du grain et la répartition uniforme des éléments de l'alliage, améliorant ainsi considérablement les performances globales de l'alliage de tungstène.

3.4.1 Objectif et fonction du traitement thermique

- **Détente des contraintes** : La contrainte thermique générée lors du frittage et du refroidissement est libérée par traitement thermique pour éviter la fissuration et la déformation du corps vert.
- **Promotion de la densification** : Le traitement thermique à haute température favorise le processus de diffusion, remplit les micropores et augmente la densité du matériau.
- **Contrôle du grain** : contrôle de la taille du grain, affine la structure, améliore la ténacité et la résistance.
- **Homogénéisation des éléments d'alliage** : accélérer la diffusion des éléments d'alliage et éviter la ségrégation de composition.
- **les propriétés mécaniques** : telles que l'augmentation de la dureté, de la limite d'élasticité et de la ductilité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.4.2 Principaux types de procédés de traitement thermique

3.4.2.1 Traitement en solution

- Le chauffage à haute température jusqu'à la température de solution (généralement 1200~1400°C) permet aux éléments de l'alliage de se dissoudre complètement dans la matrice.
- Après avoir maintenu au chaud pendant un certain temps, refroidissez rapidement pour obtenir une structure de solution solide uniforme.
- Améliorer efficacement l'uniformité et les propriétés mécaniques des matériaux.

3.4.2.2 Traitement en temps opportun

- La précipitation des éléments d'alliage et les phases de renforcement sont favorisées en maintenant l'alliage à des températures moyennes et basses (500~800°C).
- Améliore la dureté et la résistance du matériau tout en maintenant une ductilité appropriée.
- Une sélection raisonnable de la température et de la durée de vieillissement est la clé de l'optimisation des performances.

3.4.2.3 Recuit

- Le recuit à basse température est utilisé pour éliminer les contraintes internes et améliorer la ténacité du matériau.
- La température est généralement contrôlée à 600~900°C et le temps d'isolation est ajusté en fonction de l'épaisseur du matériau.
- Convient pour améliorer les performances de traitement ultérieures.

3.4.3 Optimisation des paramètres du procédé de traitement thermique

- **Contrôle de la température** : Contrôlez précisément la température de chauffage pour éviter une surchauffe ou une température insuffisante.
- **Vitesse de chauffe** : Chauffe lente pour éviter les chocs thermiques et réduire les risques de fissures.
- **Temps de maintien** : Assurez-vous que l'effet du traitement thermique est suffisant et évitez la croissance des grains due à un temps trop long.
- **Méthode de refroidissement** : Choisissez un refroidissement rapide ou lent en fonction des exigences de performance, ce qui affecte la structure et les performances du matériau.

3.4.4 Technologies auxiliaires pour le processus de densification

- **Traitement thermique par pressage isostatique à chaud (HIP)** : le frittage et la densification sont réalisés simultanément sous haute température et haute pression, améliorant considérablement la densité du matériau.
- **Combinaison HIP + traitement thermique** : maximisez les performances grâce à la densification HIP suivie d'un traitement thermique ciblé.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Technologie de traitement thermique par impulsions** : utilisez un chauffage par impulsions rapide pour favoriser la diffusion, réduire le temps de traitement thermique et améliorer l'efficacité de la production.

3.4.5 Relation entre la microstructure et les performances

- Le traitement thermique favorise la diffusion des joints de grains, réduit la porosité et améliore la force de liaison.
- Le raffinement du grain contribue à améliorer la ténacité du matériau et la résistance aux chocs.
- La répartition uniforme des éléments d'alliage améliore les propriétés mécaniques globales et la résistance à la corrosion.

3.4.6 Contrôle de la qualité et méthodes d'essai

- La microscopie a été utilisée pour analyser les changements microstructuraux avant et après le traitement thermique.
- L'effet de densification a été évalué par mesure de densité et analyse de porosité.
- Les tests de propriétés mécaniques vérifient l'effet du traitement thermique sur la résistance, la dureté et la ductilité.
- Les tests de contrainte (tels que l'analyse des contraintes résiduelles aux rayons X) confirment l'effet de soulagement des contraintes.

résumé

Le traitement thermique et la densification sont des étapes techniques importantes dans la fabrication des tiges en alliage de tungstène. Grâce à une conception scientifique des paramètres du traitement thermique et à une technologie de densification avancée, l'uniformité de la structure interne et les propriétés mécaniques du matériau peuvent être efficacement améliorées afin de répondre aux exigences strictes des applications haut de gamme en matière de performances des tiges en alliage de tungstène. À l'avenir, grâce au développement de nouveaux équipements de traitement thermique et de technologies de contrôle intelligentes, le traitement thermique des tiges en alliage de tungstène évoluera vers une précision, une efficacité et un respect de l'environnement accrus.

3.5 Technologie d'usinage et de traitement de surface (rectification, polissage, tournage)

Les tiges en alliage de tungstène doivent généralement être usinées et traitées en surface pour répondre aux exigences de dimensionnement et de qualité de surface. En raison de leur dureté et de leur fragilité élevées, les alliages de tungstène sont difficiles à usiner. Une sélection et une optimisation judicieuses des procédés d'usinage et de traitement de surface sont essentielles pour garantir la précision et les performances du produit.

3.5.1 Caractéristiques d'usinage de la tige en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Dureté et ténacité élevées** : l'alliage de tungstène a une dureté de HV300 ou supérieure et a une bonne ténacité, mais en même temps, le matériau est cassant et sujet aux fissures pendant le traitement.
- **Forte résistance à l'usure** : les outils s'usent rapidement lors du traitement de l'alliage de tungstène, des outils de dureté élevée et résistants à l'usure sont donc nécessaires.
- **Bonne conductivité thermique** : Elle est propice à la dissipation rapide de la chaleur de traitement, mais la dureté élevée entraîne des forces de coupe importantes.
- **Difficultés de traitement** : Des microfissures, des brûlures et des rugosités de surface sont susceptibles de se produire pendant le processus de découpe, et les paramètres de traitement doivent être strictement contrôlés.

3.5.2 Broyage

Le meulage est la méthode de finition la plus couramment utilisée dans le traitement des tiges en alliage de tungstène, qui est principalement utilisée pour améliorer la précision dimensionnelle et la rugosité de surface.

- **Outils de meulage** : Une meule diamantée ou une meule CBN est utilisée, ce qui convient au traitement de l'alliage de tungstène en raison de sa dureté élevée et de sa résistance à l'usure.
- **Paramètres du processus de broyage** :
 - Vitesse de la meule : déterminée par la dureté du matériau et le matériau de la meule, généralement 20 000 à 40 000 tr/min.
 - Vitesse d'alimentation : lente et régulière pour éviter la surchauffe et les brûlures.
 - Refroidissement et lubrification : utilisez des liquides de refroidissement à base d'eau ou d'huile pour éviter les dommages matériels causés par des températures de traitement excessives.
- **Méthode de broyage** :
 - La rectification cylindrique externe est utilisée pour l'usinage du diamètre des tiges en alliage de tungstène.
 - Le meulage des trous internes est utilisé pour ajuster la taille du trou.
- **Note** :
 - Contrôlez la surépaisseur de meulage pour éviter les fissures causées par un traitement excessif.
 - Dressez régulièrement la meule pour maintenir l'efficacité du meulage et la qualité de la surface.

3.5.3 Polissage

Le polissage est principalement utilisé pour améliorer la finition de surface des tiges en alliage de tungstène, réduire les défauts de surface et améliorer la résistance à la corrosion et l'esthétique.

- **Matériau de polissage** : utilisez une pâte de polissage diamantée ou un agent de polissage à l'alumine et sélectionnez différentes tailles de particules en fonction des exigences de polissage.
- **Méthode de polissage** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Le polissage manuel convient aux petits lots ou aux pièces spéciales.
- L'équipement de polissage mécanique convient à la production à grande échelle, améliorant l'efficacité et la cohérence.

- **Processus de polissage :**

1. Polissage grossier : élimine les grosses rayures et les irrégularités de la surface.
2. Polissage fin : affiner davantage la surface et améliorer la douceur.
3. Polissage ultra-fin : obtenez un effet miroir, la rugosité de surface Ra peut atteindre moins de 0,01 μm .

- **Notes de polissage :**

- Gardez la surface polie propre pour éviter les rayures dues aux impuretés.
- Contrôlez le temps et la pression de polissage pour éviter une usure excessive du matériau.

3.5.4 Tournage

Le tournage est un processus important pour le façonnage et le traitement des dimensions des tiges en alliage de tungstène et convient au traitement des arbres, des cylindres et d'autres formes.

- **Sélection d'outils :**

- Utilisez des outils en carbure ou des outils diamantés pour garantir une coupe nette et une résistance à l'usure.
- Les paramètres de géométrie de l'outil doivent être optimisés en fonction des caractéristiques de l'alliage de tungstène pour réduire les forces de coupe et les vibrations.

- **Paramètres de traitement :**

- La vitesse de coupe est généralement faible, contrôlée à 20~60 m/min.
- La vitesse d'avance et la profondeur de coupe sont ajustées en fonction de la dureté de la pièce et de la durée de vie de l'outil.
- Un refroidissement adéquat doit être utilisé pour éviter les dommages thermiques.

- **Méthode de tournage :**

- Le tournage grossier est utilisé pour éliminer rapidement l'excès de matière.
- Le tournage de finition est utilisé pour obtenir les dimensions et la qualité de surface prévues.

- **Difficultés de virage :**

- écaillage lors de la coupe.
- Empêche les fissures ou le décollement du matériau pendant le traitement.

3.5.5 Rôle auxiliaire de la technologie de traitement de surface

- **Usinage après traitement thermique :** Le traitement thermique provoque souvent des changements dimensionnels, et l'usinage peut corriger et améliorer la précision dimensionnelle.
- **Traitement de renforcement de surface :** améliorez la dureté de la surface et la résistance à l'usure grâce au grenailage, au traitement de surface au laser et à d'autres technologies.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Revêtement anticorrosion** : Une couche protectrice est appliquée sur la surface de la tige en alliage de tungstène pour améliorer la résistance à la corrosion.

3.5.6 Contrôle qualité de l'usinage et du traitement de surface

- **Détection dimensionnelle** : utilisez une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), une jauge de diamètre laser et d'autres équipements pour garantir la précision dimensionnelle.
- **Détection de rugosité de surface** : utilisez un rugosimètre pour mesurer et garantir que les indicateurs de conception sont respectés.
- **Inspection de la microstructure** : Analysez les changements de structure de surface après le traitement et détectez si une zone affectée par la chaleur est générée.
- **Essais de performance** : Essais de propriétés mécaniques et de durée de vie en fatigue pour vérifier l'impact de la technologie de traitement sur les propriétés des matériaux.

résumé

L'usinage et le traitement de surface jouent un rôle important dans la fabrication des tiges en alliage de tungstène. Compte tenu de la dureté et de la fragilité élevées de l'alliage de tungstène, le choix de procédés de meulage, de polissage et de tournage appropriés, combinés à des paramètres d'usinage optimisés et à des équipements de pointe, garantissent la précision dimensionnelle et la qualité de surface du produit, répondant ainsi aux exigences des applications haut de gamme. Parallèlement, le renforcement de surface et le traitement anticorrosion permettent d'améliorer encore les performances et la durée de vie des tiges en alliage de tungstène.

3.6 Nouvelles technologies de fabrication : extrusion, laminage, fabrication additive

Avec les progrès continus de la science des matériaux et de la technologie de fabrication, bien que le processus traditionnel de métallurgie des poudres occupe une position dominante dans la production de tiges en alliage de tungstène, il présente également certaines limites, telles qu'une densité et une uniformité organisationnelle limitées, une faible complexité de formage, etc. Afin de répondre aux besoins de tiges en alliage de tungstène hautes performances dans les domaines aérospatial, militaire, médical et autres pour des formes complexes, une densité élevée et d'excellentes propriétés mécaniques, de nouvelles technologies de préparation telles que l'extrusion, le laminage et la fabrication additive ont été progressivement introduites et développées rapidement ces dernières années, enrichissant considérablement les méthodes de fabrication des tiges en alliage de tungstène.

3.6.1 Technologie d'extrusion

L'extrusion est un processus de formage continu dans lequel les billettes en alliage de tungstène sont soumises à une pression à travers l'ouverture de la filière à haute température ou à température ambiante pour permettre au matériau de s'écouler plastiquement le long de l'ouverture de la filière pour obtenir la forme et la taille de section transversale souhaitées.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Caractéristiques du procédé d'extrusion

- **déformation plastique** : Grâce à une grande déformation plastique, les grains sont affinés et les propriétés mécaniques du matériau sont améliorées.
- **Amélioration de la densité** : Le processus d'extrusion favorise la fermeture des pores internes et la densification des tissus.
- **Forme flexible** : différentes formes de section transversale peuvent être traitées pour répondre à des exigences structurelles complexes.
- **Haute efficacité de production** : convient à la production continue de barres longues.

Méthode d'extrusion

- **Extrusion directe** : La billette et la direction d'extrusion sont les mêmes, la structure de l'équipement est simple et convient aux matériaux de grande taille.
- **Extrusion indirecte** : la filière se déplace et la billette reste immobile, ce qui réduit les frottements et la pression d'extrusion.
- **Extrusion à chaud** : Extrusion à haute température pour améliorer la plasticité du matériau et réduire la force de traitement.
- **Extrusion à froid** : Extrusion à température ambiante pour améliorer la qualité de surface et les propriétés mécaniques du produit fini.

Paramètres du processus d'extrusion

- La température d'extrusion, la vitesse et la conception de la filière ont un impact significatif sur la qualité du produit fini.
- Plus le rapport d'extrusion (rapport de section transversale) est élevé, plus la déformation est complète et meilleures sont la densité et les performances du matériau.
- Les lubrifiants sont utilisés pour réduire la friction et améliorer la qualité de la surface.

Application de la technologie d'extrusion

- Préparation de tiges en alliage de tungstène à haute résistance et haute densité, notamment celles de grande taille et de section transversale complexe.
- Grâce à de multiples processus d'extrusion, les grains sont encore affinés pour améliorer la ténacité et la résistance à l'usure.

3.6.2 Technologie de laminage

Le laminage est une méthode de traitement qui utilise des rouleaux pour appliquer une pression sur des barres en alliage de tungstène afin de provoquer une déformation plastique du matériau, de réduire la taille de la section transversale et d'améliorer la structure organisationnelle.

Caractéristiques du processus de laminage

- **Forte continuité** : convient à la production en série de barres et de bandes.
- **Affinement des grains** : La déformation plastique favorise la formation de joints de grains et améliore la ténacité du matériau.
- **Haute précision dimensionnelle** : La taille peut être contrôlée avec précision grâce à plusieurs passes de laminage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Bonne qualité de surface** : La surface après le laminage est relativement lisse, ce qui est pratique pour le traitement ultérieur.

Méthode de roulage

- **Laminage à chaud** : réalisé à haute température, le matériau présente une bonne plasticité et est facile à déformer.
- **Laminage à froid** : Traitement à température ambiante pour augmenter la dureté et la résistance de la surface et améliorer les propriétés mécaniques.
- **Laminage inversé** : laminage en sens alternés pour améliorer l'uniformité de la structure.
- **Laminage multi-rouleaux** : adapté au formage de sections transversales complexes.

Paramètres du processus de laminage

- La température et la vitesse de laminage affectent directement la structure et les propriétés du matériau.
- La conception du schéma de laminage multi-passes doit être scientifique pour contrôler la déformation et l'écart.
- Les matériaux des rouleaux et la technologie de lubrification garantissent la qualité de la surface et la durée de vie de l'équipement.

Application de la technologie du laminage

- Préparez des tiges, des bandes et des feuilles minces en alliage de tungstène.
- Utilisé pour les produits en alliage de tungstène avec des exigences élevées en matière de précision dimensionnelle et de qualité de surface.

3.6.3 Technologie de fabrication additive (impression 3D)

La technologie de fabrication additive, en particulier les technologies d'impression 3D telles que la fusion laser de poudre métallique (Selective Laser Melting, SLM) et la fusion par faisceau d'électrons (EBM), offre une nouvelle voie pour la personnalisation personnalisée et la fabrication de structures complexes de tiges en alliage de tungstène.

Caractéristiques de la fabrication additive

- **Fabrication de structures complexes** : des formes géométriques complexes difficiles à former à l'aide de procédés traditionnels peuvent être fabriquées, telles que des cavités internes et des structures en grille.
- **Taux d'utilisation élevé des matériaux** : la poudre est directement formée pour réduire le gaspillage de matériaux.
- **Grande liberté de conception** : la conception peut être rapidement ajustée en fonction de la demande, raccourcissant ainsi le cycle de développement du produit.
- **Intégration fonctionnelle** : permet de réaliser la fabrication de structures composites multifonctionnelles.

Défis du processus de fabrication additive

- Le point de fusion élevé et la conductivité thermique élevée de l'alliage de tungstène rendent difficile le contrôle de la température du bain de fusion.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La fusion et le refroidissement rapides de la poudre par laser ou par faisceau d'électrons peuvent facilement provoquer des contraintes thermiques et des fissures.
- La fluidité et l'uniformité de la distribution de la poudre ont un impact significatif sur la qualité du formage.
- Le coût de l'équipement est élevé, les paramètres du processus sont complexes et un développement spécial est nécessaire pour les alliages de tungstène.

Progrès technologique

- De nouvelles sources de faisceaux à haute énergie et des stratégies de balayage réduisent le stress thermique et améliorent la qualité de formage.
- Le prétraitement des poudres et l'optimisation du contrôle de l'atmosphère peuvent réduire les défauts.
- Les processus de post-traitement (tels que le pressage isostatique à chaud) sont combinés à l'impression 3D pour améliorer les propriétés des matériaux.

Perspectives d'application de la fabrication additive

- Production personnalisée de pièces en alliage de tungstène en petits lots et de grande complexité.
- Prototypage rapide et échantillons de tests fonctionnels.
- L'industrie aérospatiale, nucléaire, etc. ont des exigences en matière de structures complexes et de pièces en alliage de tungstène hautes performances.

résumé

L'extrusion, le laminage et la fabrication additive offrent une variété de voies techniques pour la production de tiges en alliage de tungstène. Les technologies d'extrusion et de laminage affinent les grains et augmentent la densité par déformation plastique, ce qui est adapté à la production de masse et au contrôle dimensionnel. La fabrication additive, quant à elle, s'impose comme la tendance d'avenir pour la fabrication de pièces complexes en alliage de tungstène, grâce à sa liberté de conception structurelle et à ses avantages en termes d'économie de matière. Combinée aux procédés traditionnels de métallurgie des poudres, l'application coordonnée de ces nouvelles technologies favorisera le développement de la fabrication de tiges en alliage de tungstène vers des produits performants, multifonctionnels et intelligents.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

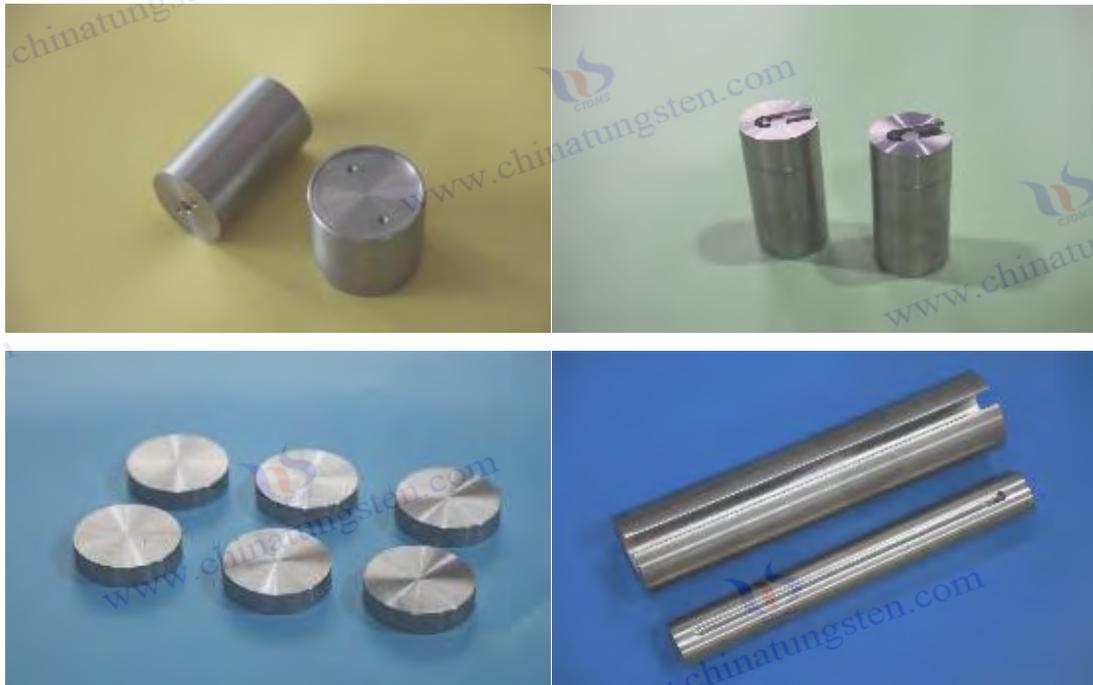
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



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



Chapitre 4 Tests de performance et évaluation de la qualité des tiges en alliage de tungstène

4.1 Contrôle de l'apparence et des dimensions géométriques

En tant que matériau fonctionnel hautes performances, les tiges en alliage de tungstène sont largement utilisées dans des secteurs clés tels que l'aérospatiale, l'énergie nucléaire, le médical et l'armée. Leur qualité esthétique et leur précision dimensionnelle géométrique influencent directement leur transformation, leur assemblage et leurs performances. Par conséquent, les tests d'aspect et de dimensionnement constituent la première étape de l'évaluation de la qualité des tiges en alliage de tungstène, et constituent également une étape importante à franchir avant la sortie d'usine du produit.

4.1.1 Exigences de base en matière de qualité d'apparence

se concentre principalement sur la présence de défauts visibles en surface, susceptibles d'affecter l'utilisation ou la fiabilité. Cette inspection est effectuée conformément aux normes nationales applicables (telles que GB/T 21114 et ASTM B777) ou aux spécifications définies par l'utilisateur.

Les contrôles courants comprennent :

- **Finition de surface** : La surface doit être exempte de rayures évidentes, de piqûres, de fissures de frittage, de bavures métalliques, de calamine et d'autres défauts.
- **Couleur et consistance** : La surface doit avoir un lustre métallique uniforme et ne doit présenter aucune décoloration due à l'oxydation, taches, points, etc.
- **Inspection des défauts** : concentrez-vous sur les défauts de surface typiques suivants :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Microfissures et fissures;
 - Bavures et dommages aux bords ;
 - Trous de frittage ou points de décollement ;
 - Rouille, décoloration ou taches d'huile ;
 - Bosses locales, déformations, courbures et autres déformations.
- **État de la face d'extrémité** : Les deux extrémités doivent être plates, sans bords écaillés, fissures ou manques de matériau évidents, et la verticalité des faces d'extrémité doit répondre aux exigences standard.

Outils et méthodes de détection :

- **Inspection visuelle** : inspection visuelle ou inspection assistée par loupe sous lumière naturelle ou éclairage standard.
- **Plateforme d'observation éclairée** : utilisez un fond lumineux puissant pour vérifier les petites fissures de surface ou les différences de couleur.
- **Aide au nettoyage de surface** : Observez la qualité réelle de la surface métallique après avoir éliminé l'huile et la saleté de surface.

La production en usine utilise souvent une combinaison d'« inspection complète + inspection aléatoire » pour effectuer des inspections d'apparence, tandis qu'une inspection visuelle à 100 % est généralement mise en œuvre pour les composants militaires ou aérospatiaux.

4.1.2 Éléments de mesure des dimensions géométriques

Les essais de dimensions géométriques garantissent que la tige en alliage de tungstène répond aux exigences de précision spécifiées dans les plans de conception ou les contrats. Les éléments de mesure classiques comprennent :

- **Longueur** : Il peut s'agir d'une longueur fixe ou d'une longueur arbitraire en fonction de l'objectif de conception de la barre, généralement contrôlée avec une précision de $\pm 0,5$ mm ou plus.
- **Diamètre** : La rondeur et la tolérance de la barre doivent être élevées et l'application de précision peut être contrôlée à $\pm 0,01$ mm.
- **Ovalité** : contrôle la différence entre les deux diamètres de la section transversale, ne dépassant généralement pas 0,05 mm.
- **Verticalité/ planéité d'extrémité** : La face d'extrémité de la tige en alliage de tungstène doit être perpendiculaire à l'axe central de la tige.
- **Rectitude (courbure)** : Mesure l'écart de rectitude de la tige sur toute sa longueur, généralement exprimé en « mm/m », par exemple $\leq 0,5$ mm/m.
- **Concentricité (si applicable)** : Pour les barres creuses ou les barres de structure tournées, vérifier l'écart de concentricité interne et externe.

Instruments de test :

- **Pieds à coulisse et micromètres** : utilisés pour mesurer rapidement la longueur et le diamètre, adaptés à la confirmation préliminaire des dimensions.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Micromètre extérieur, micromètre intérieur** : utilisé pour la mesure de diamètre de haute précision.
- **Comparateur à cadran + cadre en V** : utilisé pour mesurer la rectitude et la courbure.
- **Jauge de diamètre laser** : réalise une mesure en ligne de haute précision sans contact, adaptée aux lignes de production automatisées.
- **Machine de mesure tridimensionnelle (MMT)** : utilisée pour l'inspection précise de structures géométriques complexes et pour fournir des données de coordonnées en taille réelle.

4.1.3 Grades de tolérance dimensionnelle et base standard

Les tiges en alliage de tungstène varient selon les applications et les normes internationales. Les spécifications standard typiques incluent :

- **Norme nationale chinoise (GB/T 21114)** : spécifie le diamètre, la longueur et le degré de tolérance des tiges en alliage de tungstène de différentes tailles.
- **Norme américaine (ASTM B777)** : Réglementation détaillée sur le contrôle dimensionnel des produits en alliage de tungstène à haute densité.
- **Normes définies par l'utilisateur** : les clients de l'industrie aérospatiale et nucléaire exigent souvent des dimensions et des tolérances géométriques plus strictes que les normes nationales.

Référence de tolérance dimensionnelle commune :

| Plage de diamètres de tige | Tolérance normale (mm) | Tolérance de précision (mm) |
|----------------------------|------------------------|-----------------------------|
| ≤10 mm | ±0,10 | ±0,02 |
| 10–30 mm | ±0,15 | ±0,03 |
| >30 mm | ±0,20 | ±0,05 |

4.1.4 Tests automatisés et enregistrement des données

Avec le développement de l'Industrie 4.0, de plus en plus d'entreprises introduisent des technologies de test automatisées pour améliorer l'efficacité du contrôle qualité :

- **Système de reconnaissance visuelle** : combine des algorithmes de reconnaissance vidéo et d'image pour réaliser la reconnaissance des défauts d'apparence en ligne.
- **Scanner de taille laser** : coopère avec le rack d'alimentation automatique pour réaliser la détection entièrement automatique de la longueur et du diamètre de la barre.
- **Système de base de données qualité** : enregistrez les données de test en temps réel et téléchargez-les dans la base de données pour réaliser la gestion de la traçabilité des lots.

4.1.5 Fréquence des tests et critères de jugement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La fréquence des tests est définie en fonction du lot de production, de l'utilisation et des exigences du client :

- **Livraison par lots** : L'inspection par échantillonnage est adoptée, telle que le classement AQL selon la norme GB/T 2828.1.
- **Utilisation de l'énergie militaire/nucléaire** : inspection complète + inspection aléatoire, les dimensions clés et les indicateurs clés doivent être testés un par un.
- **Critères de mise au rebut et de reprise** :
 - Les produits présentant des fissures pénétrantes, des rayures profondes, une oxydation sur une grande surface et un grenailage sur la face frontale sont jugés non qualifiés.
 - Les dimensions qui dépassent la plage de tolérance et ne peuvent pas être corrigées par un traitement secondaire sont également jugées comme non qualifiées.

résumé

Le contrôle de l'apparence et des dimensions géométriques est essentiel au contrôle qualité des barres en alliage de tungstène. Il est lié à la qualification fondamentale du produit et influence l'adaptation de l'assemblage et la fiabilité des applications ultérieures. Avec l'introduction de méthodes d'essai automatisées et l'amélioration des normes d'essai, les fabricants modernes de barres en alliage de tungstène évoluent vers une qualité plus constante, des essais plus rapides et une gestion plus complète de la traçabilité.

4.2 Méthodes d'analyse de la densité et de la microstructure

La densité et la microstructure sont des indicateurs importants pour mesurer l'uniformité, la densité et la maturité des procédés de fabrication des tiges en alliage de tungstène. Elles ont un impact direct sur leurs propriétés mécaniques, leurs propriétés thermiques et leur durée de vie. Les tests de densité permettent de déterminer indirectement la densité de frittage et la distribution des pores ; l'analyse de la microstructure révèle des informations clés telles que la structure des grains, la distribution des phases et les défauts des pores. Par conséquent, la mise en place d'un mécanisme systématique d'évaluation de la densité et de l'organisation est essentielle pour garantir une production de haute qualité de tiges en alliage de tungstène.

4.2.1 Importance et méthodes de détection de la densité

La densité des tiges en alliage de tungstène est généralement calculée en fonction de leur composition chimique. Par exemple, dans les systèmes W-Ni-Fe ou W-Ni-Cu, la densité théorique peut atteindre 17,0 à 18,5 g/cm³. La densité, l'uniformité et la proximité réelles du produit reflètent la qualité du frittage, le niveau de densification et les défauts existants (pores fermés, inclusions, décollement, etc.).

(1) Méthode d'Archimède (méthode de drainage liquide)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Principe : Selon le principe d'Archimède, la différence entre l'échantillon pesé dans l'air et dans le liquide peut être utilisée pour calculer le volume, et la densité peut être obtenue en combinant la masse.

étape :

- Utiliser de l'eau déionisée ou de l'éthanol comme liquide d'immersion ;
- Peser le poids sec (W1) et le poids dans la solution d'immersion (W2) ;
- Calculer la densité : $\rho = W1 / (W1 - W2) \times \rho_{\text{liquide}}$.

Avantages : Facile à utiliser, adapté à la plupart des échantillons solides.

Limitations : Imprécis pour les échantillons avec des pores fermés ou des surfaces imparfaites.

(2) Méthode du pycnomètre à hélium (méthode de remplacement du gaz)

Principe : En mesurant la différence de pression entre la chambre d'échantillon et la chambre de référence, le volume et la densité de l'échantillon sont calculés.

Avantages :

- Haute précision (jusqu'à $\pm 0,001 \text{ g/cm}^3$) ;
- Peut détecter les matériaux microporeux ;
- Convient aux produits en alliage de tungstène de précision haut de gamme.

Matériel représentatif : AccuPyc , Micromeritics et autres densitomètres à gaz automatiques.

(3) Méthode de calcul des rayons X (densité de voxels)

Associée à un équipement industriel de tomographie ou de radiographie, la densité voxel de l'échantillon est calculée par reconstruction d'image, ce qui convient aux pièces structurales aux formes complexes ou qui ne peuvent pas être touchées.

4.2.2 Objectif et indicateurs clés de l'analyse de la microstructure

L'alliage de tungstène reflète ses caractéristiques d'évolution lors du frittage, du traitement thermique et de la transformation ultérieure. Les indicateurs clés suivants peuvent être évalués par analyse microscopique :

- Taille et distribution des grains;
- Distribution des phases des éléments d'alliage (phase W, phase à base de Ni/Fe/Cu) et clarté des limites de phase ;
- Le nombre et la morphologie des pores ou des inclusions ;
- uniformité et directionnalité des tissus;
- Caractéristiques de la précipitation de deuxième phase et de la structure eutectique.

4.2.3 Techniques d'analyse de la microstructure

(1) Microscope métallographique optique (OM)

utiliser :

- Observez la morphologie des grains, les pores et la structure macroscopique ;
- Les limites de phase peuvent être visualisées avec des solutions de gravure standard.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Processus de préparation des échantillons :

- Incrustation, meulage et polissage ;
- Gravure chimique (réactifs courants : solution de chlorure de fer et d'acide chlorhydrique) ;
- Sélectionnez le grossissement approprié pour l'observation.

(2) Microscopie électronique à balayage (MEB)

Avantages :

- Haute résolution, capable d'observer des structures à l'échelle nanométrique ;
- Peut être combiné avec un spectromètre dispersif en énergie (EDS) pour analyser la distribution des éléments ;
- Détectez les micro-défauts tels que les trous de frittage, les sources d'initiation de fissures et les liaisons d'interface.

Champ d' application :

- Recherche sur l'interface des alliages, la structure des joints de grains et l'identification des microfissures ;
- Analyse du comportement de ségrégation et de diffusion locale des éléments d'alliage.

(3) Microscopie électronique à transmission (MET)

utiliser :

- Étudier la phase de précipitation, la dislocation, la limite des micro-grains, etc. dans l'alliage de tungstène ;
- Analyser les mécanismes de renforcement à l'échelle nanométrique, les phases amorphes et les couches de réaction interfaciales.

limite :

- La préparation des échantillons est complexe et convient à la recherche scientifique ou au développement de matériaux haut de gamme.

(4) Spectroscopie énergétique (EDS / WDS)

- **EDS** : Analyse élémentaire rapide, utilisée en conjonction avec le MEB ;
- **WDS** : utilisé pour la détection d'éléments de haute précision et à faible teneur (tels que les impuretés d'oxygène et de carbone) ;
- Utilisé pour analyser la composition de chaque phase et l'uniformité de la répartition des éléments au sein de l'organisation.

(5) Diffraction des rayons X (DRX)

But :

- Identifier la structure cristalline et les types de phases présents dans les alliages de tungstène ;
- Détecter s'il y a des impuretés telles que des oxydes et des carbures ;
- Le rapport de contenu de la phase principale et de la phase secondaire peut être analysé quantitativement.

4.2.4 Défauts organisationnels et critères d'évaluation de la qualité

Les défauts microstructuraux courants comprennent :

- Trous de frittage ou pores résiduels ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Structure « noyau-coquille » causée par la ségrégation des éléments ;
- Particules non liées ou interface de frittage faiblement liée ;
- La deuxième phase est inégalement répartie ou excessivement précipitée ;
- Grossissement des grains dû au traitement thermique.

Critères de jugement :

- GB/T 13298 (Règles générales pour l'analyse de la structure métallographique) ;
- ASTM E1245 (Évaluation des inclusions dans les métaux) ;
- Normes de contrôle interne de l'entreprise : définissent généralement des plages acceptables pour la porosité, la granulométrie et la qualité d'inclusion.

4.2.5 Analyse de la relation entre densité et organisation

Les tests de densité et l'observation organisationnelle se vérifient mutuellement et constituent des moyens importants d'évaluer la qualité des produits en alliage de tungstène.

- Une densité élevée correspond souvent à un frittage suffisant et à une faible porosité ;
- Une bonne uniformité d'organisation et des grains fins conduisent à des propriétés mécaniques supérieures ;
- Si la densité est faible et que la structure présente un grand nombre de pores fermés, cela peut être dû à une température de frittage insuffisante ou à un mauvais compactage de la poudre ;
- Si la densité est qualifiée mais qu'il y a une ségrégation structurelle, cela peut être dû à une répartition inégale des matières premières ou à un traitement thermique inégal.

résumé

L'analyse de la densité et de la microstructure est au cœur de l'évaluation de la qualité des barres en alliage de tungstène. Elle permet de refléter pleinement les caractéristiques structurelles internes et la densité du matériau. La mesure précise de la densité est réalisée par la méthode d'Archimède, la méthode de la densité des gaz, la méthode des rayons X, etc. Des recherches approfondies sur la morphologie et la composition organisationnelles sont menées en combinant la microscopie optique, le MEB, l'EDS, la DRX et d'autres méthodes. Ces analyses permettent non seulement de garantir la conformité du produit aux normes techniques, mais aussi de fournir une base scientifique pour l'optimisation des procédés et la recherche et le développement de nouveaux matériaux. Avec la généralisation des instruments de test haute résolution et l'introduction de plateformes de test automatisées, le contrôle organisationnel et l'assurance qualité des barres en alliage de tungstène progressent progressivement.

4.3 Normes d'essai des propriétés mécaniques (ASTM, GB, ISO)

En tant que matériau structurel fonctionnel avec une densité élevée et une excellente ténacité, les propriétés mécaniques des tiges en alliage de tungstène déterminent directement leur sécurité de service dans des environnements difficiles tels que des contraintes élevées, des charges élevées et des impacts importants. Des paramètres tels que la résistance à la traction, la limite d'élasticité,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'allongement, la dureté, la ténacité aux chocs et la durée de vie en fatigue sont la base essentielle pour mesurer leur qualité et leur applicabilité technique. Afin de garantir la scientificité et la comparabilité des résultats d'essai, les essais de propriétés mécaniques doivent être effectués en stricte conformité avec le système de normes internationalement reconnu (ASTM, GB, ISO).

4.3.1 Essai de propriétés de traction

La méthode la plus élémentaire et la plus courante pour tester les propriétés mécaniques des tiges en alliage de tungstène. En appliquant une tension axiale, le comportement contrainte-déformation avant rupture est mesuré afin d'obtenir des indicateurs clés tels que la résistance à la traction, la limite d'élasticité et l'allongement.

Normes d'essai et champ d'application applicable :

- **ASTM E8/E8M** « Méthode standard pour les essais de traction des matériaux métalliques » : applicable aux barres métalliques, aux plaques et aux échantillons de petite taille ;
- **GB/T 228.1** « Essai de traction des matériaux métalliques - Partie 1 : Méthode d'essai à température ambiante » : Il s'agit de la norme nationale générale de la Chine ;
- **ISO 6892-1** « Essais de traction sur matériaux métalliques - Partie 1 : Méthodes d'essai à température ambiante » : norme internationalement acceptée, fondamentalement équivalente à GB.

Définitions des paramètres clés :

- **Résistance à la traction (UTS)** : Contrainte maximale qu'un matériau peut supporter, en MPa ;
- **Limite d'élasticité (YS)** : contrainte minimale à laquelle un matériau subit une déformation plastique ;
- **Allongement (EI)** : L'allongement de l'échantillon avant rupture, qui mesure la ténacité du matériau ;
- **Taux de retrait sectionnel (Z)** : Degré de rétrécissement à la rupture, reflétant la plasticité.

Préparation des échantillons et contrôle de l'état :

- Forme de l'échantillon : barre ronde standard (par exemple $\Phi 6\sim\Phi 12$ mm) ou barre plate ;
- Contrôle du taux de chargement : par exemple 0,5 à 2 mm/min ;
- Conditions de température : généralement température ambiante ($20\pm 5^{\circ}\text{C}$), un étirement à haute température peut être effectué si nécessaire.

Note:

- alliage de tungstène, la pièce de serrage doit être conçue pour éviter le glissement ou la concentration de contraintes ;
- Il faut utiliser une machine d'essai universelle électronique à haute rigidité et une précision de chargement de $\pm 1\%$;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Après l'étirement, des photos de fracture doivent être prises pour l'analyse du mécanisme de fracture.

4.3.2 Essai de dureté

La dureté est un indicateur important pour évaluer la capacité de l'alliage de tungstène à résister à la déformation plastique locale et est largement utilisée dans le contrôle des processus, le classement des produits et le tri de qualité.

Méthodes et normes d'essai courantes :

- **Dureté Brinell (HB) :**
 - Convient aux alliages de tungstène moyennement et faiblement durs ;
 - Norme : ASTM E10 / GB/T 231.1 ;
 - Plage de charge : 5003000 kgf , diamètre de la tête sphérique 2,510 mm.
- **Dureté Rockwell (HRC/HRB) :**
 - Convient pour les tests de dureté de surface des barres finies ;
 - Norme : ASTM E18 / GB/T 230.1 ;
 - L'alliage de tungstène est généralement compris entre 6080 HRB, ou jusqu'à 2040 HRC (certains états de traitement thermique).
- **Dureté Vickers (HV) :**
 - Utilisé pour les tests de microdureté des alliages de tungstène sur micro-zone ou de petite taille ;
 - Norme : ASTM E384 / GB/T 4340.1 ;
 - Applications : interface, raffinement du grain, évaluation de la structure des microalliages .

Autres notes :

- Il est nécessaire de polir la surface jusqu'à obtenir une finition miroir avant le test pour garantir que l'empreinte est claire et mesurable ;
- Le point de test doit être éloigné des bords, des fissures et des pores ;
- Pour les alliages de tungstène à haute dureté, il est recommandé d'utiliser un pénétrateur dur et une solution de test à faible charge.

4.3.3 Essai de résistance aux chocs

L'essai d'impact évalue la capacité du matériau à absorber l'énergie sous des charges dynamiques, reflétant ainsi sa résistance à la rupture fragile. Il s'agit d'un indicateur extrêmement important de la résistance de l'alliage de tungstène aux charges perforantes et dynamiques.

Normes communes :

- **ASTM E23 / GB/T 229** : Norme d'essai de choc Charpy sur métal ;
- **ISO 148- 1** : Norme d'essai de choc pour matériaux métalliques.

Exemples d'exigences :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Taille standard : 55 × 10 × 10 mm avec encoche en V ou en U ;
- La taille de l'encoche et la précision du traitement doivent être strictement contrôlées ;
- Nombre d'échantillons : Généralement, 3 pièces par lot sont en moyenne.

Instructions spéciales :

- Les alliages de tungstène présentent souvent une faible énergie d'absorption d'impact (<10 J) en raison de leur grande fragilité ;
- Afin d'améliorer la ténacité, une conception à grains ultrafins ou à microalliage est généralement adoptée ;
- Après l'impact, la surface de fracture peut être analysée par métallographie ou MEB pour identifier les modes de fracture fragiles/ductiles.

4.3.4 Essai de performance en fatigue et en fluage (facultatif)

Dans certaines conditions de service extrêmes (telles que les systèmes inertiels aérospatiaux et les composants de réacteurs nucléaires), les tiges en alliage de tungstène doivent également présenter une excellente résistance à la fatigue et une stabilité au fluage à haute température.

Normes connexes :

- ASTM E466 / GB/T 3075 : Méthode d'essai de fatigue du métal (fatigue à cycles élevés) ;
- ASTM E139 / GB/T 2039 : Méthode d'essai de fluage du métal (contrainte constante à haute température).

Description de l'application :

- Les tests de fatigue sont utilisés pour évaluer la durée de vie des matériaux soumis à des contraintes cycliques ;
- Les essais de fluage sont souvent réalisés à des températures élevées (800-1000°C) et à des charges constantes ;
- Les deux sont souvent utilisés dans l'énergie nucléaire, l'exploration de l'espace lointain et le développement de matériaux pour les armes hypersoniques.

4.3.5 Critères d'évaluation des résultats des tests de propriétés mécaniques

Les exigences relatives aux propriétés mécaniques des tiges en alliage de tungstène varient selon les normes. Par exemple :

| projet | Qualité industrielle générale | Qualité militaire/aérospatiale | Qualité médicale/nucléaire |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| résistance à la traction | ≥ 700 MPa | ≥ 900 MPa | ≥ 1000 MPa |
| Élongation | ≥ 5% | ≥ 10 % | ≥ 12 % |
| Dureté (HRB) | 70~85 | 75~90 | 78~92 |
| Résistance aux chocs (J) | ≥ 6 J | ≥8 J | ≥10 J |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La base de jugement spécifique doit se référer aux dessins de conception du produit, aux accords techniques ou aux spécifications de l'appel d'offres.

résumé

Les tiges en alliage de tungstène doivent être rigoureusement testées conformément au système de normes internationales faisant autorité afin de garantir l'exactitude, la traçabilité et l'universalité des données pour les projets multinationaux. Les normes ASTM, GB, ISO et autres couvrent l'ensemble de la chaîne d'essais, de la traction à la dureté, en passant par l'impact, la fatigue et le fluage, et constituent la base essentielle du contrôle qualité et du choix des matériaux des tiges en alliage de tungstène. Avec l'expansion continue des domaines d'application haut de gamme, des exigences plus élevées sont également imposées en matière d'automatisation, de numérisation et de précision des méthodes de détection.

4.4 Analyse métallographique et caractérisation microstructurale

L'analyse métallographique et la caractérisation microstructurale sont des moyens importants pour évaluer la structure interne et le potentiel de performance des tiges en alliage de tungstène. L'observation et la mesure de la morphologie interne des grains, de la distribution des phases, des pores, des inclusions et d'autres caractéristiques du matériau permettent de déterminer le degré de densification du procédé de métallurgie des poudres, l'uniformité de la diffusion des éléments de l'alliage, l'effet du traitement thermique et les défauts d'organisation, et de prédire le comportement en service et la fiabilité. Il s'agit d'un élément clé du contrôle qualité, de l'optimisation des procédés et de la recherche et développement de nouveaux matériaux.

4.4.1 Objectif et importance de l'analyse métallographique

L'analyse métallographique n'est pas seulement un moyen important de recherche fondamentale en science des matériaux, mais joue également les rôles clés suivants dans la pratique de production de tiges en alliage de tungstène :

- **Évaluer la qualité du frittage et la porosité** : observer la distribution, la taille et la morphologie des pores pour déterminer le niveau de densification ;
- **Déterminer la taille et l'uniformité des grains** : des grains petits et uniformes sont souvent associés à des propriétés de résistance et de ténacité élevées ;
- **Identifier la structure limite de phase** : La clarté de l'interface entre les particules W et la phase matricielle Ni-Fe/Cu affecte les propriétés mécaniques globales ;
- **inclusions microscopiques** : y compris l'origine des fissures, la zone non fusionnée, l'accumulation d'impuretés et d'autres problèmes ;
- **Etudier la distribution des éléments et le comportement de précipitation** : analyser les changements microstructuraux tels que la diffusion des éléments d'alliage et la précipitation de seconde phase.

4.4.2 Processus de préparation des échantillons

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La dureté et la densité élevées des alliages de tungstène imposent des exigences élevées en matière de préparation métallographique des échantillons. Les étapes standard de préparation des échantillons sont les suivantes :

1. **Découpe** : Utiliser une fraise diamantée à basse vitesse pour éviter la surchauffe et les microfissures ;
2. **Montage** : Utilisez des matériaux de montage chauds ou froids pour fixer l'échantillon, ce qui est pratique pour l'opération de meulage ;
3. **Ponçage grossier** : commencez avec du papier de verre de grain 120 et poncez progressivement jusqu'à obtenir du papier de verre de grain 800 à 1200 pour le garder lisse ;
4. **Meulage fin et polissage** :
 - Utilisez un liquide de polissage diamanté de 3 μm , 1 μm et 0,25 μm ;
 - Il ne doit pas y avoir de rayures, de taches d'oxydation ou de lignes brossées après le polissage ;
5. **Gravure chimique** :
 - Formule courante de solution de gravure (référence) :
 - Acide fluorhydrique + acide nitrique + eau (dangereux, veuillez faire attention à la sécurité) ;
 - Mélange chlorure de fer + acide chlorhydrique + éthanol ;
 - Le temps de gravure est contrôlé entre quelques secondes et quelques dizaines de secondes afin de révéler l'interface du grain et la distribution des phases.

4.4.3 Méthode d'observation de la microstructure

(1) Microscopie optique (MO)

- **Plage de résolution** : 0,5~1 μm ;
- **Principales applications** :
 - Observation et mesure de la taille des grains ;
 - Répartition de la porosité et identification des macro-défauts ;
 - de la morphologie des limites de phase et de la distribution tissulaire ;
- La taille des grains et la porosité peuvent être comptées automatiquement **avec le logiciel d'analyse d'image**.

(2) Microscopie électronique à balayage (MEB)

- **La résolution est meilleure que 10 nm** , ce qui est l'outil principal pour l'analyse de la structure des alliages de tungstène ;
- **Contenu applicable** :
 - Observation à fort grossissement de l'interface entre les particules W et la matrice Ni-Fe/Cu ;
 - Détecter les microfissures, les micro-trous, les inclusions, les manques de fusion et autres défauts ;
 - Combiné à la spectroscopie dispersive en énergie (EDS) pour analyser la distribution spatiale des éléments ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Analyse de fracture** : permet de déterminer les caractéristiques de fracture fragile ou ductile (plan de clivage, fossette, structure quasi-clivée, etc.).

(3) Microscopie électronique à transmission (MET)

- **Ultra-haute résolution (<1 nm)** ;
- **Contenu de la recherche** :
 - Structure des joints de grains et distribution des dislocations ;
 - Couche de réaction interfaciale ou précipitation en deuxième phase ;
 - Analyse structurale au niveau atomique et recherche sur la distorsion cristalline ;
- **Champ d'application** : Principalement utilisé dans la recherche scientifique ou la mise à niveau et le développement d'alliages de tungstène.

(4) Spectroscopie énergétique (EDS / WDS)

- L'EDS est adapté à l'analyse qualitative et semi-quantitative rapide de plusieurs éléments ;
- La WDS (spectroscopie dispersive en longueur d'onde) convient à l'analyse des éléments traces fins (tels que O, C) ;
- Associé au MEB, il est utilisé pour étudier la distribution et l'uniformité de diffusion du Ni, Fe, Cu, etc. dans la matrice de tungstène.

(5) Diffraction des rayons X (DRX)

- Utilisé pour confirmer la structure cristalline et les types de phase de chaque métal ;
- Peut détecter s'il y a des impuretés telles que l'oxyde de tungstène et le carbure ;
- Prend en charge l'estimation de la taille des grains et l'analyse de la résistance de la texture (avec balayage directionnel).

4.4.4 Critères d'évaluation de la taille des grains et de la composition des phases

Méthode d'évaluation de la granulométrie :

- **GB/T 6394** « Méthode de détermination de la granulométrie moyenne des métaux » ;
- **ASTM E 112** : Évaluation de la qualité des grains par tableau de comparaison standard ou analyse d'image ;
- Les grains fins sont généralement classés au-dessus du grade 9 (correspondant à une granulométrie moyenne inférieure à 15 μm) ;
- Une structure inégale, des grains grossiers et des inclusions aux limites des grains ne sont pas des éléments qualifiés.

Analyse de phase et méthodes quantitatives :

- rapport de surface de chaque phase après partitionnement de l'image optique ou MEB ;
- Segmentation en niveaux de gris et mesure de la distribution de la phase W typique/ phase de base Ni-Fe ;
- L'EDS combiné à un logiciel d'analyse d'image peut permettre une quantification des composants régionaux.

4.4.5 Analyse de la relation entre la microstructure et les performances

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Caractéristiques microscopiques | Impact sur les performances |
|---|--|
| Grains petits et uniformes | Améliorer la résistance et la ténacité, réduire les sources de fissures |
| La distribution des particules W est uniforme | Favorise la résistance aux chocs et un transfert de charge uniforme |
| L'interface W/Ni-Fe est étroitement liée | Améliorer la plasticité globale et la résistance aux chocs |
| Porosité élevée ou distribution inégale | Réduisent la résistance et la densité et deviennent facilement l'origine de fissures |
| Des microfissures/inclusions existent | Peut provoquer une fracture prématurée et réduire la durée de vie en fatigue |
| Précipitation de la deuxième phase grossière | Peut devenir un point de concentration de contraintes, entraînant une diminution des propriétés mécaniques |

résumé

L'analyse métallographique et la caractérisation microstructurale sont des outils indispensables pour les tiges en alliages de tungstène, du contrôle des matières premières à la vérification des performances du produit final. Grâce à la combinaison de la microscopie optique, du MEB, du MET, de la DRX et d'autres technologies, nous pouvons non seulement acquérir une compréhension approfondie des lois d'évolution organisationnelle et des défauts microscopiques au sein des alliages de tungstène, mais aussi fournir un support technique solide pour l'optimisation de la production et la conception de nouveaux produits. Avec le développement de la reconnaissance d'images et des technologies d'analyse assistée par IA, l'analyse métallographique des alliages de tungstène évolue vers l'automatisation, la quantification et l'intelligence.

4.5 Analyse de la composition chimique (ICP, XRF, ONH)

détermine directement leurs performances et leur fiabilité. Dans les alliages de tungstène haute densité tels que W-Ni-Fe et W-Ni-Cu, la proportion d'éléments principaux (telle que la teneur en tungstène est généralement de 85 % à 98 %), le contrôle des impuretés (C, O, N, H, P, S) et les oligo-éléments (Cr, Co, Mo, etc.) ont un impact significatif sur les propriétés physiques, mécaniques, de transformation et de service de l'alliage. Par conséquent, la mise en place d'un système d'analyse de la composition chimique précis et complet est essentielle pour garantir la qualité des produits et répondre aux spécifications et aux exigences des clients.

4.5.1 Importance de l'analyse de la composition chimique

les tiges en alliage de tungstène comprennent :

- **Confirmer si la nuance d'alliage est conforme à la norme** (comme A, B, C dans la norme ASTM B777) ;
- **Vérifier la stabilité des ingrédients et du processus de fusion** ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Contrôler la teneur en impuretés nocives (telles que O, N, C, S, P) pour éviter la fragilité et la tendance aux fissures ;
- Analyser la composition anormale des produits défectueux ;
- Prend en charge la traçabilité des matériaux et le contrôle de la qualité des lots .

4.5.2 Aperçu des principales méthodes d'analyse chimique

| Catégorie de méthode | Objet d'analyse | Caractéristiques |
|---------------------------------------|--|---|
| ICP-OES / ICP-MS | Éléments métalliques (composant principal + traces) | Haute sensibilité, adaptée à l'analyse simultanée de plusieurs éléments |
| XRF (spectroscopie de fluorescence X) | Composant principal en métal | Rapide et non destructif, adapté à l'analyse sur site ou par lots |
| Analyse ONH | Oxygène, azote, hydrogène | Méthode de pyrolyse à haute température, adaptée au tungstène et à ses alliages |
| Analyseur CS | Carbone, soufre | Méthode de combustion à l'arc, rapide et efficace |
| Analyse chimique par voie humide | Éléments spécifiques | Haute précision, mais faible efficacité et risque élevé de contamination |

Les normes spécifiques doivent faire référence à :

- ASTM B777, B702;
- GB/T 21114, GB/T 38792;
- Normes clients ou militaires/aérospatiales.

résumé

Les tiges d'alliage de tungstène couvrent les éléments macro-principaux, les traces d'impuretés et les traces d'éléments gazeux, et constituent le principal moyen d'évaluer la stabilité, la pureté et la consistance des alliages. Les technologies de détection modernes, telles que les analyseurs ICP-OES, XRF et ONH, permettent un contrôle de composition automatisé et de haute précision, à haut débit, améliorant considérablement l'efficacité du contrôle qualité. À l'avenir, avec le développement de la fabrication intelligente, ces technologies seront également plus largement utilisées pour la surveillance en ligne, la traçabilité des lots et l'optimisation des procédés en boucle fermée.

4.6 Détection de la rugosité de surface et des défauts (inspection visuelle, CT)

La qualité de surface des tiges en alliage de tungstène influence non seulement directement la durée de vie, la précision d'assemblage et l'aspect du matériau, mais est également étroitement liée à la dissipation thermique, à la concentration des contraintes et à l'apparition de fissures de fatigue, etc., lors des applications ultérieures. Par conséquent, le contrôle de la rugosité de surface et la détection des défauts sont des éléments essentiels à l'évaluation de la qualité des produits finis. Avec le développement continu des technologies de détection, l'inspection visuelle manuelle traditionnelle

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a progressivement été associée à des moyens haut de gamme tels que l'imagerie numérique, la tomographie 3D et le balayage laser des contours, pour des processus de détection efficaces, automatisés et précis.

4.6.1 Signification et définition de l'indice des essais de rugosité de surface

La rugosité de surface est un paramètre important qui caractérise le degré d'irrégularité microscopique de la surface de la pièce. Elle affecte non seulement l'assemblage, le frottement, l'usure, la conductivité thermique et la résistance à la fatigue des tiges en alliage de tungstène, mais aussi l'adhérence et la résistance à la corrosion des revêtements.

Paramètres de rugosité courants (selon GB/T 3505, ISO 4287) :

| Nom du paramètre | signification | unité |
|------------------|---|-------|
| Râ | Rugosité moyenne arithmétique, l'indicateur le plus couramment utilisé | µm |
| R | Hauteur maximale (moyenne de cinq points) | µm |
| R | Hauteur totale (la différence entre le sommet le plus élevé et la vallée la plus basse) | µm |
| R | Rugosité RMS (plus sensible aux pics) | µm |

4.6.2 Méthodes et équipements d'essai de rugosité de surface

(1) Testeur de rugosité de contact

- **Principe** : La sonde est déplacée le long de la surface pour enregistrer les changements de contour ;
- **Matériel représentatif** : Japon Mitutoyo SJ-210, Allemagne Mahr Perthometer ;
- **Avantages** : Mesure précise, adaptée aux pièces standard en lots ;
- **Limitations** : Ne convient pas aux surfaces molles ou très réfléchissantes, opération de contact requise.

(2) Interféromètre laser confocal ou à lumière blanche sans contact

- **Principe** : Utiliser l'interférométrie laser/lumière blanche pour construire une carte de contours 3D ;
- **Avantages** :
 - Essais sans contact et non destructifs ;
 - Haute précision (niveau nanométrique) ;
 - Peut scanner rapidement de grandes zones ;
- **Appareils représentatifs** : série Keyence VK-X, Zygo Nexview , Sensofar

(3) Scanner de profil 3D/projecteur de lumière structurée

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Application** : Il peut être utilisé pour détecter la cohérence globale du profil de surface, les marches, les creux, etc. de la barre ;
- ****Convient aux tests de lots sur site ou aux inspections de qualité assistées visuellement.**

4.6.3 Technologie et application de détection des défauts de surface

Les défauts qui peuvent survenir lors du formage ou du traitement des tiges en alliage de tungstène comprennent :

- Fissures, rayures et piqûres de surface;
- Couche d'oxyde, taches noires, résidus de carbone ;
- Adhérences, décollements, piqûres ;
- Déformation géométrique ou ovalisation hors tolérance.

(1) Inspection visuelle

- **Norme** : Description de l'état de surface dans GB/T 8170 / ASTM B777 ;
- **Méthode** : Yeux nus + loupe (3X~10X) ;
- **Règles de jugement typiques** :
 - Aucune fissure ni écaillage ne sont autorisés ;
 - Une différence de couleur de surface et de légères marques de frottement sont acceptables (selon le niveau d'application) ;
 - La taille du défaut dans une zone spécifique ne dépasse pas une certaine valeur (par exemple $\leq 0,5$ mm).

(2) Appareil photo numérique + système de reconnaissance d'image

- Appliqué à la détection en ligne des lignes d'assemblage ;
- Grâce à des algorithmes d'apprentissage automatique, il peut identifier automatiquement les rayures, les trous et les anomalies de couleur ;
- Le taux de précision peut atteindre plus de 95 %, ce qui est particulièrement adapté au dépistage d'apparence à grande échelle.

(3) Tomodensitométrie tridimensionnelle (TDM)

- **Principe** : Utiliser un balayage multi-angle à rayons X pour reconstruire une image volumique tridimensionnelle ;
- **Contenu détectable** :
 - Pores internes, inclusions, fissures et relâchement ;
 - Profondeur de la fissure de surface et direction d'extension ;
 - Uniformité du tissu au centre et au bord de la tige ;
- **Matériel représentatif** : Nikon, GE phoenix, Yxlon ;
- **Résolution** : jusqu'à 1 à 5 μ m , adaptée à l'analyse des produits militaires haut de gamme, de l'énergie nucléaire et des tiges en alliage de tungstène aérospatial.

4.6.4 Évaluation du niveau de défaut et détermination de la qualité

L'évaluation de divers défauts de surface nécessite la formulation de critères de jugement adaptés aux exigences des différents domaines d'application. Voici une classification de référence :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Type de défaut | Alliage de tungstène militaire/nucléaire | Alliage de tungstène à usage industriel |
|---------------------|--|---|
| fissure | interdire | interdire |
| Fosses | ≤ 0,3 mm | ≤ 0,8 mm |
| Taches d'oxydation | Ne peut pas exister | Peut exister légèrement |
| Rugosité de surface | Ra ≤ 0,4 μm | Ra ≤ 1,6 μm |

Les normes de référence pertinentes comprennent :

- **GB/T 13306** : Terminologie des défauts de surface des métaux ;
- **ASTM E45/E 1245** : Méthode de détection des inclusions et des défauts ;
- **YS/T 582** : Spécification d'inspection de la qualité des produits en alliage de tungstène (norme industrielle).

4.6.5 Tendances en matière d'automatisation et de tests intelligents

Les entreprises modernes de fabrication de tiges en alliage de tungstène introduisent progressivement :

- **Système d'inspection visuelle en ligne** : fonctionne de manière synchrone avec le centre d'usinage CNC pour réaliser une inspection de la qualité de l'apparence en temps réel à 100 % ;
- **Plateforme de reconnaissance d'images IA** : formation de modèles de caractéristiques de défauts basés sur l'apprentissage profond pour améliorer la précision de la reconnaissance ;
- **modélisation d'imagerie en taille réelle** : numérisation laser ou lumière blanche pour obtenir la topologie complète de la surface de la barre ;
- **Analyse de données volumineuses de qualité** : suivi des défauts, association d'équipements et optimisation des itérations de processus.

Ces technologies ont considérablement amélioré l'efficacité de détection et la stabilité de la qualité, aidant la fabrication de tiges en alliage de tungstène haut de gamme à évoluer vers une direction « zéro défaut ».

résumé

La rugosité de surface et la détection des défauts sont essentielles pour faire passer les tiges en alliage de tungstène du statut de « matériaux fonctionnels » à celui de « composants structurels de précision ». Grâce à la mesure de la rugosité avec ou sans contact, à l'imagerie par tomographie, à la reconnaissance visuelle et à d'autres moyens techniques, la qualité de surface et les défauts internes du matériau peuvent être parfaitement appréhendés. À l'avenir, la détection intelligente, le contrôle qualité automatisé et la prédiction des défauts basée sur les données deviendront des fonctionnalités clés de la fabrication haut de gamme de tiges en alliage de tungstène.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.7 Technologie de contrôle non destructif (ultrasons, rayons X, particules magnétiques)

Les tiges en alliage de tungstène sont principalement utilisées dans des secteurs exigeant une fiabilité élevée, tels que l'aéronautique, l'armée, l'énergie nucléaire et le médical, qui imposent des exigences extrêmement élevées en matière de qualité interne et d'intégrité structurelle. Les essais destructifs conventionnels permettent d'obtenir certaines données mécaniques et microscopiques, mais ne permettent pas d'évaluer pleinement les défauts internes de la tige dans son ensemble. Par conséquent, le recours aux **techniques de contrôle non destructif (CND)** pour identifier et évaluer les défauts cachés tels que les fissures, les trous, les inclusions et les jeux dans les tiges en alliage de tungstène est indispensable pour garantir la sécurité, la fiabilité et la stabilité des produits.

Cette section présentera systématiquement les trois méthodes de contrôle non destructif typiques applicables aux tiges en alliage de tungstène : **le contrôle par ultrasons (UT), le contrôle radiographique (RT) et le contrôle par particules magnétiques (MT)** .

4.7.1 Contrôle par ultrasons (UT)

Principes et avantages :

Les contrôles par ultrasons utilisent des ondes sonores à haute fréquence (1 à 10 MHz) qui se propagent dans le matériau. Lorsqu'un matériau rencontre des structures discontinues telles que des interfaces, des pores et des fissures, un signal réfléchi est généré, reçu et analysé par le transducteur afin de déterminer la présence de défauts.

- **Convient à la détection des défauts internes de l'alliage de tungstène** , en particulier des pores, des inclusions et des zones non densifiées ;
- **Forte pénétration et grande profondeur de détection** , adaptée aux barres de diamètre moyen et épais ($\Phi 6 \sim \Phi 100$ mm) ;
- **La numérisation et la détection automatiques peuvent être réalisées** .

Méthode de détection :

- Utiliser des ondes longitudinales (sonde droite) ou des ondes de cisaillement (sonde d'angle) ;
- Le système multicanal permet une couverture complète de la surface et sous plusieurs angles ;
- Les équipements haut de gamme sont équipés de capacités ****A-scan (amplitude vs. temps) et C-scan (image 2D) **** .

Base standard :

- **ASTM E114 / E 2375** : Norme pour le contrôle par ultrasons des matériaux métalliques ;
- **GB/T 12604.1, GB/T 5777** : Méthode de contrôle par ultrasons pour pièces/barres métalliques forgées.

Points techniques :

- L'alliage de tungstène présente une grande atténuation acoustique, il convient donc d'utiliser une sonde à haute énergie (par exemple 5 MHz) ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La sensibilité de détection doit être ajustée pour pouvoir identifier les défauts de 0,2 à 0,5 mm ;
- La surface doit être polie pour réduire l'erreur de la couche de couplage ;
- Après détection, la position, la profondeur et l'amplitude de l'onde de réflexion du défaut doivent être enregistrées pour déterminer son niveau.

Diagramme d'identification des défauts :

| Type de défaut | Caractéristiques de l'échographie |
|----------------------|---|
| fissure | Signal hautement réfléchissant avec des limites claires |
| Porosité | Modérément réfléchissant, forme irrégulière |
| Manque de zone dense | Écho en couches, réflexions multiples |

4.7.2 Test radiographique (RT)

Principe et application :

Les contrôles radiographiques utilisent des rayons X ou gamma pour pénétrer les matériaux. Les zones de densité ou d'épaisseur différentes ont des capacités d'absorption du rayonnement différentes. L'image de transmission du rayonnement est enregistrée sur une plaque d'imagerie (film ou détecteur numérique) afin d'identifier les défauts internes.

- **Applicable à la détection de défauts de différence de densité tels que pores, fissures, inclusions, etc. dans les tiges en alliage de tungstène ;**
- **les défauts proches de la surface ou profonds ;**
- **Souvent utilisé comme moyen d'évaluation de la qualité finale ou d'acceptation de haut niveau .**

Équipement d'essai :

- Machine à rayons X industrielle (tension du tube 160~320 kV) ;
- Les sources gamma isotopiques (telles que l'Ir-192) sont utilisées pour les barres à parois épaisses ;
- Le système de radiographie numérique (DR/CR) peut réaliser des images haute définition en temps réel.

Indicateurs techniques :

- Taille minimale du défaut détectable : environ 0,1 à 0,3 mm ;
- La clarté de l'image et la sensibilité de détection dépendent de l'énergie du rayonnement, du temps d'exposition et de la distance focale ;
- Il est souvent nécessaire de vérifier la résolution de l'image à l'aide d'un bloc de test de comparaison (IQI).

Normes de test :

- **ASTM E1742, E 1030 ;**
- **GB/T 3323, GB/T 19802 ;**
- Le domaine de l'énergie nucléaire médicale doit également répondre à des normes plus strictes telles que les normes ISO 5579 et EN 462.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Avantages et limites :

| avantage | limite |
|---|--|
| Les images de détection sont intuitives et les enregistrements peuvent être sauvegardés | Coût élevé de l'équipement et fonctionnement compliqué |
| La porosité, les fissures et les inclusions peuvent être identifiées | Insensible aux défauts de faible différence de densité |
| Peut être utilisé pour l'inspection finale et l'analyse des défaillances | Pénétration limitée dans les pièces épaisses et de grande taille |

4.7.3 Essais par particules magnétiques (MT)

principe:

Lors de la magnétisation de matériaux ferromagnétiques, la présence de défauts tels que des fissures, des inclusions et des matériaux non fusionnés à la surface ou à proximité génère des champs de fuite magnétique. Après pulvérisation de poudre magnétique, celle-ci s'accumule au niveau des défauts et forme des traces visibles.

- **défauts de surface/proche de la surface ;**
- Il est principalement utilisé pour les tiges en alliage de tungstène contenant du fer (telles que la série W-Ni-Fe), mais pas pour la série W-Ni-Cu.

Méthode de détection :

- La magnétisation AC est utilisée pour détecter les défauts de surface ;
- La magnétisation CC peut détecter des défauts légèrement plus profonds (1 à 3 mm) ;
- La méthode humide (suspension magnétique) ou la méthode sèche de la poudre magnétique peuvent être utilisées ;
- Un liquide de contraste noir et blanc ou une poudre magnétique fluorescente combinés à une lumière ultraviolette améliorent la reconnaissance.

Normes applicables :

- **ASTM E 709** : Principes généraux des techniques d'essai par particules magnétiques ;
- **GB/T 15822, JB/T 6063** : Méthode d'essai par particules magnétiques et évaluation de la qualité ;

Analyse des fonctionnalités :

| Avantages | Limites |
|---|---|
| Faible coût et vitesse de détection rapide | Matériaux ferromagnétiques uniquement (système Ni-Fe) |
| Le positionnement des défauts est intuitif et très sensible | Impossible de détecter les défauts profonds ou non ouvrants |
| Convient aux opérations par lots sur site | Les résidus de poudre et les risques de contamination doivent être nettoyés |

4.7.4 Évaluation de la qualité des défauts et critères d'essais non destructifs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Afin de garantir une évaluation uniforme de la qualité, il est nécessaire de déterminer si les défauts dépassent la limite selon les normes en vigueur, par exemple :

| Type de défaut | Taille maximale autorisée (exemple, tige de $\Phi 20$ mm) | Est-ce autorisé ? |
|----------------------------|---|-------------------|
| fissure | Pas autorisé à exister | Non |
| trous | $\leq 0,3$ mm, non dense | Oui |
| Superposition | Non autorisé | Non |
| Inclusions non métalliques | $\leq 0,5$ mm, uniformément réparti | Selon le niveau |

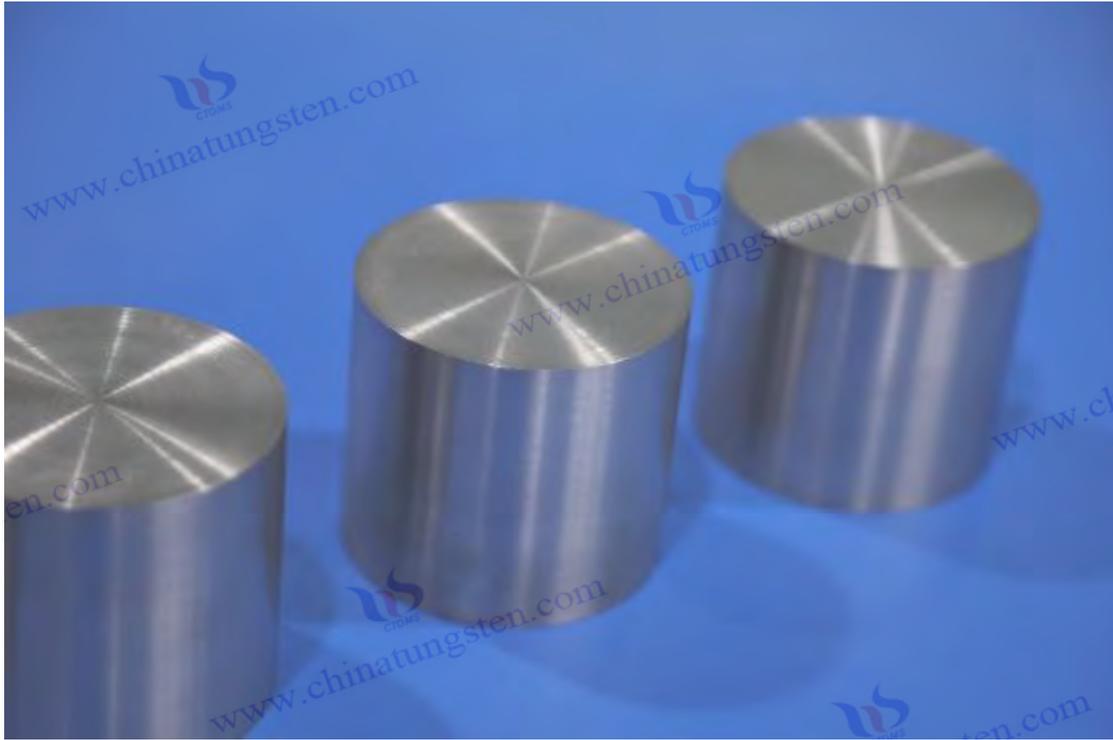
Normes de notation communes :

- **ASTM B777/B 702** : Norme de référence pour les essais non destructifs des alliages de tungstène ;
- **GB/T 38561, GB/T 31928** : Normes spéciales pour les essais d'alliages de tungstène ;
- **Accord technique client** : les normes personnalisées pour l'aviation, l'énergie nucléaire, etc. sont plus strictes.

résumé

Pour les tiges en alliage de tungstène, la technologie de contrôle non destructif permet d'identifier les défauts internes et de surface sans détruire le matériau. Le contrôle par ultrasons est adapté à l'évaluation de la qualité interne de la plupart des tiges ; le contrôle par rayons X offre des avantages évidents en termes d'images visuelles et constitue un outil indispensable pour les produits haut de gamme ; le contrôle par particules magnétiques offre une capacité d'identification très sensible des microfissures de surface. Une combinaison judicieuse de ces trois techniques permet d'obtenir une assurance qualité complète et multi-niveaux pour les tiges en alliage de tungstène.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 5 Domaines d'application typiques des tiges en alliage de tungstène

5.1 Contrepoids et composants inertiels aérospatiaux

Les tiges en alliage de tungstène occupent une place essentielle et irremplaçable dans le secteur aérospatial, et sont particulièrement adaptées aux **systèmes de contrepoids** et aux **composants inertiels**. Grâce à leur densité ultra-élevée, leur bonne aptitude à la transformation et leur excellente stabilité structurelle, elles sont largement utilisées dans l'équilibrage des masses, la régulation de l'énergie cinétique et les systèmes de contrôle d'attitude des avions, satellites, missiles, drones et autres aéronefs. Elles comptent parmi les principaux représentants des matériaux métalliques hautes performances de l'industrie aérospatiale actuelle.

5.1.1 Contexte et exigences relatives aux systèmes de contrepoids

Dans les systèmes aérospatiaux, les ensembles de contrepoids sont souvent utilisés aux fins suivantes :

- **Contrôle du centre de gravité** : Afin de maintenir la stabilité de l'attitude de l'avion et la répartition raisonnable de son moment d'inertie, il est nécessaire de configurer des contrepoids de précision dans la zone de décalage structurel ou de puissance ;
- **Équilibrage dynamique** : Dans les structures rotatives à grande vitesse (telles que les gyroscopes, les rotors de moteurs, les volants d'inertie, etc.), des contrepoids sont utilisés pour régler avec précision le couple déséquilibré afin d'éviter la résonance ou la fatigue ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Compensation de la consommation de carburant** : À mesure que l'utilisation de carburant liquide diminue, le centre de gravité de l'avion se déplace et l'équilibre est maintenu par des poids dynamiques en alliage de tungstène ;
- **Réglage de l'attitude** : certains systèmes satellites/missiles utilisent des poids en tungstène coulissants ou mobiles pour une compensation précise du contrôle de l'attitude.

En raison de l'espace limité, la conception des avions exige que le matériau utilisé **soit le plus lourd possible par unité de volume**, tout en offrant une bonne **résistance aux vibrations, une bonne stabilité structurelle et une bonne adaptabilité environnementale**. L'apparition des tiges en alliage de tungstène répond parfaitement à cette exigence.

5.1.2 Avantages matériels des tiges en alliage de tungstène

Les tiges en alliage de tungstène (généralement les systèmes W-Ni-Fe ou W-Ni-Cu) présentent les avantages significatifs suivants par rapport aux autres matériaux métalliques :

| Paramètres de performance | Tige en alliage de tungstène | plomb | Acier inoxydable | Alliage de titane |
|--|--|------------|------------------|---------------------|
| Densité (g/cm ³) | 17,0–18,8 | 11.3 | ~7,8 | ~4,5 |
| Résistance (MPa) | 700–1000 | 15–30 | 500–800 | 900–1100 |
| Stabilité de la température | Excellent (> 1200 °C aucune réduction de plasticité) | Différence | bien | excellent |
| Protection de l'environnement/toxicité | Non toxique et respectueux de l'environnement | toxique | Non toxique | Non toxique |
| Adaptabilité du traitement | bien | facile | moyen | Difficile à traiter |

Par conséquent, l'alliage de tungstène est une option de mise à niveau idéale pour remplacer les matériaux traditionnels tels que le plomb dans les systèmes de contrepoids aérospatiaux.

Structure typique d'une tige de contrepoids en alliage de tungstène

les contrepoids destinés à l'aérospatiale prennent souvent les formes suivantes :

1. **Barre ronde/barre carrée standard**
 - Utilisé pour les rotors gyroscopiques, les anneaux d'inertie ou les poids centralisés au fond des réservoirs de carburant ;
2. **Tige fileté/boulon en tungstène**
 - Facile à installer ou à retirer de la structure, souvent utilisé pour les contrepoids de satellite ou les tests au sol ;
3. **Blocs/inserts de formes spéciales usinables**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Des structures de rainurage, de poinçonnage ou de marches personnalisées en fonction de la structure de l'avion peuvent être étroitement intégrées dans la cabine ;
- 4. **Tige de tungstène amovible/coulissante**
 - Appliqué aux systèmes de contrôle d'attitude, le centre de gravité peut être ajusté en se déplaçant le long du rail de guidage ;
- 5. **Insert en tôle mince/tige courte en alliage de tungstène**
 - Utilisé pour le réglage de l'inertie des pales et des structures du rotor.

5.1.4 Exigences de performance clés

Les tiges en alliage de tungstène de qualité aéronautique doivent répondre aux indicateurs suivants :

- **Densité** : $\geq 17,5 \text{ g/cm}^3$, contrôlée à $\pm 0,05 \text{ g/cm}^3$;
- **Précision dimensionnelle** : $\pm 0,01 \sim \pm 0,05 \text{ mm}$, nécessite un tournage et un meulage fins ;
- **Propriétés mécaniques** :
 - Résistance à la traction $\geq 750 \text{ MPa}$;
 - Allongement $\geq 10 \%$, garantissant la résistance aux chocs ;
- **Rugosité de surface** : $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$ (exigence de surface brillante) ;
- **Exigences magnétiques** : Certains systèmes inertiels nécessitent **des alliages de tungstène faiblement magnétiques ou non magnétiques** (W-Ni-Cu est meilleur que W-Ni-Fe) ;
- **Stabilité à haute température** : résistant aux chocs thermiques et aucune déformation structurelle ;
- **Fiabilité** : Les défauts internes peuvent être détectés grâce à des contrôles non destructifs (ultrasons/radio).

5.1.5 Cas d'application pratique

(1) Roue d'inertie et contrôleur d'attitude du satellite

- La tige en alliage de tungstène est utilisée comme **noyau de roue d'impulsion** ou **anneau d'inertie gyroscopique** ;
- Augmentez l'inertie grâce à une densité élevée et améliorez la précision du réglage de l'attitude ;
- De nombreux types de satellites aux États-Unis et en Europe utilisent des tiges haute densité W-Ni-Fe.

(2) Poids d'équilibrage dynamiques pour avions/drones

- Utilisé pour la correction de l'équilibre des ailes, de l'aile arrière et des pales d'hélice ;
- De petites tiges de tungstène peuvent être insérées dans les lames pour affiner le poids ;
- Le marché des drones est en pleine expansion et la demande de tiges de tungstène de précision de petite taille augmente.

(3) Compartiment de queue de missile et contrepoids de la section de guidage

- Afin d'assurer une attitude de vol stable, une tige en tungstène est souvent installée au niveau de la section arrière pour équilibrer le centre de masse ;
- dans la structure du rail coulissant réalise une pondération adaptative ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Nécessite une densité élevée, une forte adhérence et une résistance aux vibrations.

(4) Composants gyroscopiques de moteurs d'avion

- Des poids en tungstène sont placés aux deux extrémités de la tige pour améliorer la stabilité et la vitesse de réponse ;
- Associé à la coque en alliage haute température, il constitue une unité d'inertie dynamique.

5.1.6 Analyse des alternatives avec d'autres matériaux

Avec l'amélioration des réglementations environnementales et la demande croissante de réduction du poids de l'aviation, les tiges en alliage de tungstène remplacent progressivement les matériaux de poids traditionnels suivants :

| Matériel | Motif du remplacement |
|-------------------|---|
| plomb | Hautement toxique, interdit ou restreint dans son utilisation |
| acier | Faible densité, nécessitant un volume plus important pour répondre à la norme |
| alliage de cuivre | Conductivité élevée, peut introduire des interférences électromagnétiques |
| Céramique | Très fragile, incapable de supporter les vibrations et les chocs |

L'alliage de tungstène présente des avantages significatifs en termes de précision du poids, de sécurité, de contrôle du volume et de recyclabilité, et est devenu le choix dominant pour les matériaux de poids aéronautiques haut de gamme.

résumé

Les tiges en alliage de tungstène présentent de nombreux avantages pour les contrepoids et les composants inertiels aéronautiques, notamment une densité élevée, une structure stable, une résistance aux températures élevées et une grande adaptabilité à l'usinage. Elles répondent non seulement aux exigences strictes des avions modernes en matière de contrôle du centre de gravité, mais prennent également en charge une variété de conceptions intégrées. Elles constituent le premier choix pour les matériaux de contrepoids hautes performances. À l'avenir, avec le développement des avions intelligents, des petits satellites et des plateformes hautement dynamiques, les tiges en alliage de tungstène joueront un rôle essentiel dans davantage de structures clés.

5.2 Tige en alliage de tungstène pour équipement militaire (noyau perforant, compartiment de queue de missile)

L'alliage de tungstène joue un rôle crucial dans les équipements militaires en raison de sa densité élevée, de sa résistance élevée, de sa forte rétention d'énergie cinétique et de son excellente capacité de pénétration. Les tiges en alliage de tungstène sont principalement utilisées dans le domaine militaire pour la fabrication de **noyaux de projectiles perforants à énergie cinétique**, **contrepoids du compartiment de queue du missile**, **composants structurels de bombes à pénétration profonde**, **obus explosifs** et **contrepoids du système de vol inertiel**, etc. Ses performances

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

affectent directement la capacité de frappe, la stabilité du vol et l'efficacité au combat du système d'armes.

5.2.1 Principaux avantages des alliages de tungstène pour les applications militaires

Les alliages de tungstène dans le domaine militaire se reflètent dans les aspects suivants :

| Indicateurs de performance | Alliage de tungstène (W-Ni-Fe) | plomb | acier | Alliage d'uranium (DU) |
|------------------------------------|---|------------------|-----------|---------------------------------|
| Densité (g/cm ³) | 17,0 ~ 18,8 | ~11.3 | ~7,8 | ~19.1 |
| Résistance à la traction (MPa) | 700 ~ 1000 | Très faible | 500 ~ 800 | 800 ~ 900 |
| Stabilité thermique | Excellent (>1200°C sans ramollissement) | Différence | moyen | excellent |
| Toxicité/Sécurité environnementale | Non toxique et respectueux de l'environnement | toxique | Sécurité | Forte radioactivité |
| Usinabilité | bien | Facile à traiter | bien | Très mauvais (oxydé et cassant) |

Par conséquent, l'alliage de tungstène est connu comme un « **matériau alternatif à l'uranium appauvri non toxique** » et constitue une base matérielle importante pour les armes cinétiques conventionnelles contemporaines à hautes performances.

5.2.2 Tige en alliage de tungstène dans un projectile perforant

(1) Contexte de l'application

Le pénétrateur à énergie cinétique (KEP) utilise une énergie cinétique à grande vitesse pour pénétrer les cibles blindées. Son composant principal, le « noyau », doit posséder :

- Densité extrêmement élevée pour augmenter l'énergie cinétique ;
- Résistance et dureté extrêmement élevées pour maintenir la capacité de pénétration ;
- Bonne ténacité pour éviter qu'il ne se brise en vol ou ne se désintègre lors de la pénétration d'une armure ;
- Excellente stabilité dynamique pour réduire la déformation et la déflexion.

Le noyau en alliage de tungstène est généralement constitué d'une tige en alliage lourd W-Ni-Fe, qui est transformée en une structure de cône de queue ou de noyau d'aiguille grâce à un formage de précision, un traitement thermique et un usinage.

(2) Paramètres de type et de taille de noyau

| Type de munition | Diamètre typique d'une tige en alliage de tungstène | Rapport hauteur/largeur | Structure de noyau élastique |
|------------------|---|-------------------------|------------------------------|
| | | | |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | | |
|--|--------------|---------|---|
| Canon principal de char APFSDS | Φ18 ~ Φ30 mm | 15 ~ 25 | Tige longue en alliage de tungstène + coque en aluminium |
| Projectile perforant de petit calibre | Φ5 ~ Φ15 mm | 10 ~ 15 | Tige de tungstène solide ou coque en acier à noyau de tungstène |
| Noyau de munition à pénétration profonde | Φ20 ~ Φ60 mm | 5 ~ 10 | Tête conique en alliage de tungstène massif et lourd |

(3) Exigences techniques matérielles

- **Densité** : $\geq 17,5 \text{ g/cm}^3$, de préférence 18,0 ~ 18,5 ;
- **Résistance à la traction** : $\geq 950 \text{ MPa}$;
- **Dureté** : HRC ≥ 35 ;
- **Allongement** : $\geq 10\%$;
- **Microstructure** : dense et uniforme, sans pores, granulométrie contrôlée $\leq 10 \mu\text{m}$;
- **Non magnétique ou faiblement magnétique** (exigences particulières en matière de système de guidage) ;
- **Des tests non destructifs ont permis de vérifier l'absence de défauts tels que des fissures internes et un délaminage intercouche .**

(4) Aperçu du processus de fabrication

1. Préparation des matières premières : mélange de poudre de tungstène de haute pureté + poudre d'alliage Ni/Fe ;
2. Pressage par métallurgie des poudres → frittage en phase liquide à haute température ;
3. Traitement thermique revenu → tournage de précision → polissage ;
4. Revêtement de surface (Mo/Cr) ou traitement par couche d'oxyde (protection thermique, résistance à l'usure) ;
5. Échographie et examen CT.

5.2.3 Tiges en alliage de tungstène dans la structure du contrepoids du compartiment de queue du missile

Description de l'application :

- Dans les missiles tactiques à longue/moyenne portée ou les missiles de défense aérienne, le compartiment de queue (section du cône de queue) est souvent utilisé pour installer des contrepoids afin d'équilibrer le centre de distribution de masse entre le dispositif de propulsion et l'ogive ;
- la tige en alliage de tungstène dans le compartiment de queue joue également un rôle dans **l'augmentation de la stabilité inertielle du vol, l'amélioration de la précision du guidage et la réduction de la déviation du projectile** ;
- Certains systèmes de missiles de haute précision utilisent **des modules de contrepoids à tige de tungstène réglables** pour ajuster l'écart de l'algorithme de guidage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Structure:

- Tige cylindrique/étagée en alliage de tungstène massif ;
- Recouvert d'un matériau isolant ou d'un revêtement céramique pour éviter les interférences électromagnétiques ;
- Les structures traversantes sont dotées de fils intégrés ou d'arbres coulissants.

Exigences et fonctionnalités :

- **Précision de contrôle de la consistance de haute densité ($\pm 0,03 \text{ g/cm}^3$) ;**
- **Exigences de précision d'usinage élevées** (adaptation précise avec le mécanisme de la cabine arrière) ;
- Résistant à la corrosion, aux chocs et longue durée de vie ;
- Le rapport de poids et la position peuvent être préconfigurés en fonction des données de simulation de vol.

5.2.4 Autres applications militaires des tiges de tungstène

- **Bagues en alliage de tungstène pour munitions formées par explosion (EFP) ;**
- **Tiges en alliage de tungstène pour obus explosifs** (pour améliorer l'énergie directionnelle de l'explosion) ;
- **Poids gyroscopiques pour systèmes inertiels militaires ;**
- **Pièces structurales de tige de tungstène résistantes à haute pression pour charges de profondeur ;**
- **Tiges en alliage de tungstène dans les structures militaires d'absorption/blocage de chaleur** (telles que la protection EMP).

5.2.5 Normes et système de conformité pour les produits militaires en alliage de tungstène

Les tiges en alliage de tungstène militaire doivent généralement être conformes aux normes et certifications système suivantes :

| Norme/Système | Contenu |
|--|---|
| GJB/T 3765 | Exigences techniques pour les alliages de tungstène militaires |
| MIL-T-21014 | Spécifications techniques des tiges en alliage de tungstène pour l'armée américaine |
| ASTM B777 Classe IV | Spécifications de l'alliage de tungstène à très haute densité |
| Norme militaire nationale GJB 9001C | Système de gestion de la qualité de la défense |
| ISO 10204 3.2 | Rapport de certification de qualité de niveau militaire par un tiers |
| NADCAP / ITAR / AS9100 | Exigences relatives aux matériaux utilisés dans les produits militaires aéronautiques |

De plus, les produits de haute qualité doivent fournir : la traçabilité du numéro de four, le rapport de lot de poudre d'origine, le rapport complet de test non destructif du processus et les données complètes d'inspection des propriétés mécaniques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résumé

Les tiges en alliage de tungstène remplissent la double fonction de « pénétration du noyau » et d'« ancrage de stabilisation structurelle » dans les équipements militaires, notamment pour la structure du noyau de projectile cinétique et du compartiment de queue de missile, exploitant pleinement leurs avantages tels que leur densité élevée, leur résistance élevée et leur stabilité thermique. Poussé par la tendance à remplacer l'uranium appauvri, respectueux de l'environnement et non toxique, et grâce à une fabrication de précision contrôlable, l'alliage de tungstène est devenu un matériau stratégique important pour les systèmes de frappe de précision et de vol à haute mobilité militaires modernes.

5.3 Domaine de l'énergie nucléaire (barres de radioprotection, structures d'absorption de neutrons)

L'alliage de tungstène joue un rôle essentiel dans le domaine de l'énergie nucléaire grâce à sa densité ultra-élevée, son excellente stabilité à haute température et sa bonne capacité de radioprotection. Les tiges en alliage de tungstène sont largement utilisées pour la fabrication de **composants de protection contre les radiations**, notamment dans les centrales nucléaires, les réacteurs de recherche et les systèmes de traitement des déchets nucléaires. **structures d'absorption des neutrons**, **composants de protection des emballages de combustible nucléaire**, etc. Ses performances globales sont bien supérieures aux matériaux traditionnels en plomb, en acier et en uranium.

5.3.1 Contexte et besoins d'application dans le domaine de l'énergie nucléaire

Dans les systèmes d'énergie nucléaire, les principales fonctions des tiges en alliage de tungstène comprennent :

- **Protection contre les rayons gamma et les rayons X** : Le numéro atomique élevé du tungstène ($Z = 74$) lui confère d'excellentes capacités d'absorption des rayons à haute énergie ;
- **Absorption des neutrons et blindage thermique des neutrons** : Bien que le tungstène lui-même n'ait pas une section efficace de capture des neutrons aussi bonne que le bore ou le cadmium, les tiges en alliage de tungstène peuvent transporter des absorbeurs de neutrons dans des structures composites, jouant un double rôle de structure + blindage ;
- **Stabilité structurelle et maintien de la résistance à haute température** : l'alliage de tungstène maintient la stabilité dimensionnelle et la résistance mécanique dans l'environnement à haute température et à fort rayonnement du réacteur nucléaire, ce qui constitue une base importante pour les composants structurels du système d'énergie nucléaire ;
- **La conductivité thermique élevée facilite la gestion thermique** : la bonne conductivité thermique du tungstène peut conduire efficacement la chaleur lors des réactions nucléaires,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

évitant ainsi la concentration de contraintes thermiques qui provoque une fatigue structurelle.

5.3.2 Analyse des avantages des tiges de radioprotection en alliage de tungstène

| Projet de performance | Tige en alliage de tungstène | Matériaux de protection au plomb | Alliage d'uranium (DU) |
|--|--|----------------------------------|--|
| Densité (g/cm ³) | 17,0–18,5 | ~11.3 | ~19.1 |
| Capacité de protection contre les rayons gamma | Excellent (haute Z, haute densité) | en général | Excellent (légèrement meilleur que le tungstène) |
| Capacité de blindage neutronique | Moyen (B/Cd peuvent être ajoutés en combinaison) | Différence | Normal (partiellement absorbé) |
| Stabilité thermique | Excellent (stable à > 1200 °C) | Pauvre (ramollissement à 100°C) | excellent |
| Toxicité et radioactivité | Non toxique et non radioactif | toxique | Radioactif et difficile à recycler |
| Capacités de traitement et de recyclage | bien | Facile à déformer et à polluer | Traitement difficile, grandes restrictions de sécurité |

Les tiges en alliage de tungstène sont devenues une solution idéale pour remplacer les alliages d'uranium et les matériaux en plomb en raison de leur **protection de l'environnement, de leur sécurité et de leurs avantages mécaniques/rayonnement**.

5.3.3 Formes structurelles typiques des tiges en alliage de tungstène pour l'énergie nucléaire

1. tige de blindage

- Des tiges en alliage de tungstène pleines ou creuses sont utilisées pour la périphérie du noyau, le blindage des canaux, etc. selon l'épaisseur requise ;
- des coques en acier inoxydable et en cuivre-béryllium ;
- L'exigence générale de densité est $\geq 17,8 \text{ g/cm}^3$.

2. Tige de structure composite d'absorption de neutrons

- matériaux B₄C, Gd₂O₃, Cd ;
- Absorption intégrée des neutrons thermiques + blocage des rayons gamma ;
- Utilisé pour les barres de contrôle de sécurité des réacteurs, les barres d'arrêt rapide, etc.

3. Tiges structurelles à forte charge thermique

- Le fluide de refroidissement circule à travers la structure creuse de l'alliage de tungstène ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Utilisé dans les systèmes de support de dissipation thermique des centrales nucléaires ;
- Les exigences comprennent une conductivité thermique élevée, une stabilité dimensionnelle et une résistance à la corrosion.

4. Barres de blindage pour le transport et le stockage du combustible nucléaire

- La tige en alliage de tungstène est installée dans la couche intérieure du fût/conteneur d'emballage ;
- Il joue le double rôle de protection contre les rayons gamma et de résistance aux chocs mécaniques ;
- Conforme aux réglementations de sécurité du transport de l'AIEA.

5.3.4 Exigences de performance des matériaux

Les tiges en alliage de tungstène pour l'énergie nucléaire nécessitent non seulement une densité élevée et une capacité d'absorption des radiations, mais doivent également maintenir l'intégrité structurelle et la stabilité physique dans des environnements extrêmes :

- **Contrôle de la densité** : $\geq 17,5 \text{ g/cm}^3$, bonne uniformité requise ;
- **Stabilité dimensionnelle** : Aucune déformation en service continu à $300^\circ\text{C}\sim 800^\circ\text{C}$;
- **Résistance à la corrosion** : résistant à l'eau déionisée, à la solution d'acide borique, à la vapeur, etc.
- **Conductivité thermique** : $> 90 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, réduisant la contrainte du gradient thermique ;
- **Exigences de résistance** : résistance à la traction $\geq 700 \text{ MPa}$, bonne ténacité aux chocs ;
- **Stabilité à l'irradiation** : Aucune destruction de la structure du réseau ne se produit après l'irradiation ;
- **Conception de capture de neutrons** : une uniformité élevée est requise lors du dopage composite avec Gd, B et Cd ;
- **Durée de vie et résistance à la fatigue** : supporte une utilisation continue à long terme > 10 ans.

5.3.5 Cas d'application pratique

(1) Module de protection du cœur d'une centrale nucléaire

- Les tiges en alliage de tungstène forment la couche de protection contre les rayons gamma autour de la structure du cœur du réacteur ;
- Utilisé en combinaison avec du graphite, du refroidissement par eau, de l'alliage de zirconium, etc.
- Un projet national d'énergie nucléaire de troisième génération a adopté un blindage en alliage de tungstène pour remplacer la couche de plomb.

(2) Barres de contrôle et barres de sécurité des réacteurs de recherche

- Une tige creuse en alliage de tungstène revêtue d'une structure en poudre B_4C est utilisée comme tige de contrôle ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Lorsque la réaction nucléaire doit être arrêtée rapidement, la tige en alliage de tungstène peut être insérée dans le noyau pour absorber l'énergie et bloquer les rayons gamma ;
- La plupart des réacteurs nucléaires de recherche scientifique utilisent des matériaux composites « W-Ni-Fe/B₄C » comme composants terminaux de sécurité.

(3) Structure de revêtement du conteneur de stockage à sec des déchets nucléaires

- des tiges de protection en alliage de tungstène sont placées sur la couche extérieure du réservoir sec de déchets nucléaires ;
- Comparé au revêtement en plomb, il offre une protection plus forte sans risque de fuite ;
- Il a la capacité de résister à de forts tremblements de terre et à de forts impacts.

5.3.6 Normes et systèmes de certification pertinents

Les tiges en alliage de tungstène sont utilisées dans le domaine de l'énergie nucléaire et doivent répondre aux normes internationales/industrielles suivantes :

| Norme/Système | contenu |
|---|--|
| ASTM B777 | Classification et exigences de performance des alliages de tungstène à haute densité |
| ISO 12749/BS EN 61331 | Norme d'évaluation des performances des matériaux de protection nucléaire |
| AIEA TS-G-1.1 | Directives de sécurité pour l'emballage et le transport des matières nucléaires |
| GB/T 24298 | pour les propriétés des matériaux en alliage de tungstène et les méthodes d'essai de l'énergie nucléaire |
| Norme interne de la CNNC/China National Nuclear Corporation | Normes relatives aux processus d'approvisionnement et d'acceptation des matériaux de qualité nucléaire |

En outre, l'exportation de produits à des fins nucléaires doit également être conforme aux dispositions de contrôle du Groupe des fournisseurs nucléaires (NSG) et déclarer **une déclaration d'utilisation finale à des fins nucléaires** .

5.3.7 Tendances de développement et perspectives technologiques

- **structure en alliage de tungstène composite** : intégration de l'alliage de tungstène avec B, Gd et d'autres matériaux par co-frittage, pressage à chaud, nano-revêtement, etc. pour améliorer la capacité de blindage coordonnée des neutrons et des rayons gamma ;
- **Application de structure de blindage nucléaire modulaire** : les tiges en alliage de tungstène sont traitées avec précision et connectées mécaniquement pour former des modules de blindage détachables et restructurables , qui conviennent aux centrales nucléaires mobiles et aux réacteurs embarqués ;
- **performances de service à haute température et haute pression** : Développer une formule d'alliage de tungstène résistant aux hautes températures et un processus de traitement thermique pour répondre aux conditions de haute énergie des futurs réacteurs nucléaires avancés (tels que les réacteurs rapides, les systèmes ADS) ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Composants nucléaires en alliage de tungstène imprimés en 3D** : la fabrication additive sera utilisée pour fabriquer des composants nucléaires en alliage de tungstène avec une géométrie complexe et une structure de cavité pour réduire le poids et améliorer les performances de dissipation thermique.

résumé

Les tiges en alliage de tungstène remplissent de multiples fonctions dans le domaine de l'énergie nucléaire, telles que le support structurel, la radioprotection et la gestion thermique. Grâce à leur densité élevée, leur protection environnementale et leur sécurité, elles sont devenues un matériau de base indispensable au système d'énergie nucléaire. Face à la demande mondiale croissante d'énergie nucléaire propre et d'installations nucléaires sûres, les perspectives d'application des alliages de tungstène dans les composants de protection et les éléments de contrôle neutronique s'élargiront.

5.4 Tiges structurelles haute densité pour équipements médicaux (appareils de radiothérapie)

Avec le développement rapide des technologies modernes de radiothérapie, l'alliage de tungstène est devenu un matériau essentiel pour la protection contre les radiations et l'ajustement de la dose dans les équipements médicaux, grâce à sa densité élevée, sa capacité d'absorption élevée et ses excellentes propriétés mécaniques. L'utilisation de tiges en alliage de tungstène dans les équipements de radiothérapie (accélérateurs linéaires, gamma knife, CyberKnife, etc.) garantit non seulement un contrôle précis des radiations, mais protège également efficacement le personnel médical et les patients contre les dommages inutiles liés aux radiations.

5.4.1 Contexte de l'application de l'alliage de tungstène dans les équipements de radiothérapie

La radiothérapie utilise des rayons X, des rayons gamma ou des faisceaux d'électrons de haute énergie pour irradier précisément la zone tumorale. Les structures de blindage et de réglage de l'équipement doivent répondre aux exigences suivantes :

- **Absorber efficacement les radiations** pour éviter les fuites de radiations ;
- **Le matériau a une densité élevée**, ce qui permet d'obtenir un effet de blindage maximal dans un volume limité ;
- **stabilité mécanique**, capable de résister aux mouvements et aux vibrations de l'équipement ;
- **La haute précision de traitement** garantit un guidage précis du faisceau de rayonnement ;
- **Biosûr**, non toxique et inoffensif, conforme aux normes médicales et sanitaires.

L'alliage de tungstène ($17,0-18,8 \text{ g/cm}^3$) en fait un matériau idéal pour la protection contre les rayons gamma et les rayons X, supérieur aux matériaux traditionnels en plomb et plus respectueux de l'environnement.

5.4.2 Emplacements d'application typiques des tiges en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **Boucliers et bagues de protection pour équipements de radiothérapie**
 - Utilisé autour du tube de l'accélérateur linéaire pour bloquer les rayons diffusés ;
 - L'usinage de précision garantit l'uniformité de la forme et de la dose du faisceau de rayonnement.
2. **Contrepoids et structure de lame dans les lames régulatrices (diaphragme multilames, MLC)**
 - Les lames MLC sont généralement fabriquées en alliage de tungstène en raison de sa densité élevée, qui peut bloquer efficacement les radiations et contrôler la forme de la zone de traitement ;
 - Des tiges en alliage de tungstène peuvent être utilisées pour fabriquer le squelette de la lame et le contrepoids afin de garantir un mouvement de lame fluide et précis.
3. **Mur de protection contre les radiations et revêtement de panneau de protection mobile**
 - Les tiges ou plaques en alliage de tungstène à haute densité forment une structure protectrice pour bloquer la pénétration des radiations ;
 - conception légère, réduisant le poids et améliorant la sécurité.
4. **Structure de poids interne du dispositif de réglage du dosage**
 - Ajuster la dose et la direction du rayonnement pour assurer un contrôle précis du traitement ;
 - Les tiges en alliage de tungstène répondent aux exigences élevées de conception mécanique en raison de leur taille stable et de leur bonne aptitude au traitement.

5.4.3 Exigences de performance clés

Les tiges en alliage de tungstène pour les équipements de radiothérapie médicale doivent répondre aux indicateurs techniques suivants :

- **Densité** : $\geq 17,5 \text{ g/cm}^3$, assurant une capacité d'absorption de rayonnement suffisante ;
- **Précision dimensionnelle** : $\pm 0,01\sim 0,03 \text{ mm}$, garantissant la correspondance structurelle et la précision du rayonnement ;
- **Propriétés mécaniques** :
 - Résistance à la traction $\geq 700 \text{ MPa}$, capable de résister aux contraintes générées pendant le fonctionnement de l'équipement ;
 - Dureté $\geq \text{HRC } 30$, assurant une résistance à l'usure ;
- **Qualité de surface** : $R_a \leq 0,4 \mu\text{m}$, pour éviter d'affecter le mouvement de l'équipement et la transmission du rayonnement ;
- **Non toxique et inoffensif** : Conforme aux normes de sécurité des dispositifs médicaux et empêche les fuites d'éléments nocifs ;
- **Stabilité environnementale** : résistance à la corrosion, résistance aux hautes températures (dans un environnement de travail normal) et aucune déformation après une utilisation à long terme.

5.4.4 Technologie de traitement et de fabrication

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les tiges en alliage de tungstène de qualité médicale sont généralement préparées par métallurgie des poudres de haute pureté, puis formées par usinage de précision. Les étapes clés du processus comprennent :

- **Le pressage isostatique à chaud de précision (HIP)** garantit que le matériau est dense et exempt de pores ;
- **Tournage et rectification CNC** pour obtenir des formes complexes et une grande précision dimensionnelle ;
- **Polissage et nettoyage de surface** pour éliminer les marques de traitement et la contamination ;
- **Contrôles non destructifs** (ultrasons, rayons X) pour garantir l'absence de défauts internes ;
- **Les revêtements de surface** (tels que les films d'oxyde ou les revêtements céramiques) peuvent améliorer la résistance à la corrosion et la biocompatibilité.

5.4.5 Cas typiques

- **Lames en alliage de tungstène pour accélérateur linéaire à ouverture multi-lames**
 - Fabriquée en alliage de tungstène W-Ni-Fe, la densité de la lame atteint 18,0 g/cm³ ;
 - La taille de la lame est contrôlée avec précision et le réglage au millimètre près peut être réalisé grâce au système de transmission mécanique de haute précision ;
 - Améliore considérablement la précision du positionnement de la zone cible du traitement et la sécurité du patient.
- **Bouclier de protection de la tête du couteau Gamma**
 - en alliage de tungstène à très haute densité, l'épaisseur n'est que la moitié du matériau de protection en plomb ;
 - Grâce à un usinage de précision et à un traitement thermique, la stabilité à long terme et les performances de protection sont garanties ;
 - Améliorez la portabilité de l'appareil et réduisez le poids global.

5.4.6 Tendances de développement et frontières technologiques

- **matériaux en alliage de tungstène haute performance**
 - Les nanoparticules renforcent les alliages de tungstène pour améliorer la résistance et la ténacité et prolonger la durée de vie des équipements ;
 - L'alliage de tungstène à faible magnétisme répond aux exigences de compatibilité IRM.
- **Fabrication intelligente de lames en alliage de tungstène**
 - Utiliser la technologie de fabrication additive (impression 3D) pour fabriquer des structures complexes et réduire le poids ;
 - Associé au traitement laser, il améliore la qualité de surface et l'efficacité de fabrication.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Alternative écologique aux matériaux traditionnels en plomb**
 - L'alliage de tungstène, en tant que matériau alternatif non toxique, est conforme aux tendances et réglementations en matière de protection de l'environnement médical ;
 - Assurer un traitement et un recyclage sûrs des déchets médicaux.

résumé

Les tiges en alliage de tungstène sont devenues un matériau de base indispensable pour les équipements de radiothérapie médicale modernes grâce à leur haute densité, leur haute précision et leurs excellentes propriétés mécaniques. Leurs avantages en matière de radioprotection, d'ajustement de dose et de stabilité structurelle ont considérablement amélioré la précision et la sécurité de la technologie de radiothérapie. Avec les progrès de la science des matériaux et des technologies de fabrication, l'application de l'alliage de tungstène dans le domaine médical va se développer et s'approfondir.

5.5 Barres d'équilibrage dynamiques et pièces d'inertie rotatives dans les instruments de haute précision

Les tiges en alliage de tungstène sont largement utilisées dans divers instruments et équipements de haute précision en raison de leur densité élevée, de leur grande rigidité et de leurs excellentes performances d'usinage, notamment pour les pièces rotatives nécessitant un équilibrage dynamique et un contrôle de l'inertie de haute précision. Elles permettent un réglage précis de la répartition des masses et une optimisation des performances dynamiques, tout en améliorant la précision de mesure et la stabilité de fonctionnement de l'instrument.

5.5.1 Contexte et importance de l'application

Les instruments de haute précision tels que les gyroscopes, les gyroscopes à volant d'inertie, les équipements de navigation aérospatiale, les systèmes d'alimentation de précision et les machines tournantes à grande vitesse ont des exigences extrêmement élevées en matière d'équilibre dynamique et de performances inertielles. Les principales fonctions des fléaux d'équilibrage dynamique et des pièces inertielles sont :

- Ajustez la répartition de la masse du corps rotatif, éliminez le couple déséquilibré et réduisez les vibrations et le bruit ;
- Améliorer la stabilité et la durée de vie du corps rotatif et éviter l'usure des roulements et les pannes de l'équipement causées par un déséquilibre ;
- Optimisez les performances de réponse de l'instrument et contrôlez la précision en ajustant précisément le moment d'inertie.

Les tiges en alliage de tungstène sont des matériaux idéaux pour la fabrication de ces composants clés en raison de leur densité élevée ($17,0\sim 18,8\text{ g/cm}^3$) et de leurs excellentes propriétés mécaniques.

5.5.2 Structure et conception de la barre d'équilibrage dynamique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Sélection des matériaux** : On utilise principalement des alliages de tungstène haute densité W-Ni-Fe ou W-Ni-Cu pour garantir une densité élevée et une résistance mécanique suffisante ;
- **Spécifications de forme** : Tiges généralement cylindriques, tiges étagées ou tiges à section spéciale, faciles à intégrer dans des structures mécaniques pour ajuster la répartition de la masse ;
- **Précision dimensionnelle** : Les exigences de précision de traitement sont extrêmement élevées et la tolérance dimensionnelle est généralement contrôlée à $\pm 0,01$ mm pour garantir l'effet d'équilibrage dynamique ;
- **Traitement de surface** : Améliorez la qualité de la surface grâce au polissage, au nickelage ou au revêtement pour réduire la friction et la corrosion.

5.5.3 Exigences de performance pour les pièces d'inertie rotatives

Les pièces à inertie rotative doivent généralement avoir les propriétés suivantes :

- **La densité et l'uniformité élevées** garantissent un calcul précis du moment d'inertie ;
- **Bonne résistance mécanique et ténacité**, capable de résister à la force centrifuge générée lors d'une rotation à grande vitesse ;
- **Stabilité thermique** pour garantir une taille et des performances stables dans le cadre d'un fonctionnement à long terme ;
- **Résistance à la corrosion**, prolongeant la durée de vie, en particulier dans des environnements à forte humidité ou corrosifs.

ne se déforme pas et ne tombe pas en panne lors du fonctionnement à grande vitesse, maintenant ainsi le fonctionnement de haute précision de l'équipement.

5.5.4 Cas d'application typiques

1. dynamiques

sont largement utilisées dans les pièces rotatives des gyroscopes aérospatiaux. Un réglage précis de la répartition des masses permet d'obtenir une déviation nulle et une dérive extrêmement faible de l'équipement.

2. Les machines rotatives à grande vitesse

sont utilisées pour l'équilibrage dynamique des moteurs à grande vitesse et des aubes de turbine, réduisant efficacement les vibrations et améliorant la fiabilité et la durée de vie des équipements.

3. Les pièces assurent une rotation fluide et une précision de mesure dans les pièces rotatives des instruments de mesure de précision

tels que les platines de microscope électronique et les interféromètres laser.

5.5.5 Processus de production et méthodes d'essai

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Procédé de fabrication** : les tiges en alliage de tungstène haute densité sont préparées par métallurgie des poudres et formées par tournage et meulage de précision ;
- **Traitement thermique** : améliore les propriétés mécaniques et l'uniformité structurelle interne ;
- **Traitement de surface** : revêtement anti-corrosion et polissage pour augmenter la durée de vie ;
- **Contrôle qualité** : Un testeur d'équilibrage dynamique, une machine de mesure de coordonnées de haute précision et une technologie de test non destructif sont utilisés pour garantir l'absence de défaut.

5.5.6 Tendances de développement futures

- **Alliage de tungstène micro-nanostructuré** : améliore les propriétés mécaniques et la résistance à la fatigue ;
- **Conception légère : Réduisez la quantité d'** alliage de tungstène grâce à l'optimisation structurelle pour obtenir un poids léger et une résistance élevée ;
- **Technologie de fabrication additive** : réaliser une fabrication intégrée de pièces d'équilibrage dynamique aux formes complexes ;
- **Système d'équilibrage dynamique intelligent** : Combiné à la technologie de détection, la position de la tige d'équilibrage dynamique en alliage de tungstène est ajustée en temps réel pour améliorer les performances dynamiques du système.

résumé

Les tiges en alliage de tungstène jouent un rôle essentiel dans le domaine des barres d'équilibrage dynamiques et des pièces inertielles rotatives des instruments de haute précision. Leur densité élevée et leurs excellentes propriétés mécaniques assurent un fonctionnement plus fluide et précis des équipements. Grâce aux progrès constants des technologies des matériaux et des procédés de fabrication, les alliages de tungstène joueront un rôle majeur dans les machines rotatives de précision et les instruments haut de gamme.

5.6 Structures de support et de dissipation thermique dans l'industrie électronique et les équipements de communication

Avec le développement rapide des équipements électroniques et des technologies de communication, la miniaturisation, la forte densité de puissance et le fonctionnement à grande vitesse des appareils imposent des exigences de performance accrues aux matériaux. Les tiges en alliage de tungstène sont devenues des matériaux de structure clés pour le support et la dissipation thermique dans l'industrie électronique et les équipements de communication, grâce à leur densité élevée, leur conductivité thermique élevée et leur bonne résistance mécanique, améliorant ainsi la stabilité et l'efficacité de la gestion thermique des équipements.

5.6.1 Contexte de l'application

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la gestion thermique et les performances de support mécanique des matériaux :

- L'équipement génère beaucoup de chaleur lorsqu'il fonctionne, et une mauvaise dissipation de la chaleur entraînera une dégradation des performances, voire des dommages ;
- La structure de support doit résister aux contraintes mécaniques et thermiques et maintenir la précision de positionnement de l'appareil ;
- Le matériau doit avoir une bonne stabilité dimensionnelle et une bonne compatibilité électromagnétique.

Les tiges en alliage de tungstène sont un choix idéal pour répondre à ces besoins en raison de leur densité élevée, de leur excellente conductivité thermique et de leur faible coefficient de dilatation thermique.

5.6.2 Principales applications des alliages de tungstène dans les équipements électroniques et de communication

1. **Structure de support de dissipation thermique pour appareils haute puissance**
 - Base de dissipation thermique et support pour amplificateurs de puissance et modules RF ;
 - l'alliage de tungstène permet d'évacuer rapidement la chaleur générée par l'appareil ;
 - La haute densité et la rigidité du matériau assurent une structure stable et réduisent l'impact des vibrations.
2. **Poids d'amortissement dans les dispositifs de communication à micro-ondes et à ondes millimétriques**
 - par contrepoids en alliage de tungstène ;
 - Contrôlez efficacement les micro-mouvements et les écarts de position des composants RF.
3. **Matériaux de dissipation thermique dans les boîtiers de semi-conducteurs**
 - L'alliage de tungstène est utilisé comme dissipateur thermique pour les boîtiers de puces haut de gamme, ce qui contribue à améliorer l'efficacité de dissipation thermique de la puce ;
 - Tenez compte à la fois de la résistance mécanique et de la dilatation thermique pour éviter que les contraintes thermiques n'endommagent la puce.
4. **Pièces de positionnement et de support mécaniques de précision**
 - Maintenir la position relative et la stabilité des petites pièces mécaniques ;
 - Couramment utilisé dans les supports et fixations mécaniques des équipements de communication par fibre optique et des systèmes laser.

5.6.3 Indicateurs clés de performance des matériaux

- **Densité** : $\geq 17,0 \text{ g/cm}^3$, assurant une rigidité et une stabilité élevées de la structure ;
- **Conductivité thermique** : $\geq 120 \text{ W / (m \cdot K)}$, dissipation thermique rapide ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Coefficient de dilatation thermique** : $\leq 6 \times 10^{-6} /K$, correspondant à la dilatation thermique des matériaux semi-conducteurs ;
- **Résistance mécanique** : résistance à la traction ≥ 800 MPa, dureté \geq HRC 30 ;
- **Précision dimensionnelle** : la précision du traitement atteint le niveau du micron pour garantir la précision de l'assemblage ;
- **Rugosité de surface** : $R_a \leq 0,2 \mu m$, pour éviter la concentration de contraintes et la résistance thermique ;
- **Compatibilité électromagnétique** : Faible réactivité magnétique, réduisant les interférences du signal.

5.6.4 Technologie de traitement et contrôle de la qualité

- **La poudre de tungstène de haute pureté est préparée par métallurgie des poudres** pour garantir que le matériau est dense et uniforme ;
- **Pressage isostatique à chaud (HIP) et frittage à haute température** pour améliorer la conductivité mécanique et thermique ;
- **Usinage CNC** pour réaliser des structures complexes et une grande précision dimensionnelle ;
- **Finition de surface**, y compris le meulage et le polissage, pour réduire les défauts de surface ;
- **Plusieurs technologies de contrôle non destructif** (ultrasons, scanner à rayons X) garantissent la qualité interne.

5.6.5 Cas typiques

- **Support de dissipation thermique du module d'alimentation RF de la station de base 5G**
 - Les tiges en alliage de tungstène supportent des modules d'amplification haute puissance pour assurer l'efficacité de la dissipation thermique et la stabilité mécanique ;
 - Améliorer la fiabilité et la durée de vie des équipements.
- **Module de refroidissement de puce de serveur haut de gamme**
 - Utiliser une structure de dissipateur thermique en alliage de tungstène pour améliorer le contrôle de la température de la puce ;
 - Réduisez le stress thermique et assurez un fonctionnement stable à long terme.
- **Support mécanique laser**
 - Le support en alliage de tungstène assure la stabilité du chemin laser ;
 - La conception anti-vibration réduit les erreurs optiques.

5.6.6 Tendances de développement et perspectives technologiques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Les performances de gestion thermique de l'alliage de tungstène nanostructuré sont améliorées**, permettant une dissipation thermique plus efficace ;
- **l'alliage de tungstène et les matériaux à base de carbone** réduisent le poids global tout en garantissant des performances de dissipation thermique ;
- **Intégrer la technologie de fabrication additive** pour fabriquer des structures de dissipation thermique complexes et des supports de dispositifs ;
- **Le système de dissipation thermique intelligent est combiné à des matériaux en alliage de tungstène** pour obtenir un contrôle de la température en temps réel et une dissipation thermique adaptative.

résumé

Les tiges en alliage de tungstène sont utilisées dans les structures de support et de dissipation thermique de l'industrie électronique et des équipements de communication. Grâce à leur densité élevée, leur conductivité thermique élevée et leur stabilité mécanique, elles améliorent considérablement les performances et la fiabilité des équipements. Avec l'augmentation continue de la densité de puissance des équipements électroniques et la tendance à la miniaturisation, le rôle de l'alliage de tungstène va gagner en importance, contribuant ainsi à la transition de l'industrie vers un développement efficace et intelligent.

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

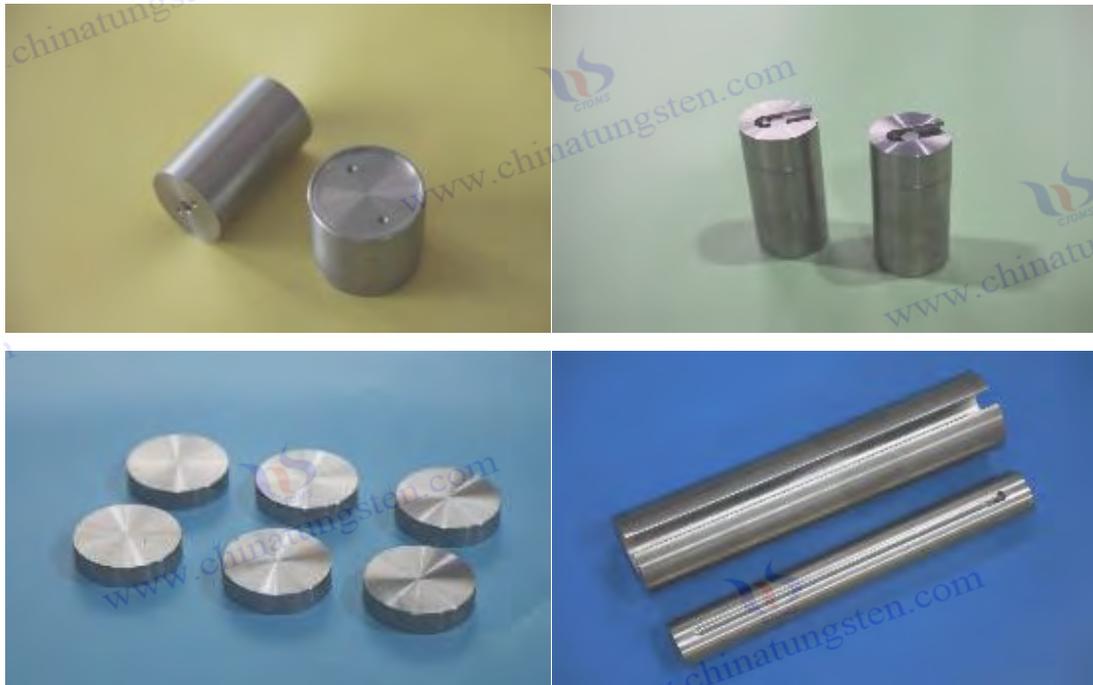
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



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



Chapitre 6 Recherche, développement et mise à niveau des tiges spéciales en alliage de tungstène

6.1 Tige en alliage de tungstène renforcé de nanoparticules

La fabrication d'équipements haut de gamme et les conditions de travail extrêmes imposent des exigences de performance accrues aux alliages de tungstène. Les faiblesses des alliages de tungstène traditionnels en termes de résistance, de ténacité et de stabilité thermique deviennent de plus en plus évidentes. La technologie d'amélioration par nanoparticules est devenue l'un des principaux moyens de repousser les limites de performance des matériaux. La dispersion uniforme de phases de renforcement nanométriques dans la matrice de l'alliage de tungstène permet d'améliorer efficacement les performances globales du matériau et d'élargir le champ d'application des alliages de tungstène.

Concept de conception d'un alliage de tungstène renforcé par des nanoparticules

La tige en alliage de tungstène renforcée par des nanoparticules est principalement basée sur les concepts de conception suivants :

- **Effet de renforcement des nanoparticules** : les particules de taille nanométrique sont réparties uniformément dans la matrice en tant que deuxième phase, empêchant la migration des limites de grains et le mouvement de dislocation, et améliorant la résistance et la dureté ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Renforcement de l'interface** : Les nanoparticules et la matrice de tungstène sont étroitement liées pour former une interface solide, ce qui améliore la ténacité et la résistance à la rupture du matériau ;
- **Stabilité thermique améliorée** : les nanoparticules peuvent fixer les joints de grains, inhiber la croissance des grains à haute température, maintenir une structure de grain fin et maintenir des performances à haute température ;
- **Résistance améliorée aux radiations** : les nanoparticules agissent comme des points de capture pour les défauts de rayonnement, augmentant la durée de vie des alliages de tungstène dans les environnements à forte irradiation tels que l'énergie nucléaire.

6.1.2 Matériaux de phase nano-renforcés couramment utilisés et leurs caractéristiques

| Matériaux nanoparticulaires | Caractéristiques principales | Avantages | Focus sur l'application |
|---|---|---|---|
| Nanoparticules d'oxyde (telles que Y_2O_3 , Al_2O_3) | Excellente stabilité thermique et inertie chimique | Passivation à haute température, stabilisation des grains | Alliage de tungstène résistant à la corrosion à haute température, à haute résistance et ténacité |
| Nanoparticules de carbure (telles que WC, TiC) | Dureté élevée, résistance à l'usure | Améliore considérablement la dureté et la résistance à l'usure | Matériaux d'outillage, pièces mécaniques |
| Silicates et oxydes composites | Bonne adaptation de la dilatation thermique et meilleure ténacité | Réduire les contraintes thermiques et améliorer les propriétés thermomécaniques | Emballage électronique, structures thermiquement stables |
| Nanotubes de carbone et dérivés du graphène | Haute conductivité, haute résistance | Résistance et conductivité considérablement améliorées | Alliage de tungstène fonctionnel, application électromagnétique |

Procédé de préparation d'un alliage de tungstène renforcé par des nanoparticules

L'alliage de tungstène renforcé par des nanoparticules fait appel à une technologie de mélange et de formage de poudre de haute précision. Les principaux procédés comprennent :

1. **Préparation et dispersion de poudre de nanoparticules**
 - Les nanoparticules sont préparées par précipitation chimique, séchage par atomisation, alliage mécanique, etc.
 - La technologie de dispersion ultrasonique et de broyage à billes à haute énergie est utilisée pour disperser uniformément les nanoparticules dans la poudre de tungstène afin d'éviter l'agglomération.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Mélange et prétraitement des poudres

- Les nanoparticules et la poudre de tungstène sont entièrement mélangées sous atmosphère inerte pour garantir une interface propre ;
- Des dispersants et des liants sont ajoutés dans certains procédés pour améliorer la fluidité de la poudre.

3. Formage et pressage

- Formage par pressage isostatique à froid (CIP), pressage à l'emporte-pièce ou pressage isostatique à chaud (HIP) ;
- Le pressage isostatique à chaud permet d'obtenir une structure densifiée à haute densité et à faible porosité.

4. Frittage et traitement thermique

- Le frittage sous vide à haute température favorise la liaison de l'interface entre la matrice de tungstène et les nanoparticules ;
- Un traitement thermique approprié peut réguler la taille des grains et la distribution des phases de renforcement.

5. Usinage et traitement de surface

- Usinage de précision pour obtenir la taille et la forme requises ;
- Le polissage et le revêtement de surface améliorent les performances.

6.1.4 Analyse du mécanisme d'amélioration des performances

• Mécanisme de renforcement

- Les nanoparticules agissent comme des barrières pour empêcher le mouvement de dislocation, augmentant considérablement les résistances à la traction et à la limite d'élasticité ;
- Les nanoparticules affinent les grains, augmentent la dureté et améliorent la ténacité ;
- L'interface renforcée par des particules peut fixer efficacement les limites des grains et empêcher le grossissement des grains à haute température.

• Stabilité thermique et résistance à la corrosion

- La stabilité thermique des nanoparticules améliore la capacité de service à haute température du matériau ;
- La formation d'une couche de passivation inhibe la corrosion par oxydation et prolonge la durée de vie.

• Suppression des dommages causés par les radiations

- Les nanoparticules capturent les défauts générés par les rayonnements, réduisant ainsi le glissement des dislocations et l'agrégation des lacunes ;
- Améliorer la stabilité à l'irradiation de l'alliage de tungstène dans des environnements tels que les réacteurs nucléaires.

6.1.5 Cas d'application et vérification des effets

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Tige en alliage de tungstène pour l'énergie nucléaire**
 - les particules nano Y_2O_3 ajoutées présentent une meilleure stabilité structurelle et une meilleure résistance aux radiations dans des conditions de température et d'irradiation élevées ;
 - est plus de 30 % plus long que celui de l'alliage de tungstène traditionnel.
- **Pièces de moteurs d'avion à haute température**
 - au nano- TiC permet d'obtenir une résistance à la fatigue thermique considérablement améliorée ;
 - La résistance du matériau est augmentée de 20 à 40 % et la ténacité est considérablement améliorée.
- **Matériaux de dissipateur thermique pour emballage électronique**
 - Nano- Al_2O_3 améliore la conductivité thermique et l'adaptation de la dilatation thermique, réduisant ainsi les contraintes thermiques ;
 - La stabilité thermique améliorée garantit un fonctionnement stable à long terme.

6.1.6 Tendances et défis du développement

- **Système de renforcement nanocomposite multicomposant**
 - Combinaison de plusieurs nanoparticules pour obtenir une amélioration synergique et atteindre la limite de performance ;
- **Ingénierie des interfaces de nanoparticules**
 - Optimiser la structure de l'interface entre les particules et la matrice et améliorer la force et la ténacité de la liaison de l'interface ;
- **Technologie de préparation verte et peu coûteuse**
 - Réduire le coût du processus de préparation et de compoundage des nanoparticules et améliorer la faisabilité de l'industrialisation ;
- **Contrôler précisément la taille et la distribution des nanoparticules**
 - Surveillance en temps réel de la microstructure pour une conception précise des matériaux à l'aide de techniques de caractérisation avancées.

résumé

Les tiges en alliage de tungstène renforcé par des nanoparticules améliorent considérablement la résistance, la ténacité, la stabilité à haute température et la résistance aux radiations des alliages de tungstène grâce à l'introduction de phases nano-renforcées hautes performances. Elles constituent ainsi une base solide pour l'application des alliages de tungstène dans des domaines de pointe tels que l'énergie nucléaire, l'aérospatiale et l'électronique. À l'avenir, grâce aux progrès constants de la préparation des nanomatériaux et de la technologie des composites, les alliages de tungstène renforcés par des nanoparticules offriront des perspectives d'application plus larges et des performances encore plus exceptionnelles.

Conception et amélioration des performances d' une tige en alliage de tungstène microallié

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La technologie des microalliages est un moyen efficace d'améliorer les propriétés mécaniques et la stabilité thermique des matériaux en ajoutant des traces d'éléments d'alliage à la matrice d'alliage de tungstène pour former de fines particules de seconde phase ou renforcer la solution solide. Comparé aux alliages traditionnels, le microalliage est devenu une stratégie importante pour optimiser les performances des tiges d'alliage de tungstène grâce à son faible dosage, son faible coût et ses améliorations significatives des performances.

6.2.1 Concept de conception de microalliage

Le cœur du microalliage est d'atteindre les objectifs suivants en ajoutant des éléments d'alliage traces :

- **Renforcement par solution solide** : les éléments d'alliage sont répartis uniformément dans la matrice de tungstène sous forme de solution solide, ce qui augmente la distorsion du réseau et entrave le mouvement des dislocations ;
- **Renforcement par précipitation** : formation de précipités de seconde phase petits et uniformément répartis, fixation des dislocations et des joints de grains, et amélioration de la résistance et de la ténacité ;
- **Affinement des grains** : inhibe la croissance des grains, optimise la microstructure et améliore les propriétés mécaniques globales des matériaux ;
- **Améliorer les performances à haute température** : améliorer la stabilité thermique et la résistance au fluage des matériaux et prolonger la durée de vie ;
- **Optimiser l'adaptabilité du processus** : améliorer les performances de formage et de traitement des matériaux et réduire la difficulté de traitement.

6.2.2 Éléments de microalliage couramment utilisés et leurs mécanismes d'action

| Éléments d'alliage | Mécanisme d'action | Effets typiques |
|-----------------------|---|--|
| Titane (Ti) | Former des carbures ou des oxydes stables et affiner les grains | Améliorer la résistance, la ténacité et la résistance à l'usure |
| Niobium (Nb) | Renforcement des solutions solides et renforcement par précipitation | Résistance améliorée aux hautes températures et à la corrosion |
| Vanadium (V) | Renforcement des précipitations pour former des particules de seconde phase stables | Limite d'élasticité et résistance à la fatigue améliorées |
| Aluminium (Al) | Renforcement de la solution solide, améliorant l'uniformité de la structure | Améliorer la résistance à l'oxydation à haute température et la ténacité |
| Zirconium (Zr) | Former des particules d'oxyde stables, fixant les joints de grains | Améliorer les propriétés mécaniques à haute température et la capacité antioxydante |
| Cuivre (Cu) | Favorise le renforcement des joints de grains et améliore la plasticité | Optimiser les performances de traitement et améliorer les propriétés mécaniques globales |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Procédé de préparation d' une tige en alliage de tungstène microallié

1. **Méthode de sélection et d'ajout d'éléments d'alliage**
 - Sélectionner les éléments appropriés et leurs contenus (généralement des traces, dans la plage de 0,1 à 2 %) en fonction des performances cibles ;
 - Utilisez une poudre d'alliage de haute pureté ou un mélange de poudre d'éléments pour assurer une distribution uniforme.
2. **Mélange et homogénéisation de poudre**
 - Le broyage à billes à haute énergie, l'alliage mécanique et d'autres technologies sont utilisés pour obtenir un mélange uniforme des éléments d'alliage et de la poudre de tungstène ;
 - Évitez la pulvérisation et l'agglomération excessives en contrôlant les paramètres de broyage à boulets.
3. **Formage et frittage**
 - Utiliser le pressage isostatique à froid, le moulage et d'autres méthodes pour assurer la densité ;
 - Le procédé de frittage à haute température favorise la diffusion des éléments d'alliage et la précipitation de la deuxième phase.
4. **Traitement thermique et usinage**
 - Un traitement thermique approprié active les éléments d'alliage et forme des phases de renforcement ;
 - L'usinage de précision garantit les dimensions finales et la qualité de surface.

6.2.4 Effet d'amélioration des performances

- **Propriétés mécaniques considérablement améliorées**
 - La résistance à la traction et la limite d'élasticité sont augmentées de 10 à 30 %, et certaines tiges en alliage de tungstène micro-allié hautes performances peuvent même atteindre plus de 1 000 MPa ;
 - L'allongement et la ténacité à la rupture sont améliorés, et la résistance aux chocs est renforcée.
- **Stabilité thermique améliorée et résistance à haute température**
 - Le renforcement par précipitation des éléments de microalliage inhibe la croissance des grains et le matériau maintient une structure organisationnelle stable à haute température ;
 - Résistance au fluage améliorée, adaptée aux applications à haute température.
- **Résistance améliorée à la corrosion et à l'oxydation**
 - Forme une couche de passivation stable pour empêcher l'oxydation à haute température et la corrosion chimique ;
 - Améliorer la durée de vie et la fiabilité des matériaux.
- **Optimisation des performances de traitement**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les éléments de microalliage améliorent la fluidité et la formabilité de la poudre, réduisant ainsi la difficulté et le coût du traitement.

6.2.5 Exemples d'application

- **matériau de base en alliage de tungstène dans le domaine militaire**
 - En ajoutant des traces de Ti et de Nb, on obtient une résistance et une ténacité élevées et la capacité de perforation des blindages est améliorée ;
 - Améliore considérablement la résistance à l'usure et à la chaleur du noyau.
- **Pièces structurales haute température pour l'aérospatiale**
 - microallié dans les pièces à haute température des moteurs peut prolonger la durée de vie ;
 - Maintenir une résistance à haute température et réduire les dommages dus à la fatigue thermique.
- **tiges en alliage de tungstène dans les équipements de radiothérapie médicale**
 - L'ajout de traces d'éléments Zr et V peut améliorer la résistance à l'usure et à la corrosion et prolonger la durée de vie de l'équipement.

6.2.6 Tendances et défis du développement

- **Contrôle précis de la teneur et de la distribution des éléments de micro-alliage**
 - Utilisez des techniques de caractérisation avancées pour optimiser la conception des alliages et obtenir un contrôle précis des performances.
- **Étude du mécanisme d'amélioration synergique multi-éléments**
 - Explorez les effets synergétiques entre plusieurs éléments de micro-alliage pour améliorer encore les performances.
- **Technologie de préparation verte et respectueuse de l'environnement**
 - Développer un procédé de production d'alliages de tungstène micro-alliés à faible consommation d'énergie et à faible pollution pour répondre aux exigences de protection de l'environnement.
- **Industrialisation et application à grande échelle**
 - Résoudre les problèmes de coût et de complexité des processus et promouvoir l'application généralisée des alliages de tungstène micro-alliés dans davantage de domaines.

résumé

La technologie des microalliages permet d'améliorer de manière multidimensionnelle les propriétés mécaniques, la stabilité thermique et les performances de mise en œuvre des matériaux en ajoutant des traces d'éléments d'alliage fonctionnels aux tiges d'alliage de tungstène. Cette technologie élargit non seulement le champ d'application des alliages de tungstène, mais offre également une voie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

efficace pour la recherche et le développement de matériaux à hautes performances. À l'avenir, grâce à l'approfondissement des technologies de préparation et de la recherche théorique, les alliages de tungstène microalliés ouvriront de nouvelles perspectives de développement.

6.3 Contrôle de la composition de la tige en alliage de tungstène à haute résistance et ténacité

Les tiges en alliage de tungstène sont utilisées dans des conditions de travail extrêmes, notamment dans l'aérospatiale, l'industrie militaire et l'énergie nucléaire. Elles doivent généralement présenter une résistance et une ténacité élevées. Les alliages de tungstène traditionnels privilégient une résistance élevée, mais manquent de ténacité, ce qui les rend fragiles. La stratégie clé pour préparer des tiges en alliage de tungstène à haute résistance et robustesse consiste à obtenir une combinaison optimale de matrice et de seconde phase en contrôlant précisément la composition de l'alliage.

6.3.1 Principes de base pour le contrôle de la composition des alliages de tungstène à haute résistance et tenaces

1. Sélection raisonnable du rapport des principaux éléments d'alliage

- La proportion des principaux éléments tels que le nickel (Ni), le fer (Fe) et le cuivre (Cu) dans la matrice de tungstène détermine les propriétés mécaniques et la structure organisationnelle de la matrice ;
- Ajustez raisonnablement le rapport Ni/Fe et la teneur en cuivre pour trouver un équilibre entre résistance et ténacité.

2. Introduction de plusieurs éléments d'alliage pour obtenir un renforcement synergique

- En ajoutant des traces d'éléments de microalliage tels que le titane (Ti), le zirconium (Zr) et le vanadium (V), une phase de renforcement est formée pour obtenir un renforcement des grains fins et un renforcement par précipitation ;
- L'effet synergique de plusieurs éléments améliore la liaison de l'interface et améliore la ténacité globale.

3. Contrôler la teneur en éléments d'impureté

- Réduisez les impuretés telles que l'oxygène, le carbone et le soufre, évitez la formation de phases cassantes et améliorez la ténacité du matériau.

4. Optimiser la conception du gradient de composition des alliages

- La conception de l'alliage à gradient est adoptée pour obtenir une répartition zonée de la dureté et de la ténacité et améliorer les performances globales.

6.3.2 Effets de la régulation de la composition sur la structure des tissus

• Comportement en solution solide de

la matrice de tungstène et des éléments d'alliage Le renforcement en solution solide des éléments d'alliage dans la matrice de tungstène améliore la résistance, mais une solution solide excessive réduira la ténacité et le contenu doit être contrôlé avec précision.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Formation de la deuxième phase précipite**
Les particules de carbure et d'oxyde formées par les éléments de microalliage agissent comme des phases de précipitation, affinent les grains et empêchent la propagation des fissures.
- **de la taille et de la distribution des grains**
affecte la taille des grains et améliore la ténacité et les performances de fatigue en inhibant la croissance des grains.

6.3.3 Conception typique d'une composition d'alliage de tungstène à haute résistance et à haute ténacité

| Système d'ingrédients | Caractéristiques principales | Performance |
|---|---|--|
| W-Ni-Fe-Cu-Ti-Zr | Éléments de microalliage multiples, affinage du grain et renforcement par précipitation | Résistance augmentée de 20 à 30 %, ténacité considérablement améliorée |
| W-Ni-Fe-Cu-V-Al | Renforcement synergique par solution solide et précipitation, excellente résistance à la fatigue | Résistance aux chocs améliorée et durée de vie prolongée en fatigue |
| Éléments de terres rares traces W-Ni-Cu | Les éléments de terres rares améliorent la liaison des joints de grains et préviennent les fractures fragiles | Ténacité à la rupture accrue et résistance à la chaleur améliorée |

6.3.4 Mécanisme d'amélioration des performances apporté par la réglementation des ingrédients

- **Renforcement de l'interface et fixation des fissures**
Les minuscules particules de seconde phase améliorent la force de liaison des joints de grains et empêchent les fissures de s'étendre le long des joints de grains.
- **Le raffinement des grains et**
la régulation de la composition des obstacles aux dislocations favorisent le raffinement des grains, augmentent la résistance au mouvement des dislocations et améliorent la résistance et la plasticité.
- **Le renforcement des solutions solides et l'optimisation de la ténacité**
contrôlent avec précision le contenu des éléments de la solution solide pour équilibrer la relation entre la résistance et la ténacité.

6.3.5 Domaines d'application et vérification des effets

- **Militaire** La tige en alliage de tungstène à haute résistance et robuste **du matériau de base perforant**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

améliore considérablement la capacité de pénétration et la résistance à l'usure, et réduit le risque de fracture fragile.

- **La fabrication de pièces structurales résistantes aux hautes températures pour moteurs d'avion**
garantit à la fois la ténacité et la résistance des matériaux dans les environnements à haute température, améliorant ainsi la sécurité.
- **L'utilisation de composants résistants aux radiations dans les équipements d'énergie nucléaire**
prolonge la durée de vie et réduit les coûts de maintenance.

6.3.6 Orientation future du développement

- **La conception de matériaux informatiques**
utilise la simulation informatique pour prédire avec précision la relation entre la composition et les performances, permettant ainsi de produire des alliages de tungstène personnalisés à haute résistance et à haute ténacité.
- **La technologie de synthèse avancée, combinée à la conception des ingrédients**
, au traitement thermique, au pressage isostatique à chaud et à d'autres technologies, peut améliorer l'effet de la régulation des ingrédients.
- **Régulation structurelle multi-échelles**
du niveau nano au niveau macro pour obtenir une optimisation des performances.

résumé

Le contrôle de la composition des tiges en alliage de tungstène à haute résistance et ténacité permet d'améliorer de manière synergique la résistance et la ténacité grâce à une conception précise des types et des proportions des éléments d'alliage et à l'optimisation de la microstructure. Cette stratégie permet non seulement de résoudre le problème de la fragilité des alliages de tungstène, mais aussi de poser les bases solides de leur large application dans des conditions de travail extrêmes. Grâce aux progrès de la théorie de la conception des matériaux et des technologies de préparation, les performances des alliages de tungstène à haute résistance et ténacité continueront de progresser, favorisant ainsi la modernisation technologique des industries concernées.

6.4 Étude sur le traitement thermique des tiges en alliage de tungstène résistant aux hautes températures

L'alliage de tungstène est largement utilisé dans les environnements à haute température en raison de son point de fusion élevé, de sa densité élevée et de ses excellentes propriétés mécaniques. Cependant, il est sujet à la croissance des grains, à l'instabilité structurelle et à la dégradation des performances dans des conditions de températures extrêmement élevées. Le traitement thermique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

est un procédé essentiel pour réguler la microstructure et les propriétés de l'alliage de tungstène et un moyen important d'améliorer sa résistance aux températures élevées.

6.4.1 Objectif et importance du traitement thermique de l'alliage de tungstène

- **Améliorer l'uniformité organisationnelle** : éliminer les contraintes internes et uniformiser la taille des grains grâce à des processus de recuit et de vieillissement raisonnables ;
- **les propriétés mécaniques** : optimiser la taille des grains et la précipitation de la deuxième phase pour améliorer la résistance et la ténacité ;
- **Stabilise les performances à haute température** : inhibe la croissance des grains, retarde le fluage et le ramollissement à haute température ;
- **Améliorer la résistance à la corrosion** : Améliorer la densité et la stabilité du film d'oxyde grâce à un traitement thermique de surface.

6.4.2 Procédés et paramètres de traitement thermique couramment utilisés

| Type de processus | Plage de température (°C) | Temps d'isolation | Fonction principale |
|--|---------------------------|-------------------|---|
| recuit | 800~1200 | 1 à 5 heures | Élimine les contraintes internes et affine les grains |
| vieillissement | 500~900 | 2 à 10 heures | Favoriser la précipitation de la deuxième phase et renforcer la matrice |
| Traitement de solution | 1200~1400 | 0,5 à 3 heures | Dissoudre la phase et uniformiser la composition |
| Traitement thermique de surface (nituration/cémentation) | 900~1100 | 1 à 4 heures | Améliorer la dureté de surface et la résistance à l'oxydation |

6.4.3 Effet du traitement thermique sur la microstructure

- **Contrôle de la taille des grains** :
une température de recuit appropriée peut affiner les grains, empêcher une croissance excessive des grains et maintenir un équilibre entre la résistance et la ténacité du matériau.
- **de précipitation et**
de vieillissement par distribution de deuxième phase favorise la précipitation fine et uniforme de la phase de renforcement et améliore l'effet d'entrave au mouvement de dislocation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Éliminer les contraintes internes**

Le processus de recuit libère les contraintes résiduelles de traitement, réduit la concentration des contraintes et réduit le risque de rupture fragile.

6.4.4 Mécanisme d'amélioration de la résistance aux hautes températures

- **Le raffinement du grain renforcé**

la structure du grain fin et uniforme, pour améliorer la résistance au fluage à haute température et la durée de vie en fatigue.

- **La phase précipitée renforcée**

les particules stables de la deuxième phase et fixe les joints de grains, empêchant la migration des joints de grains et améliorant la résistance à haute température.

- **Protection par film d'oxyde :**

le traitement thermique de surface forme un film d'oxyde dense, qui bloque la corrosion par oxydation et améliore les propriétés antioxydantes.

6.4.5 Résultats de recherche et cas typiques

- **d'optimisation du recuit à haute température**

ont montré qu'un recuit à 1100°C pendant 3 heures peut affiner considérablement les grains, augmenter la résistance à la traction de l'alliage de tungstène de 15 % et augmenter l'allongement de 10 %.

- **Effet de renforcement du vieillissement**

Après vieillissement à 650°C pendant 6 heures, la phase de renforcement précipite uniformément et le taux de fluage à haute température du matériau est réduit de 20 %.

- **Traitement de nitruration de surface**

Le traitement de nitruration de surface augmente la dureté de 40 %, la température d'oxydation d'environ 200 °C et améliore considérablement la résistance à l'oxydation.

6.4.6 Stratégie d'optimisation du processus de traitement thermique

- **La conception du processus de traitement thermique en plusieurs étapes**

combine le recuit, le traitement de solution et le vieillissement pour réguler de manière coordonnée la structure organisationnelle.

- **Le contrôle précis de la température et le contrôle de l'atmosphère**

utilisent le vide ou une atmosphère protectrice pour éviter l'oxydation secondaire et assurer l'effet du traitement thermique.

- **Le traitement thermique est lié au processus de formage**

pour personnaliser le plan de traitement thermique en fonction des caractéristiques du processus de formage précédent afin d'éviter d'endommager les tissus.

6.4.7 Tendances et défis du développement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **La technologie de traitement thermique intelligent**
utilise la surveillance et le contrôle en ligne pour obtenir une optimisation en temps réel du processus de traitement thermique.
- **Evaluation à long terme des performances de service à haute température**
Etude approfondie de l'influence du traitement thermique sur les propriétés de fluage et de fatigue à haute température.
- Développer des outils de simulation multi-échelles **en couplant microstructure et performance pour guider la conception des procédés de traitement thermique.**

résumé

La technologie de traitement thermique est essentielle pour améliorer la résistance à haute température des tiges en alliage de tungstène. Grâce à une conception scientifique et rationnelle du procédé, la microstructure est efficacement contrôlée, la résistance, la ténacité et la stabilité à haute température sont améliorées, et les exigences strictes des alliages de tungstène haute température dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'énergie nucléaire et d'autres secteurs sont satisfaites. À l'avenir, la technologie de traitement thermique intelligente et numérique permettra d'améliorer le traitement thermique des alliages de tungstène.

6.5 Revêtement de surface et tige en alliage de tungstène renforcé résistant à l'usure

Les tiges en alliage de tungstène présentent les avantages d'une densité et d'une résistance élevées. Cependant, en cas de fortes contraintes, de frottement ou de corrosion, leur surface exposée est sujette à l'usure, à l'oxydation et à la corrosion, ce qui affecte leur durée de vie et la stabilité de leurs performances. Le revêtement de surface est un moyen essentiel d'améliorer les performances de surface des alliages de tungstène. Il améliore considérablement leur résistance à l'usure et à la corrosion grâce à la formation d'une couche protectrice, ce qui constitue un axe important de la recherche et du développement de tiges spéciales en alliage de tungstène.

6.5.1 Mécanisme d'usure et de corrosion de la surface de l'alliage de tungstène

- **Usure mécanique**
Pendant le processus de contact et de frottement de l'alliage de tungstène, le matériau de surface subit une déformation plastique et des fissures de fatigue en raison du frottement et de la force de cisaillement, entraînant un pelage du matériau et une perte de grains abrasifs.
- **Corrosion chimique et oxydation**
Sous l'action d'une température élevée ou d'un milieu corrosif, une couche d'oxyde ou des produits de corrosion se forment à la surface de l'alliage de tungstène, ce qui réduit la résistance de la surface, se décolle facilement et aggrave l'usure.
- **L'usure par fatigue et la dégradation de l'interface**
sous charge cyclique provoquent la propagation de microfissures, la chute du revêtement de surface et la perte de l'effet protecteur.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.5.2 Sélection des matériaux de revêtement de surface

| Type de revêtement | Caractéristiques principales | Avantages et applications |
|--|---|--|
| Revêtements céramiques durs (tels que TiN, CrN, Al ₂ O ₃) | Dureté élevée, résistance à l'usure, résistance aux hautes températures | Pièces mécaniques, moules et pièces résistantes à l'usure |
| Revêtements à base de carbone (tels que le diamant, le nitrure de carbone) | Dureté extrêmement élevée, faible coefficient de frottement | Instruments de précision, outils de coupe |
| Revêtements composites à base de métal (tels que WC-Co, NiCr) | Bonne ténacité, résistance à l'usure et à la corrosion | Pièces mécaniques fortement chargées |
| Revêtement fonctionnel multicouche | Combinaison de dureté, de ténacité et de résistance à l'oxydation | Exigences de performance complètes dans des environnements de services complexes |

6.5.3 Technologie de préparation des revêtements de surface

- Le dépôt physique en phase vapeur (PVD)**
 utilise l'évaporation ou la pulvérisation cathodique pour déposer des couches dures. Le revêtement est dense et possède une forte adhérence, ce qui le rend idéal pour les pièces en alliage de tungstène de haute précision.
- Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD)**
 utilise des réactions chimiques pour former un revêtement uniforme, qui convient aux pièces aux formes complexes et présente une excellente résistance aux hautes températures.
- La projection thermique**
 dépose des revêtements par projection de particules fondues. Elle convient aux revêtements épais et aux réparations, et présente une bonne ténacité.
- Le revêtement de surface au laser**
 utilise le laser pour faire fondre le matériau en poudre afin d'obtenir une liaison métallurgique entre le revêtement et le substrat, rendant le revêtement résistant à l'usure et à la corrosion.
- La galvanoplastie et le dépôt électrochimique**
 conviennent au dépôt de revêtements métalliques pour améliorer la conductivité de surface et la résistance à la corrosion.

6.5.4 Amélioration des performances des alliages de tungstène par revêtement de surface

- Améliore considérablement la dureté et la résistance à l'usure**
 Le revêtement a une dureté supérieure à celle du substrat, empêchant efficacement le frottement, l'usure et la déformation plastique de la surface.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Améliore la résistance à la corrosion et à l'oxydation**
pour former un film protecteur stable, isoler les milieux corrosifs et retarder le processus d'oxydation.
- **Améliorez les performances de frottement de surface**
, réduisez le coefficient de frottement, réduisez la génération de chaleur et la perte de matière.
- **Améliore la résistance aux températures élevées.**
Le revêtement offre une excellente résistance aux températures élevées et assure la stabilité structurelle dans les environnements à haute température.

6.5.5 Stratégie de conception d'une tige en alliage de tungstène renforcé et résistant à l'usure

- **La conception correspondante du revêtement et du substrat**
contrôle le coefficient de dilatation thermique du revêtement pour qu'il corresponde à celui du substrat, évitant ainsi la fissuration et la perte du revêtement causées par les contraintes thermiques à haute température.
- **La technologie de revêtement composite multicouche**
utilise une couche dure et une couche résistante pour combiner résistance à l'usure et résistance aux chocs.
- **Optimisation de la rugosité de surface :**
traitement de surface détaillé avant revêtement pour améliorer l'adhérence du revêtement.
- **Contrôle de l'épaisseur et de l'uniformité du revêtement**
Concevez rationnellement l'épaisseur du revêtement pour éviter la dégradation des performances causée par une épaisseur inégale.

6.5.6 Cas d'application

- **Le revêtement en alliage de tungstène des aubes de turbine de moteur aérospatial** adopte Revêtement composite TiN / Al₂O₃ , qui améliore la résistance à l'usure de 50 % et prolonge considérablement la durée de vie de la lame.
- **Technologie de revêtement de noyau perforant de blindage militaire :**
le revêtement en carbure dur améliore la dureté de surface du noyau, améliore la capacité de pénétration et la résistance à l'usure.
- **à la surface des composants électroniques de dissipation thermique,**
la conductivité thermique et la résistance à la corrosion sont améliorées, garantissant un fonctionnement stable et à long terme de l'équipement.

6.5.7 Tendances et défis du développement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Développement de revêtements nanostructurés**
Les revêtements nanocristallins sont plus denses, ont à la fois dureté et ténacité et ont une meilleure résistance à l'usure.
- **L'intégration fonctionnelle du revêtement intelligent**
combine l'auto-réparation, l'antibactérien, l'anticorrosion et d'autres fonctions pour élargir le champ d'application.
- **La technologie de revêtement respectueuse de l'environnement et**
le processus de préparation écologique réduisent l'impact environnemental et améliorent la durabilité de l'industrie.
- **L'optimisation de l'ingénierie de l'interface entre le revêtement et le substrat**
améliore la résistance de la liaison de l'interface et empêche le détachement du revêtement et la défaillance par fatigue.

résumé

La technologie de revêtement de surface confère aux tiges en alliage de tungstène une protection efficace contre l'usure et la corrosion, améliorant considérablement leur durée de vie et leur stabilité en environnements extrêmes. Grâce au développement continu de matériaux de revêtement et de procédés de préparation avancés, les tiges en alliage de tungstène résistantes à l'usure et améliorées joueront un rôle plus crucial dans l'aérospatiale, l'industrie militaire et la fabrication haut de gamme. À l'avenir, la diversification et l'intelligence des fonctions de revêtement constitueront une nouvelle orientation du développement technologique.

6.6 Tige fonctionnelle en alliage de tungstène : conductivité électrique, conductivité thermique, antimagnétique

Matériau haute densité et hautes performances, les tiges en alliage de tungstène présentent non seulement d'excellentes propriétés mécaniques et une stabilité à haute température, mais répondent également à une demande croissante de matériaux multifonctionnels dans l'industrie moderne et les secteurs de haute technologie. Les tiges en alliage de tungstène fonctionnelles, telles que la conductivité électrique, la conductivité thermique et les propriétés antimagnétiques, sont progressivement devenues un centre de recherche et développement. La conception des matériaux et le contrôle des procédés permettent de fonctionnaliser les tiges en alliage de tungstène, d'élargir leurs domaines d'application et d'améliorer leurs performances globales.

Conception et application d'une tige conductrice en alliage de tungstène

- **Principes de conception**
 - Améliorer la conductivité électrique de l'alliage tout en conservant de bonnes propriétés mécaniques ;
 - Optimiser les types et les contenus des éléments d'alliage pour réduire les obstacles à la migration des électrons ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Contrôler la microstructure et réduire l'impact des joints de grains et des défauts sur la résistance.
- **Éléments d'alliage courants**
 - Le cuivre (Cu) est un excellent élément conducteur et est souvent utilisé pour améliorer la conductivité des alliages de tungstène.
 - L'ajout approprié d'éléments tels que l'argent (Ag) et le nickel (Ni) permet d'équilibrer la conductivité et les propriétés mécaniques.
- **Domaines d'application**
 - Matériaux d'emballage électronique;
 - Matériaux d'électrodes dans les dispositifs électroniques sous vide ;
 - Support de dissipation thermique pour circuits haute fréquence.
- **Caractéristiques de performance**
 - La résistivité peut être réduite au niveau micro-ohm-cm ;
 - En même temps, il maintient une résistance élevée et une stabilité thermique ;
 - Bonne usinabilité et stabilité dimensionnelle.

Conception et application d'une tige en alliage de tungstène thermoconductrice

- **Stratégie de conception**
 - Profitant de la conductivité thermique élevée du tungstène lui-même, combinée à des éléments d'alliage à haute conductivité thermique pour améliorer la conductivité thermique globale ;
 - Optimiser la microstructure et réduire la résistance thermique de l'interface ;
 - Appliquer des processus de raffinement du grain et de contrôle des défauts pour réduire les effets de diffusion.
- **Systèmes d'alliages typiques**
 - Les alliages composites tungstène-cuivre (W-Cu) sont largement utilisés dans les applications à haute conductivité thermique ;
 - Amélioration de la conductivité thermique grâce au microalliage et à la conception de nanostructures.
- **Scénario d'application**
 - Composants de dissipation thermique pour appareils électroniques de haute puissance ;
 - Chambres de combustion et échangeurs de chaleur de moteurs d'avion ;
 - Composants de gestion thermique dans les lasers et les réacteurs nucléaires.
- **Avantages en termes de performances**
 - La conductivité thermique est nettement meilleure que celle du tungstène pur, atteignant plus de $200 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;
 - Il combine une densité élevée, une résistance élevée et une excellente stabilité thermique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conception et application d'une tige en alliage de tungstène antimagnétique

- **Objectifs de conception**
 - Rendre l'alliage de tungstène non magnétique ou faiblement magnétique dans un environnement de champ magnétique fort ;
 - Prévenez les interférences du champ magnétique et assurez le fonctionnement normal de l'équipement.
- **Contrôle des ingrédients**
 - Réduire la teneur en éléments ferromagnétiques tels que le fer (Fe), le cobalt (Co) et le nickel (Ni) ;
 - Ajouter des éléments d'alliage non magnétiques tels que le chrome (Cr) et le manganèse (Mn) ;
 - Utilisez le renforcement de la solution solide et le contrôle de la deuxième phase pour réduire la réponse magnétique.
- **Domaines d'application**
 - Équipement d'imagerie par résonance magnétique (IRM);
 - Instruments de mesure de champ magnétique de haute précision ;
 - Composants d'accélérateur de particules et de réacteur nucléaire.
- **Performance**
 - La perméabilité magnétique est proche de 1 (la perméabilité magnétique du vide) ;
 - Maintenir de bonnes propriétés mécaniques et de résistance aux hautes températures ;
 - Excellente résistance aux radiations et à la corrosion.

Technologie de préparation de tiges fonctionnelles en alliage de tungstène

- **La technologie de métallurgie des poudres de précision**
contrôle la pureté de la poudre et la taille des particules pour garantir une composition uniforme et réduire les défauts.
- **La technologie avancée de traitement thermique**
régule la microstructure et optimise les performances fonctionnelles.
- **La technologie de modification de surface**
améliore les fonctions de surface, telles que le revêtement conducteur, le revêtement résistant à l'usure, etc.
- **La fabrication additive**
permet une conception de structures complexes et de gradients fonctionnels pour répondre à des besoins multifonctionnels.

6.6.5 Tendances de développement futures

- **La conception intégrée multifonctionnelle**
prend en compte plusieurs fonctions telles que la conductivité électrique, la conductivité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

thermique et les propriétés antimagnétiques pour répondre aux exigences d'application complexes.

- **La manipulation des nanostructures**
utilise la nanotechnologie pour améliorer encore les performances et renforcer la stabilité.
- **Développement de matériaux intelligents Développer**
des matériaux en alliage de tungstène intelligents qui répondent aux changements environnementaux et permettent des ajustements de performances adaptatifs.
- **La technologie de préparation verte et respectueuse de l'environnement**
favorise les processus de préparation à faible consommation d'énergie et à faible pollution et favorise le développement durable.

résumé

Les tiges fonctionnelles en alliage de tungstène ont atteint de nombreuses fonctions spécifiques, telles que la conductivité électrique, la conductivité thermique et les propriétés antimagnétiques, grâce à une conception de composition judicieuse et à l'optimisation des procédés, élargissant considérablement le champ d'application des alliages de tungstène dans les domaines de haute technologie. Grâce aux progrès constants de la science des matériaux et des technologies de fabrication, les tiges fonctionnelles en alliage de tungstène joueront un rôle de plus en plus important dans de nombreux domaines de pointe tels que l'électronique, l'aéronautique et la médecine.



Chapitre 7 Système de conformité pour les tiges en alliage de tungstène

7.1 Normes nationales/industrielles chinoises (GB/T, YS/T)

En tant que matériau haute performance important, les tiges en alliage de tungstène doivent répondre à des normes de qualité et de performance strictes lors de leur production et de leur application industrielles. Les normes nationales chinoises (GB/T) et industrielles (YS/T) constituent le cadre réglementaire de la fabrication, des essais et de l'application des tiges en alliage de tungstène, garantissant ainsi une qualité stable des produits et un développement industriel dynamique.

7.1.1 Aperçu du système de normalisation chinois

- **Norme nationale (GB/T) :**
Les normes nationales sont émises par l'Administration d'État pour la régulation du marché et l'Administration nationale de normalisation. Elles couvrent les propriétés des matériaux, les méthodes d'essai, les exigences techniques, etc., et constituent la base de la production et du contrôle qualité des entreprises. Par exemple : GB/T 23789-2017 « Matériaux en alliage de tungstène à haute densité » et GB/T 20211-2006 « Tiges en alliage de tungstène ».
- **Les normes industrielles (YS/T)**
sont formulées par les autorités compétentes du secteur. Elles affinent les exigences normatives en fonction des caractéristiques du secteur et s'appliquent aux spécifications et évaluations techniques du secteur. Exemple : YS/T 531-2014 « Conditions techniques générales pour les alliages de tungstène et les alliages tungstène-cuivre ».

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Normes locales et normes d'entreprise**
Certaines régions et entreprises formulent des normes supplémentaires en fonction des besoins réels pour affiner la gestion et améliorer la compétitivité.

7.1.2 Principales normes nationales (GB/T)

| Norme n° | Nom standard | Contenu principal et application |
|------------------------|---|--|
| GB/T 23789- 2017 | Matériau en alliage de tungstène à densité élevée | Classification des alliages de tungstène, exigences techniques, indicateurs de performance, etc. |
| GB/T 20211-2006 | Tige en alliage de tungstène | Méthodes d'essai de la composition chimique et des propriétés mécaniques des tiges en alliage de tungstène |
| GB/T 13298- 2009 | Méthode d'essai des propriétés mécaniques des matériaux en alliage de tungstène | Normaliser les normes et méthodes d'essai des propriétés mécaniques |
| GB/T 19290- 2003 | Méthode de mesure de la densité des matériaux en alliage de tungstène | Détermination et analyse des erreurs de densité des alliages de tungstène |

7.1.3 Principales normes industrielles (YS/T)

| Norme n° | Nom standard | Champ d'application et caractéristiques |
|------------------|--|---|
| YS/T 531-2014 | Exigences techniques générales pour les matériaux en alliage de tungstène et en alliage tungstène-cuivre | Spécification détaillée des exigences techniques pour l'alliage de tungstène et l'alliage de cuivre et de tungstène |
| YS/T 155-2012 | Produits en alliage de tungstène haute densité | Processus de fabrication et contrôle des performances des produits en alliage de tungstène |
| YS/T 786-2016 | Méthode d'essai des propriétés mécaniques des alliages de tungstène | Normes de test des propriétés mécaniques pour garantir des données de test précises |

7.1.4 Points clés de la norme

- **de contrôle de la composition chimique**
définissent clairement la plage de teneur et les limites d'impuretés d'éléments tels que le tungstène, le nickel, le fer et le cuivre pour garantir des performances matérielles stables.
- **Les indicateurs de performance mécanique**
spécifient des indicateurs de performance clés tels que la résistance à la traction, la limite d'élasticité, l'allongement, la dureté, etc. pour répondre aux différentes exigences d'application.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **La précision dimensionnelle et la qualité de surface**
imposent des exigences spécifiques en matière de tolérance dimensionnelle, de rugosité de surface et de limite de défaut des tiges en alliage de tungstène.
- **Les méthodes d'inspection et de test**
comprennent la mesure de la densité, l'analyse métallographique, les tests de propriétés mécaniques et les normes techniques de test non destructif pour garantir que la qualité du produit est contrôlable.

7.1.5 Gestion de la mise en œuvre et de la supervision des normes

- **Responsabilités des entreprises de fabrication**
Les entreprises doivent suivre strictement les normes nationales et industrielles en matière de production et d'inspection pour garantir que les produits répondent aux spécifications.
- **de contrôle de la qualité**
des agences de contrôle de la qualité sont chargés de superviser la mise en œuvre des normes et des inspections aléatoires de la qualité des produits.
- **Agences de certification et de test**
Les agences de certification tierces fournissent une certification de qualité aux entreprises et aux produits afin d'améliorer l'acceptation du marché.

7.1.6 Mise à jour de la norme et tendance de développement

- **S'adaptant aux besoins des applications haut de gamme,**
avec la mise à niveau de la technologie dans l'aérospatiale, l'industrie nucléaire et d'autres domaines, les normes sont constamment affinées pour améliorer les indicateurs de performance et la précision de détection.
- **L'intégration des normes environnementales et de sécurité**
renforce les spécifications de protection de l'environnement et de performance en matière de sécurité, conformément aux exigences de fabrication verte et de conformité internationale.
- **L'intégration et la coordination internationales**
favorisent l'intégration avec les normes ISO et autres normes internationales, et favorisent l'internationalisation de l'industrie chinoise des tiges en alliage de tungstène .

résumé

Le système chinois de normes nationales (GB/T) et industrielles (YS/T) pour les tiges en alliage de tungstène offre un support technique complet et une assurance qualité pour la production et l'application de ces tiges . Avec les progrès technologiques et l'évolution de la demande du marché, ce système de normes continue de s'améliorer, contribuant ainsi à la progression constante de l'industrie chinoise des tiges en alliage de tungstène vers un développement de haute qualité et une compétitivité internationale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2 Système de normes américaines (ASTM, MIL)

En tant que pays important dans le domaine de la fabrication et des technologies de pointe, les États-Unis exercent une influence considérable sur la production, les essais et l'application des tiges en alliage de tungstène. Les normes ASTM (American Society for Testing and Materials) et MIL (US Military Standards) constituent le cœur des spécifications américaines des alliages de tungstène, garantissant que les performances des produits répondent aux exigences strictes des secteurs civil et militaire.

7.2.1 Aperçu du système de normes ASTM

- En tant qu'organisme de normalisation de renommée internationale, ASTM **International est chargé d'élaborer une série de normes couvrant les propriétés des matériaux, les méthodes d'essai et le contrôle qualité afin de promouvoir le développement de la science des matériaux et des applications industrielles.**
- **Normes ASTM relatives aux alliages de tungstène** Les normes ASTM réglementent systématiquement la composition chimique, les propriétés mécaniques, les méthodes d'essai et l'évaluation de la qualité des alliages de tungstène.

7.2.2 Principales normes et applications ASTM

| Norme n° | Nom standard | Contenu |
|--------------|---|--|
| ASTM B777 | Spécifications des poudres de tungstène et d'alliages de tungstène | Exigences de qualité de la poudre et méthodes d'inspection |
| ASTM B777-18 | Normes de test de densité et de propriétés mécaniques des alliages de tungstène | Essai de densité, de résistance à la traction et de dureté de l'alliage de tungstène |
| ASTM E8/E8M | Norme d'essai de traction des matériaux métalliques | Normaliser la procédure d'essai de traction de l'alliage de tungstène |
| ASTM B765 | Méthodes d'analyse chimique des matériaux en alliage de tungstène | Méthodes d'analyse spectrale et de détection de la composition des alliages de tungstène |
| ASTM E112 | Norme de détermination de la granulométrie | pour la microstructure des alliages de tungstène |

7.2.3 Aperçu du système MIL (norme militaire)

- **La norme MIL est** une norme militaire formulée par le Département de la Défense des États-Unis, qui impose des exigences de performance, de fiabilité et de sécurité extrêmement élevées aux produits

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

militaires. L'alliage de tungstène, l'un des matériaux clés, couvre la préparation des matériaux, les indicateurs de performance et le contrôle qualité.

- **Les caractéristiques des normes MIL**
se concentrent sur les performances de service et l'adaptabilité environnementale des matériaux. Ces spécifications, strictes et opérationnelles, sont largement utilisées dans les munitions militaires, l'aérospatiale et les équipements nucléaires.

7.2.4 Normes MIL typiques et leurs applications

| Norme n° | Nom standard | Contenu principal |
|-------------|---|--|
| MIL-T-21005 | tiges et produits en alliage de tungstène | Composition, propriétés mécaniques et spécifications dimensionnelles des tiges en alliage de tungstène |
| MIL-STD-810 | Considérations relatives à l'ingénierie environnementale et normes d'essais expérimentaux | matériaux en alliage de tungstène dans des environnements difficiles |
| MIL-STD-883 | Méthodes de test des matériaux des dispositifs microélectroniques | Alliages de tungstène dans les emballages microélectroniques |

7.2.5 Points clés de la norme

- **Contrôle strict de la composition chimique et des impuretés**
Les normes MIL imposent des limites strictes sur la composition des alliages et la teneur en impuretés afin de garantir que les propriétés des matériaux sont cohérentes et répondent aux normes élevées des applications militaires.
- **Des tests complets de propriétés mécaniques**
incluent la résistance à la traction, la limite d'élasticité, l'allongement, la dureté et la performance en fatigue pour garantir la fiabilité des tiges en alliage de tungstène dans des conditions extrêmes.
- **Tests d'adaptabilité environnementale :**
Élaborer des plans de test détaillés pour les environnements à haute température, à basse température, à humidité, aux vibrations, aux impacts et autres.
- **Le système de gestion de la qualité et de traçabilité**
met l'accent sur le contrôle du processus de production et la traçabilité des produits pour garantir la gestion complète du cycle de vie de la qualité des matériaux.

7.2.6 Avantages et influence du système standard américain

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Haute reconnaissance internationale**
Les normes ASTM et MIL sont largement reconnues et adoptées dans le monde entier, favorisant le commerce international et la coopération technique des tiges en alliage de tungstène.
- **Promouvoir**
les normes d'innovation technologique, promouvoir la mise à niveau continue des performances des matériaux et des technologies de test et stimuler le progrès technologique industriel.
- **Assurer la sécurité des applications critiques**
. Des normes strictes garantissent l'utilisation sûre et stable des alliages de tungstène dans les industries aérospatiale, militaire et nucléaire.

résumé

Aux États-Unis, les normes ASTM et MIL offrent un cadre idéal pour le contrôle qualité et l'assurance des performances des tiges en alliage de tungstène, répondant ainsi à des besoins variés, des applications civiles aux applications militaires. Leur contenu scientifique et rigoureux, ainsi que leur large applicabilité industrielle, ont contribué positivement au développement et à l'application des alliages de tungstène dans le monde entier.

7.3 Normes internationales de l'UE et de l'ISO

Avec la fréquence croissante des échanges commerciaux et techniques mondiaux sur les alliages de tungstène, les normes pertinentes formulées par l'Union européenne (UE) et l'Organisation internationale de normalisation (ISO) sont devenues un moteur important de l'internationalisation de l'industrie des tiges en alliage de tungstène et de l'unification des spécifications techniques. Les normes de l'UE mettent l'accent sur la protection de l'environnement, la sécurité et la conformité, tandis que les normes ISO se concentrent sur l'unification internationale des propriétés des matériaux et des méthodes d'essai, fournissant un cadre technique faisant autorité pour les tiges en alliage de tungstène sur le marché mondial.

7.3.1 Aperçu du système de normes de l'UE

- **Les organismes de normalisation de l'UE**
sont principalement composés du Comité européen de normalisation (CEN), du Comité européen de normalisation électrotechnique (CENELEC) et de l'Institut européen des normes de télécommunications (ETSI). Les normes relatives aux tiges en alliage de tungstène sont généralement élaborées par le CEN, en mettant l'accent sur les exigences de sécurité, d'environnement et de performance.
- **Cadre de conformité de l'UE**
Les matériaux en alliage de tungstène doivent être conformes aux réglementations environnementales de l'UE, telles que RoHS (directive sur la restriction des substances

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dangereuses), REACH (enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des produits chimiques), etc., pour garantir la sécurité des produits et la conformité environnementale.

7.3.2 Principales normes et réglementations liées à l'UE

| Nom de la norme/réglementation | Contenu principal | Champ d'application |
|--------------------------------|--|---|
| Série EN 12502 | Spécifications et méthodes d'essai pour les matériaux en tungstène et en alliage de tungstène | Tests de performance et de qualité des matériaux en alliage de tungstène |
| Directive RoHS (2011/65/UE) | Restriction de l'utilisation de substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques | Composants électroniques en alliage de tungstène et produits connexes |
| Règlement REACH (CE 1907/2006) | Exigences en matière d'enregistrement des produits chimiques et de gestion de la sécurité | Conformité environnementale dans la production et la chaîne d'approvisionnement des alliages de tungstène |
| Marquage CE | Marques de certification de sécurité et de conformité des produits | produits en alliage de tungstène sur le marché de l'UE |

7.3.3 Aperçu du système de normes internationales ISO

- **Introduction à l'organisation ISO**

L'Organisation internationale de normalisation (ISO) est une organisation faisant autorité qui élabore des normes mondiales unifiées, couvrant de nombreux aspects tels que les propriétés des matériaux, les méthodes d'essai, la gestion de la qualité, etc.

- **Normes ISO relatives aux**

alliages de tungstène Les normes ISO se concentrent sur la réglementation des indicateurs de performance, des méthodes d'essai et de la gestion de la qualité des matériaux en alliage de tungstène, fournissant une base unifiée pour le commerce international et la coopération technique.

7.3.4 Principales normes ISO et leurs applications

| Norme n° | Nom standard | Contenu principal |
|-----------|--|--|
| ISO 9001 | Exigences relatives au système de gestion de la qualité | Système de gestion de la qualité des entreprises de fabrication de tiges en alliage de tungstène |
| ISO 16143 | Poudre métallique - Alliage de tungstène pour la métallurgie des poudres | Spécifications techniques et méthodes d'essai de la poudre d'alliage de tungstène |
| ISO 4967 | Méthodes de détermination du carbone et du soufre | Test de composition chimique des matériaux en alliage de tungstène |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | |
|-----------------|---|---|
| ISO 6892 | Méthodes d'essai de traction pour les matériaux métalliques | Norme d'essai de traction des propriétés mécaniques des alliages de tungstène |
| ISO 6507 | Essai de dureté des métaux — Dureté Vickers | Normes internationales pour les essais de dureté des alliages de tungstène |

7.3.5 Points clés de la norme

- Conformité environnementale et de sécurité**
 Les normes de l'UE limitent strictement l'utilisation de substances dangereuses, garantissant que les matériaux en alliage de tungstène répondent aux exigences de protection de l'environnement et favorisent la fabrication verte.
- Unification internationale des tests de performance**
 Les normes ISO unifient les méthodes de test de performance physique et mécanique des alliages de tungstène pour garantir la comparabilité des données de performance des produits entre les pays.
- La construction d'un système de gestion de la qualité**
 encourage les fabricants d'alliages de tungstène à établir un système de gestion de la qualité solide et à améliorer les niveaux de production et de gestion.
- Les échanges techniques et l'accès au marché**
 réduisent les barrières commerciales internationales et facilitent l'entrée des produits en alliage de tungstène sur le marché mondial.

7.3.6 Synergie entre les normes européennes et ISO

- Les normes de l'UE sont souvent formulées en référence aux normes internationales ISO, favorisant ainsi la cohérence mondiale des normes techniques.
- Les normes ISO fournissent aux entreprises une base pour la gestion de la qualité et les spécifications techniques, soutenant la certification de conformité conformément aux réglementations de l'UE.
- Les deux parties promeuvent conjointement la modernisation technologique et le développement vert de l'industrie des alliages de tungstène et favorisent la coopération internationale.

résumé

Les systèmes de normes de l'UE et de l'ISO fournissent un cadre réglementaire international complet pour l'industrie des barres en alliage de tungstène, couvrant de multiples aspects tels que la performance, les essais, la protection de l'environnement et la gestion de la qualité. Le respect de ces normes contribue non seulement à garantir la qualité et la sécurité des produits, mais favorise également la compétitivité internationale et l'expansion des entreprises chinoises d'alliages de tungstène. À l'avenir, grâce à l'amélioration et à la mise à jour continues des normes internationales, l'industrie des barres en alliage de tungstène atteindra un niveau de normalisation et de développement international plus élevé.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.4 Certification de la protection de l'environnement et de la sécurité des matériaux (RoHS, REACH, MSDS)

Alors que le monde accorde une attention croissante à la protection de l'environnement et à la santé et sécurité au travail, la production et l'utilisation de tiges en alliage de tungstène doivent respecter scrupuleusement les lois et réglementations environnementales et les normes de sécurité des matériaux. Les certifications RoHS, REACH et MSDS sont devenues indispensables à l'entrée des fabricants d'alliages de tungstène sur le marché international, notamment sur le marché européen. Ces certifications garantissent non seulement la conformité environnementale des matériaux, mais aussi la sécurité des utilisateurs et de l'environnement.

7.4.1 Directive RoHS (Directive sur la restriction des substances dangereuses)

- **Directive Introduction**

La directive RoHS (Restriction of Hazardous Substances) a été publiée par l'Union européenne en 2003 pour restreindre l'utilisation de substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques et pour protéger l'environnement et la santé humaine.

- **Les principales substances restreintes**

comprennent le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le chrome hexavalent (Cr(VI)), les polybromobiphényles (PBB) et les polybromodiphényléthers (PBDE).

- **Impact sur les tiges en alliage de tungstène**

Si des matériaux en alliage de tungstène sont utilisés dans des produits électroniques et électriques, il est nécessaire de s'assurer que la teneur en substances nocives mentionnées ci-dessus respecte la limite RoHS pour éviter de dépasser la limite et d'affecter l'accès au marché.

- **Les entreprises de test et de conformité**

sont tenues d'effectuer des tests stricts de composition des matériaux et de fournir des déclarations de conformité RoHS et des rapports de test.

7.4.2 Règlement REACH (enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques)

- **Contexte réglementaire**

REACH est un règlement complet sur la gestion des produits chimiques mis en œuvre par l'Union européenne en 2007, obligeant les fabricants et les importateurs à enregistrer et à évaluer la sécurité des produits chimiques.

- **Obligations d'enregistrement**

des matériaux en alliage de tungstène Les fabricants d'alliages de tungstène doivent enregistrer leurs produits auprès de l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) et soumettre des données de sécurité et des évaluations des risques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Évaluation et restriction des matériaux**
Si le tungstène et ses composés sont inclus dans la liste des substances extrêmement préoccupantes (SVHC), ils doivent être spécialement gérés et restreints.
- **La responsabilité de la chaîne d'approvisionnement**
exige que les entreprises soient transparentes sur les informations chimiques dans la chaîne d'approvisionnement et veillent à ce que les utilisateurs en aval soient informés des informations sur la sécurité des matériaux.

7.4.3 FDS (Fiche de données de sécurité)

- **Définition et fonction**
La FDS est une fiche de données de sécurité qui fournit les propriétés chimiques, les risques pour la santé, les mesures de protection et les directives de traitement d'urgence des tiges en alliage de tungstène.
- **Le contenu doit**
inclure des informations sur les propriétés physiques et chimiques, l'identification des dangers, le stockage et le transport, le contrôle de l'exposition et la protection individuelle.
- **Obligations des entreprises**
Les entreprises de production et d'approvisionnement doivent préparer et fournir des fiches de données de sécurité (FDS) conformes aux normes internationales pour garantir une utilisation sûre.

7.4.4 L'importance de la protection de l'environnement et de la certification de sécurité

- **Protéger l'environnement et la santé**
en contrôlant l'émission de substances dangereuses et en réduisant la pollution de l'environnement et les risques pour la santé au travail.
- **Favoriser l'accès au marché**
Grâce aux certifications RoHS et REACH, les produits en tiges d'alliage de tungstène sont reconnus par l'UE et les principaux marchés mondiaux.
- **Améliorer la compétitivité des entreprises**
La conformité environnementale est une manifestation importante de la responsabilité sociale des entreprises et de la réputation de la marque.
- **Soutenir le développement durable,**
promouvoir la fabrication verte et l'économie circulaire et promouvoir le développement sain de l'industrie.

7.4.5 Stratégies de réponse des entreprises d'alliages de tungstène

- **Renforcer la gestion de la composition des matériaux**
et contrôler strictement la teneur en substances nocives dans les processus d'approvisionnement et de production des matières premières.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Améliorer le système de test et de surveillance,**
établir des capacités de test internes et coopérer avec des agences de certification tierces pour effectuer des tests de conformité.
- **Demandez activement les certifications pertinentes**
pour obtenir les certificats RoHS, REACH et autres certifications pour répondre aux besoins des clients et du marché.
- **Améliorez la transparence des informations**
et fournissez des fiches de données de sécurité complètes et un support technique pour garantir une utilisation sûre par les clients.

Résumé

La certification en matière de protection de l'environnement et de sécurité des matériaux est un atout majeur pour l'industrie des tiges en alliage de tungstène et son implantation sur le marché international. En se conformant strictement aux réglementations RoHS et REACH et en améliorant la gestion des fiches de données de sécurité (FDS), les entreprises garantissent non seulement la sécurité et la conformité de leurs produits, mais posent également des bases solides pour le développement durable et la compétitivité mondiale. À l'avenir, avec l'amélioration continue des lois et réglementations environnementales, les fabricants de tiges en alliage de tungstène devront continuer à améliorer leur gestion environnementale afin de s'adapter aux exigences croissantes du marché et de la société.

7.5 Exigences relatives aux systèmes qualité dans les domaines aéronautique, militaire et médical

Matériau haute performance essentiel, les tiges en alliage de tungstène sont utilisées dans des secteurs haut de gamme tels que l'aérospatiale, l'équipement militaire et le matériel médical, qui imposent des exigences très élevées en matière de système qualité. Les industries concernées adoptent généralement des systèmes de gestion de la qualité et des normes de certification stricts pour garantir la sécurité, la fiabilité et la constance des matériaux, et répondre aux exigences de service dans des conditions de travail extrêmes.

7.5.1 Exigences relatives au système qualité dans le secteur aérospace

- **Normes et certifications de l'industrie**
 - AS9100 : Norme relative au système de gestion de la qualité aérospace, basée sur l'ISO 9001 et ajoutant des exigences spécifiques à l'aérospatiale ;
 - NADCAP : Certification des procédés spéciaux aérospace, couvrant des maillons clés tels que le traitement thermique et les essais non destructifs.
- **Points clés de contrôle qualité**
 - Traçabilité des lots et cohérence des matières ;
 - Tests de performance physiques et chimiques stricts ;
 - Contrôle de taille de haute précision et exigences de qualité de surface.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Mesures de gestion de la qualité**
 - Mettre en œuvre la gestion des risques et les contrôles des processus ;
 - Utiliser une technologie de test avancée (comme les rayons X, la tomodensitométrie) pour les tests non destructifs ;
 - Effectuer régulièrement des audits de la chaîne d'approvisionnement et des examens sur site.

7.5.2 Exigences relatives au système qualité dans l'industrie militaire

- **Normes de qualité militaires**
 - MIL-Q-9858A : Système d'assurance qualité militaire ;
 - MIL-STD-105E : Norme d'inspection par échantillonnage militaire ;
 - MIL-STD-1916 : Norme de contrôle des processus militaires.
- **Exigences de performance et de fiabilité**
 - Répond aux spécifications de performance pour les environnements de température, de choc et de vibration extrêmes ;
 - La haute pureté et la faible teneur en impuretés garantissent la durée de vie du matériau ;
 - Contrôle strict du taux de défauts et normes de réparation des défauts.
- **Mesures d'assurance qualité**
 - Système complet de traçabilité des produits ;
 - Utiliser des équipements de mesure et de test avancés ;
 - Mettre l'accent sur la formation des employés et la mise en œuvre des spécifications des processus.

7.5.3 Exigences relatives au système qualité dans le domaine médical

- **Normes de qualité des dispositifs médicaux**
 - ISO 13485 : Norme relative aux systèmes de gestion de la qualité pour les dispositifs médicaux ;
 - FDA 21 CFR Partie 820 : Réglementation qualité de la Food and Drug Administration des États-Unis pour les dispositifs médicaux.
- **Sécurité et biocompatibilité**
 - Les matériaux en alliage de tungstène doivent répondre aux exigences de biocompatibilité pour éviter la toxicité et les réactions allergiques ;
 - Normes strictes de nettoyage et de stérilisation ;
 - Assurer la stabilité et la sécurité des matériaux dans les environnements médicaux tels que la radiothérapie.
- **Mesures de gestion de la qualité**
 - Mettre en place un système global de gestion des risques (ISO 14971) ;
 - Processus documentés de contrôle de conception et de gestion des changements ;
 - Audits internes réguliers et certifications externes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.5.4 Points communs de mise en œuvre du système qualité

- **Certification du système et amélioration continue**
Les entreprises doivent passer la certification du système de gestion de la qualité des organisations faisant autorité dans les domaines connexes et améliorer et optimiser en permanence le processus de contrôle de la qualité.
- **Une gestion stricte de la chaîne d'approvisionnement**
met en œuvre un contrôle et un suivi de la qualité tout au long du processus, depuis l'approvisionnement en matières premières jusqu'à la livraison du produit final.
- **La surveillance de la qualité basée sur les données**
utilise le Big Data et les technologies de l'information pour effectuer une surveillance en temps réel et une alerte précoce du processus de production.
- **La culture des talents et la construction culturelle**
se concentrent sur la sensibilisation à la qualité et créent une culture de gestion de la qualité avec la participation de tous les employés.

résumé

Les secteurs aéronautique, militaire et médical ont imposé des normes extrêmement élevées et des exigences de gestion strictes pour le système qualité des tiges en alliage de tungstène. Les entreprises doivent mettre en place un système complet de gestion de la qualité, adapté aux spécificités du secteur, afin de garantir la fiabilité et la sécurité des matériaux dans des conditions de travail extrêmes. C'est non seulement la base pour répondre aux besoins des clients, mais aussi la clé pour améliorer la compétitivité des entreprises et promouvoir un développement de haute qualité du secteur.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

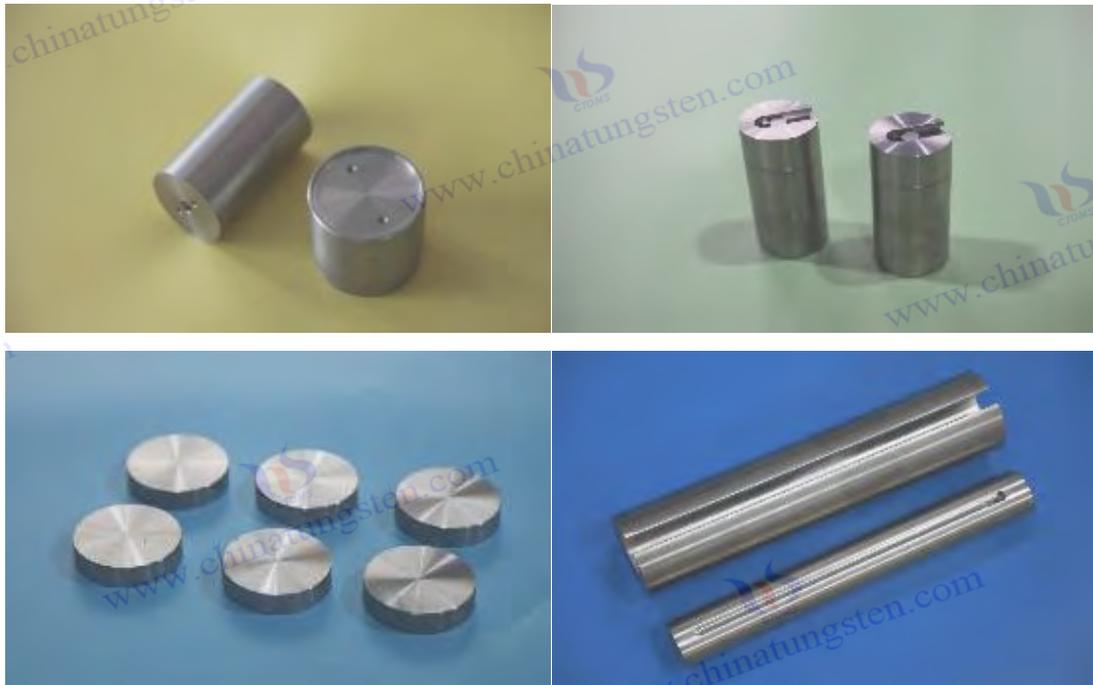
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



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



Chapitre 8 Emballage, stockage et transport des tiges en alliage de tungstène

8.1 Méthode d'emballage et mesures de protection (emballage sous vide, déshydratant)

Les tiges en alliage de tungstène présentent une densité et une dureté élevées et répondent à des exigences d'application spécifiques. L'emballage et les mesures de protection sont donc particulièrement importants. Une conception judicieuse de l'emballage permet non seulement de protéger le produit des dommages mécaniques, de la corrosion et des impacts environnementaux, mais aussi de garantir la sécurité et l'intégrité du transport.

8.1.1 Emballage

- **Emballage sous vide**
 - Utiliser la technologie du vide pour extraire l'air de l'emballage afin de réduire l'oxydation et la corrosion de la surface de l'alliage de tungstène par l'oxygène et l'humidité ;
 - Convient au stockage à long terme et au transport à l'exportation, en particulier dans des environnements à forte humidité ou à grandes différences de température ;
 - Les sacs d'emballage sous vide sont généralement constitués de matériaux composites multicouches présentant une bonne étanchéité à l'air et une bonne résistance mécanique.
- **Emballage en papier et film plastique antirouille**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Enveloppez la surface de la tige en alliage de tungstène avec du papier antirouille pour former une couche d'isolation physique afin d'empêcher l'intrusion de vapeur d'eau et de milieux corrosifs ;
- La couche extérieure est ensuite enveloppée d'un film plastique pour éviter les rayures mécaniques et la pollution par la poussière ;
- Convient au stockage et au transport à court terme dans des conditions environnementales normales.
- **Emballage en caisses et palettes en bois**
 - Après l'emballage primaire, les tiges en alliage de tungstène sont placées dans des caisses en bois robustes pour éviter les chocs et les vibrations pendant le transport ;
 - La boîte en bois est équipée de matériaux de rembourrage, tels que de la mousse ou du coton perlé, pour protéger davantage le produit ;
 - Les palettes en bois sont faciles à transporter par chariot élévateur, ce qui améliore l'efficacité logistique.
- **Emballage en fût métallique ou en cylindre d'acier**
 - des tiges en alliage de tungstène avec des spécifications spéciales ou de grande valeur, des fûts métalliques ou des cylindres en acier sont utilisés pour l'emballage afin d'améliorer la résistance de la protection ;
 - En même temps, il est facile à sceller et à protéger, ce qui est propice au transport maritime.

8.1.2 Mesures de protection

- **Utilisation d'un dessiccant**
 - Placez un déshydratant (tel que du gel de silice, un tamis moléculaire) à l'intérieur de l'emballage pour absorber efficacement l'humidité dans l'espace d'emballage et empêcher l'oxydation causée par l'humidité ;
 - La quantité de dessiccant doit être configurée de manière raisonnable en fonction du volume de l'emballage et de l'humidité de l'environnement de transport ;
 - Remplacez régulièrement le dessiccant pour garantir la sécheresse de l'environnement d'emballage.
- **Revêtement anticorrosion ou film d'huile**
 - Appliquez de l'huile antirouille ou un revêtement anticorrosion spécial sur la surface de la tige en alliage de tungstène pour fournir une couche de protection chimique ;
 - Empêchez l'humidité et les embruns salins de corroder la surface du matériau.
- **Conception de tampon antichoc**
 - Concevoir une structure tampon multicouche à l'intérieur de la boîte d'emballage pour réduire les vibrations mécaniques et les impacts pendant le transport ;
 - La tige en alliage de tungstène est enveloppée d'un matériau absorbant les chocs pour éviter les rayures et la déformation de la surface.
- **Performance d'étanchéité garantie**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- L'emballage doit avoir de bonnes performances d'étanchéité pour empêcher l'air et la poussière de pénétrer ;
- L'emballage sous vide ou sous azote peut encore améliorer l'effet d'étanchéité.

8.1.3 Points clés de la conception de l'emballage

- **Personnalisez la structure de l'emballage en fonction de la taille et du poids du produit.**
Les tiges en alliage de tungstène étant lourdes, les matériaux et structures d'emballage doivent avoir une capacité portante suffisante pour éviter tout dommage pendant le transport.
- **Les étiquettes sont claires et complètes.**
Les spécifications du produit, son poids, les précautions d'emploi et le sens de transport sont indiqués à l'extérieur de la boîte d'emballage pour faciliter la logistique et la gestion de l'entreposage.
- **La sélection de matériaux respectueux de l'environnement**
donne la priorité aux matériaux respectueux de l'environnement et recyclables, conformes aux réglementations de fabrication verte et environnementales.

résumé

Des méthodes d'emballage et des mesures de protection scientifiques et rationnelles sont essentielles pour garantir la qualité et la sécurité du transport des tiges en alliage de tungstène. Grâce à l'emballage sous vide, à l'utilisation de dessiccants, au revêtement anticorrosion et à la conception de tampons, l'oxydation, la corrosion et les dommages mécaniques sont efficacement évités, offrant ainsi une protection solide pour le stockage et le transport des tiges en alliage de tungstène. Grâce au développement des technologies logistiques et des concepts de protection de l'environnement, les solutions d'emballage des tiges en alliage de tungstène continueront d'être optimisées pour contribuer au développement vert et durable de l'industrie.

8.2 Conditions et précautions de stockage (contrôle de la température et de l'humidité, prévention de la corrosion)

Pendant le stockage, les tiges en alliage de tungstène sont fortement affectées par la température ambiante, l'humidité et les agents chimiques. De mauvaises conditions de stockage peuvent entraîner une oxydation et une corrosion superficielles du matériau, voire une dégradation des performances internes. Par conséquent, une gestion scientifique et raisonnée du stockage est essentielle pour préserver la qualité des tiges en alliage de tungstène.

8.2.1 Contrôle de la température et de l'humidité

- **Exigences de température**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- L'environnement de stockage doit maintenir une température constante et appropriée, généralement 15°C~25°C est recommandé, et éviter les changements de température drastiques ;
- Une température élevée peut accélérer la réaction d'oxydation à la surface du matériau, affectant la finition de surface et les propriétés mécaniques ;
- Si une basse température s'accompagne d'une humidité accrue, de l'eau de condensation risque de se former, provoquant de la corrosion.
- **Exigences en matière d'humidité**
 - L'humidité relative doit être contrôlée entre 40 % et 60 % pour éviter qu'une humidité excessive ne provoque de la rouille sur la surface métallique ;
 - Une humidité trop faible entraînera une défaillance rapide du dessiccant et nécessitera son remplacement à temps ;
 - Équipez-vous d'un équipement de déshumidification de l'air, tel qu'un déshumidificateur, pour maintenir un environnement sec.
- **Surveillance environnementale**
 - Les entrepôts de stockage doivent être équipés de dispositifs de surveillance de la température et de l'humidité pour surveiller les paramètres environnementaux en temps réel ;
 - Prendre des mesures d'ajustement en temps opportun lorsque des anomalies surviennent pour garantir un environnement stable.

8.2.2 Mesures anticorrosion

- **Inhibiteurs de rouille et protection de revêtement**
 - Enduire la surface de la tige en alliage de tungstène avec de la graisse anti-rouille ou un revêtement anticorrosion spécial pour former une couche isolante afin d'empêcher le contact direct entre l'oxygène et l'humidité ;
 - Vérifiez régulièrement l'intégrité du revêtement et réparez ou appliquez une nouvelle couche si des dommages sont constatés.
- **Emballage isolant**
 - Utilisez du papier anti-rouille ou un film plastique pour envelopper le produit afin de réduire le contact direct avec l'air ;
 - Placez un déshydratant à l'intérieur de l'emballage pour absorber l'humidité et éviter la formation d'un environnement humide à l'intérieur.
- **Gestion de l'environnement de l'entrepôt**
 - Évitez le contact direct des tiges en alliage de tungstène avec le sol humide et stockez-les en hauteur ;
 - Empêchez les gaz chimiques corrosifs (tels que les sulfures et les chlorures) d'envahir l'environnement de l'entrepôt ;
 - Aérer régulièrement pour éviter l'accumulation de gaz nocifs dans les espaces confinés.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2.3 Notes sur la gestion du stockage

- **Méthode d'empilement**
 - Les tiges en alliage de tungstène sont lourdes et doivent être empilées correctement pour éviter la déformation causée par une pression d'empilage élevée ;
 - Empilés par lots selon les spécifications pour une gestion et une récupération faciles.
- **Logo de protection**
 - La zone de stockage doit être clairement signalée par des rappels de sécurité tels que « résistant à l'humidité, au feu et à la pression » ;
 - Les matériaux critiques doivent disposer de zones de stockage dédiées pour éviter tout mélange et toute contamination croisée.
- **Inspection et entretien réguliers**
 - Mettre en place un système d'inspection du stockage pour vérifier l'intégrité de l'emballage, la prévention de la rouille et les paramètres environnementaux ;
 - Toute situation anormale constatée doit être traitée rapidement afin d'éviter que les problèmes de qualité ne s'aggravent.

résumé

Un contrôle raisonnable de la température et de l'humidité, ainsi que des mesures anticorrosion scientifiques, sont essentiels pour garantir la qualité du stockage des tiges en alliage de tungstène. Le maintien de paramètres environnementaux appropriés, combiné à une protection efficace de l'emballage et à une gestion du stockage efficace, permet de maximiser la durée de vie du produit et de garantir que le matériau conserve d'excellentes propriétés physiques et mécaniques avant utilisation. Les entreprises doivent veiller à la qualité du stockage, mettre en place des systèmes de gestion et garantir un stockage sûr et stable des tiges en alliage de tungstène.

8.3 Règlements internationaux sur le transport et directives relatives à la déclaration des marchandises dangereuses

En tant que matériau métallique à haute densité, le transport international de tiges en alliage de tungstène est soumis aux réglementations et exigences douanières de nombreux pays. Il est nécessaire de respecter scrupuleusement les réglementations en vigueur pour garantir la sécurité du transport, la conformité et un dédouanement fluide. En particulier pour la déclaration de marchandises dangereuses, les entreprises doivent évaluer précisément les propriétés du produit et préparer des documents de transport complets.

8.3.1 Aperçu des réglementations internationales en matière de transport

- **Code maritime international des marchandises dangereuses (Code IMDG)**

Le Code maritime international des marchandises dangereuses, établi par l'Organisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

maritime internationale (OMI), régleme la classification, l'emballage, l'étiquetage et la déclaration des marchandises dangereuses pendant le transport maritime.

- **Le Règlement sur les marchandises dangereuses de l'Association du transport aérien international (IATA)**

régit les exigences relatives aux marchandises dangereuses transportées par voie aérienne, couvrant les procédures d'emballage, de déclaration, d'étiquetage et de manutention.

- **Les Recommandations des Nations Unies relatives au transport des marchandises dangereuses (Recommandations de l'ONU)**

unifient les normes mondiales de classification et d'étiquetage des marchandises dangereuses et constituent la base des réglementations sur le transport des marchandises dangereuses dans divers pays.

- **Les services des douanes et des transports de divers pays**

ont des exigences spécifiques pour le transport de tiges en alliage de tungstène dans différents pays, et les lois pertinentes des pays importateurs et exportateurs doivent être respectées.

8.3.2 Classification du transport et déclaration de marchandises dangereuses des tiges en alliage de tungstène

- **en alliage de tungstène est -elle un objet dangereux ?**

- D'une manière générale, les tiges en alliage de tungstène pur ne sont pas des marchandises dangereuses et ne présentent pas de propriétés chimiques dangereuses particulières.
- Cependant, si la surface de la tige en alliage de tungstène est recouverte de graisse inflammable ou contient d'autres produits chimiques dangereux, elle doit être déclarée selon la catégorie correspondante.

- **Processus de candidature**

- Préparer les fiches techniques des produits et les fiches de données de sécurité (FDS) ;
- Remplissez le formulaire de déclaration de marchandises dangereuses selon le mode de transport, et précisez la catégorie d'emballage et l'étiquette ;
- Fournir des emballages et des étiquetages conformes aux normes ;
- Déclarer au transporteur et aux autorités réglementaires compétentes et obtenir l'approbation.

8.3.3 Exigences en matière d'emballage et d'étiquetage

- **Emballage répondant aux normes de transport**

- Les matériaux d'emballage doivent répondre aux exigences de résistance et d'étanchéité de l'IMDG et de l'IATA ;
- Assurez-vous que l'emballage peut résister aux vibrations, à l'extrusion et aux changements climatiques pendant le transport.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Panneaux et étiquettes de marchandises dangereuses**
 - Les marchandises non dangereuses n'ont pas besoin d'étiquetage spécial, mais elles doivent être marquées avec le poids, la taille et la fragilité.
 - Si le produit contient des substances dangereuses, les étiquettes de marchandises dangereuses et les marques de transport correspondantes doivent être apposées.
- **Code d'emballage des marchandises dangereuses**
 - La boîte d'emballage doit comporter le numéro UN, le type d'emballage et la marque de test de performance.

8.3.4 Précautions pour le transport international

- **Classification précise**
 - Vérifiez soigneusement les propriétés du produit et des matériaux associés pour éviter toute fausse déclaration pouvant entraîner des retards d'expédition ou des amendes.
- **Dossier complet**
 - Préparez les documents d'expédition complets, y compris la facture commerciale, la liste de colisage, le formulaire de déclaration de marchandises dangereuses, la fiche de données de sécurité et les licences pertinentes.
- **Choisissez un transporteur conforme**
 - Choisissez un courtier en logistique et en douane expérimenté pour vous assurer que le plan de transport est conforme aux exigences réglementaires.
- **Assurance d'expédition**
 - Souscrivez une assurance de transport de marchandises appropriée pour prévenir les risques de transport.
- **Plan d'urgence**
 - Élaborer des plans d'intervention d'urgence en cas d'accident de transport et s'équiper des fournitures d'urgence nécessaires.

résumé

Les tiges en alliage de tungstène sont soumises à des réglementations et des procédures complexes. Une compréhension précise des exigences de classification et de déclaration de transport, ainsi que l'utilisation d'emballages et d'étiquetages standardisés, sont essentielles pour garantir la sécurité du transport et un dédouanement fluide. Les entreprises doivent mettre en place un système complet de conformité des transports, améliorer leur gestion, réduire les risques liés au transport et garantir la fluidité de la circulation mondiale des tiges en alliage de tungstène .

8.4 Exigences en matière de surveillance douanière et de licence pour l'exportation de tiges en alliage de tungstène

En tant que matériau métallique stratégique, l'exportation de tiges en alliage de tungstène est strictement réglementée par de nombreux gouvernements. Les entreprises exportatrices doivent se

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conformer aux lois et réglementations nationales en vigueur, demander les licences d'exportation nécessaires, remplir les obligations de déclaration en douane et s'assurer que les produits sont exportés sans problème et conformes aux exigences du pays importateur.

8.4.1 Aperçu de la politique de surveillance douanière

- **Gestion stratégique des ressources**

Étant donné que le tungstène est un métal rare, le pays le répertorie généralement comme une ressource stratégique qui nécessite une gestion clé et met en œuvre un système de gestion des quotas et de licences pour son exportation.

- **Exigences de déclaration douanière :**

L'exportation de tiges en alliage de tungstène doit être déclarée conformément à la réglementation douanière, en fournissant un code de marchandise précis (code SH), un modèle de spécification, une quantité et une valeur et d'autres informations.

- **Restrictions et contrôles à l'exportation**

Certains pays et régions ont des restrictions spéciales sur l'exportation d'alliages de tungstène, telles que le contrôle de la sensibilité technique, les enquêtes antidumping, etc. Les entreprises doivent comprendre à l'avance les politiques pertinentes.

8.4.2 Processus de demande de licence d'exportation

- **La licence**

est généralement délivrée par le département national du commerce ou le département de gestion des matériaux métalliques.

- **Documents de candidature**

- Licence d'exploitation et certificat de qualification de l'entreprise ;
- Rapports de tests de produits et documents de certification de qualité ;
- Preuve de contrat et de commande ;
- Déclaration en douane et documents d'expédition associés.

- **Processus d'approbation**

1. Soumettre les dossiers de candidature à l'autorité compétente ;
2. Les services concernés vérifient la qualité et la conformité des produits ;
3. Après approbation, la licence d'exportation sera délivrée ;
4. Les entreprises doivent effectuer les formalités douanières d'exportation munies de la licence.

- **Période de validité et renouvellement**

Les licences d'exportation ont généralement des limites de validité et les entreprises doivent les renouveler à temps pour garantir la continuité des exportations.

8.4.3 Points clés de la déclaration et de la surveillance douanières

- **Codage SH précis**

Les tiges en alliage de tungstène doivent utiliser le codage du système harmonisé (SH)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

accepté au niveau international pour garantir une classification douanière et une taxation précises.

- **Les documents de dédouanement**

comprennent les factures, les listes de colisage, les licences d'exportation, les contrats, les documents d'expédition et les certificats d'origine, etc., pour garantir que tous les documents sont complets.

- **Inspection douanière et inspection aléatoire**

Les tiges en alliage de tungstène peuvent être inspectées lors de l'exportation et les entreprises doivent coopérer pour fournir des échantillons et des rapports de test.

- **Politique fiscale**

Comprendre la politique de remboursement des taxes à l'exportation et les avantages connexes, et planifier le processus d'exportation de manière raisonnable.

8.4.4 Précautions et prévention et contrôle des risques

- **Les risques de conformité évitent les activités illégales telles que**

les fausses déclarations et les exportations illégales pour éviter les sanctions et la perte de réputation.

- **Changements de politique**

Prêtez attention aux politiques commerciales nationales et internationales et aux tendances en matière de contrôle des exportations, et ajustez les stratégies d'exportation en temps opportun.

- **La conformité du commerce transfrontalier nécessite**

le respect des exigences réglementaires du pays importateur et l'accomplissement des procédures de certification et d'inspection nécessaires.

- **La coordination de la chaîne d'approvisionnement**

renforce la communication avec les agences de logistique, de déclaration douanière et d'inspection pour garantir un processus d'exportation fluide.

Résumé :

L'exportation de tiges en alliage de tungstène implique une supervision douanière et une gestion des licences complexes. Les entreprises doivent comprendre et respecter scrupuleusement les lois, réglementations et procédures en vigueur. Une gestion scientifique des exportations garantit non seulement la conformité des opérations, mais contribue également à renforcer la compétitivité internationale et les capacités d'expansion des entreprises. Il est recommandé aux entreprises de constituer une équipe dédiée à la conformité commerciale, de renforcer la gestion des risques et de promouvoir le développement sain des activités d'exportation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 9 Structure du marché et tendance de développement des tiges en alliage de tungstène

9.1 Aperçu de la chaîne industrielle mondiale des ressources en tungstène et des tiges en alliage

Le tungstène, métal stratégique rare et important, est largement utilisé dans des secteurs haut de gamme tels que l'aérospatiale, l'industrie militaire, l'électronique et les soins médicaux en raison de son point de fusion élevé, de sa densité élevée et de ses excellentes propriétés mécaniques. Produit essentiel de la transformation en profondeur des ressources en tungstène, la demande en tiges d'alliage de tungstène ne cesse de croître. Sa chaîne industrielle est complexe et présente des caractéristiques mondiales évidentes.

9.1.1 Répartition mondiale des ressources en tungstène

- **Les principales zones de production sont concentrées dans** les ressources mondiales en tungstène, qui sont principalement réparties en Chine, en Russie, au Canada, au Vietnam, au Portugal, en Autriche et dans d'autres pays.
 - La Chine est le plus grand producteur mondial de minerai de tungstène, représentant plus de 80 % de la production mondiale, avec de riches réserves de tungstène et une technologie minière mature ;
 - La Russie et le Canada possèdent également des gisements de tungstène à grande échelle et ont une certaine influence sur le marché international ;
 - Le Vietnam et le Portugal sont des zones de production avec des ressources en tungstène relativement concentrées et un potentiel plus important.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Types de ressources**
Le minerai de tungstène existe principalement sous forme de chalcantite (CaWO_4), de wolframite (FeWO_4) et scheelite (WO_3). La teneur du minerai et la difficulté d'extraction affectent l'efficacité du développement des ressources.
- **Défis liés aux ressources et à l'environnement**
: L'exploitation minière du tungstène est confrontée à une pression environnementale et à des risques d'épuisement des ressources, ce qui incite l'industrie à se développer dans le sens d'une utilisation efficace des ressources et d'une économie circulaire.

9.1.2 État actuel de l'extraction et du traitement des ressources en tungstène

- **La technologie minière**
combine exploitation à ciel ouvert et exploitation souterraine, selon une sélection flexible en fonction des différentes conditions de gisement. Des machines modernes et des technologies d'automatisation sont progressivement développées pour améliorer l'efficacité et la sécurité de l'exploitation minière.
- **Fusion primaire et production de concentrés :**
le minerai de tungstène subit des opérations d'enrichissement, de grillage et de lixiviation chimique pour obtenir un concentré de tungstène de haute pureté. La qualité du concentré influence directement les performances de la poudre et des produits d'alliage de tungstène obtenus ultérieurement.
- **Progrès dans la technologie de fusion**
Les innovations continues dans la technologie de fusion du tungstène, notamment la réduction thermique du carbone, la réduction de l'hydrogène et le dépôt chimique en phase vapeur, ont permis la production de tungstène de haute pureté.

9.1.3 Structure de la chaîne industrielle des tiges en alliage de tungstène

La chaîne industrielle des tiges en alliage de tungstène comprend principalement les maillons suivants :

1. Le minerai de tungstène, le concentré de tungstène et la poudre de tungstène sont les matières premières de base pour la production de Tiges en alliage **de tungstène**. La qualité et la stabilité de l'approvisionnement en matières premières sont essentielles à la régularité du produit et à la maîtrise des coûts.
2. **Métallurgie des poudres et préparation des alliages.**
Grâce au procédé de métallurgie des poudres, la poudre de tungstène est mélangée uniformément avec des éléments d'alliage (tels que le nickel, le fer et le cuivre), pressée et frittée. Cette étape détermine la structure organisationnelle et les indicateurs de performance des tiges d'alliage de tungstène.
3. **Le traitement de formage**
comprend l'usinage, le traitement thermique et le traitement de surface pour garantir que le produit répond aux exigences de taille et de performance de conception.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Tests de performance et contrôle qualité

Des tests de performance physiques, chimiques et mécaniques stricts garantissent la qualité du produit.

5. Ventes et applications

Les tiges en alliage de tungstène sont largement utilisées dans l'aérospatiale, l'armée, la médecine, l'électronique et d'autres domaines, et la demande du marché est en constante expansion.

9.1.4 Caractéristiques de la mondialisation de la chaîne industrielle

- **Coopération transnationale dans la chaîne d'approvisionnement**

La répartition des ressources en minerai de tungstène et les zones de capacité de traitement en aval ne se chevauchent pas complètement, ce qui a conduit à la formation d'un modèle de coopération transnationale dans la chaîne industrielle des tiges en alliage de tungstène. La Chine dispose des avantages des ressources minérales et des capacités de fusion à grande échelle, tandis que l'Europe, les États-Unis, le Japon, la Corée du Sud et d'autres pays se concentrent sur le traitement haut de gamme et la fabrication de précision.

- **Technologie et marché à double entraînement**

Le progrès technologique favorise l'amélioration des performances des tiges en alliage de tungstène, tandis que la diversification de la demande du marché favorise l'ajustement de la chaîne industrielle.

- **Flux commerciaux :**

Les matières premières en tungstène sont principalement exportées par les pays riches en ressources, tandis que les produits transformés circulent sur le marché international. En tant que produit à haute valeur ajoutée, l'activité commerciale des tiges en alliage de tungstène augmente progressivement.

résumé

Bien que les ressources mondiales en tungstène soient relativement concentrées, la chaîne industrielle des barres en alliage de tungstène est hautement internationalisée et complexe. Comprendre la répartition des ressources et la structure de la chaîne industrielle est essentiel pour comprendre la structure du marché et les tendances de développement des barres en alliage de tungstène. À l'avenir, grâce aux progrès technologiques et à la promotion de concepts de fabrication écologiques, la chaîne industrielle des barres en alliage de tungstène sera plus performante et favorisera un développement de haute qualité.

9.2 Analyse de la taille et des tendances de croissance du marché des tiges en alliage de tungstène

En tant que matériau fonctionnel haute performance, les tiges en alliage de tungstène sont largement utilisées dans l'aérospatiale, les équipements militaires, les équipements médicaux, l'électronique haut de gamme, l'ingénierie de l'énergie nucléaire, etc. Avec la transformation et la modernisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de l'industrie manufacturière mondiale et l'essor des industries émergentes, la taille du marché des tiges en alliage de tungstène n'a cessé de croître, présentant des caractéristiques importantes telles que la croissance de la demande, l'agglomération régionale et des applications diversifiées.

9.2.1 Taille actuelle du marché mondial

- Selon les données publiées par l' Association **internationale** de l'industrie du tungstène (ITIA) et des instituts d'études de marché (tels que MarketsandMarkets et Grand View Research), la valeur marchande totale des alliages de tungstène dans le monde en 2024 s'élèverait à environ **1,3 à 1,5 milliard de dollars américains** , dont environ 30 % pour les tiges en alliage de tungstène, soit **400 à 500 millions de dollars américains** . On s'attend à ce que ce chiffre dépasse **800 millions de dollars américains d'ici 2030** .
- **Répartition régionale de la production et de la consommation**
 - **Chine** : Premier producteur et consommateur mondial de tiges en alliage de tungstène, avec une chaîne industrielle complète et des capacités de fabrication à grande échelle, représentant plus de 50 % du marché ;
 - **Amérique du Nord et Europe** : Principalement axé sur les applications haut de gamme, mettant l'accent sur la qualité et la performance, avec un ratio d'importation élevé ;
 - **Autres régions d'Asie-Pacifique** (comme la Corée du Sud, le Japon et l'Inde) : marchés émergents en croissance avec une forte orientation technologique et une demande des consommateurs en croissance rapide ;
 - **Moyen-Orient et Afrique** : actuellement limités en termes d'échelle, mais présentant un potentiel de croissance tiré par les investissements dans l'énergie nucléaire et les équipements médicaux.

9.2.2 Moteurs de croissance du marché

1. **Développement rapide de l'industrie manufacturière haut de gamme**
 - Avec le développement rapide d'industries telles que l'aérospatiale, les systèmes de missiles et les instruments de haute précision, la demande de tiges en alliage de tungstène à haute densité et à haute résistance continue de croître ;
 - Le développement de la fabrication intelligente, des systèmes d'armes avancés et des nouvelles technologies énergétiques a encore stimulé la demande du marché en alliages de tungstène.
2. **Expansion des applications dans les domaines médical et nucléaire**
 - Les tiges en alliage de tungstène sont largement utilisées dans les équipements de radiothérapie, le blindage contre les radiations, le gamma knife, etc., bénéficiant du vieillissement de la population mondiale et de l'augmentation des investissements médicaux ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La production d'énergie nucléaire et la recherche sur la fusion ont conduit à l'application de tiges en alliage de tungstène dans les domaines de l'absorption des neutrons et des composants à haute température.
3. **Promotion de la stratégie de sécurité et de la chaîne d'approvisionnement**
- Les pays renforcent leur contrôle sur les métaux stratégiques, augmentent la proportion de la fabrication locale et favorisent la diffusion de la capacité de production de tiges en alliage de tungstène vers des régions diversifiées ;
 - Bien que l'exploration mondiale de matériaux alternatifs se poursuive, il n'existe toujours pas de substitut équivalent à l'alliage de tungstène à court terme.
4. **Le progrès technologique augmente la valeur ajoutée des produits**
- Le développement de technologies telles que la nano-amélioration, le contrôle de haute pureté et la fabrication intelligente a continuellement amélioré les performances des tiges en alliage de tungstène et élargi davantage d'applications émergentes.

9.2.3 Prévisions de la tendance de croissance de l'industrie (2025-2030)

| années | Évaluation du marché mondial des tiges en alliage de tungstène (milliards USD) | Taux de croissance annuel composé (TCAC) |
|--------|--|--|
| 2025 | 5.2 | — |
| 2026 | 5.6 | 7,7% |
| 2027 | 6.1 | 8,0% |
| 2028 | 6.7 | 9,0% |
| 2029 | 7.4 | 10,0% |
| 2030 | 8.1 | 10,3% |

Remarque : Ces prévisions reposent sur l'hypothèse d'une hausse continue des investissements dans la fabrication haut de gamme et l'énergie nucléaire médicale. Si les prix des matières premières fluctuent ou si des avancées technologiques dans le domaine des matériaux alternatifs sont réalisées, la courbe de croissance pourrait être ajustée.

9.2.4 Caractéristiques du développement du marché

- **pour la mise à niveau du bas de gamme au haut de gamme,** on est passé des tiges en alliage de tungstène pour l'usinage traditionnel aux produits haut de gamme avec une densité élevée, une ténacité élevée, une résistance à la corrosion et d'excellentes performances à haute température.
- Bien que la Chine conserve une position dominante alors que **la concurrence régionale s'intensifie, l'Europe, les États-Unis et le Japon développent leurs** capacités locales de traitement des ressources en tungstène pour répondre aux défis de sécurité de la chaîne d'approvisionnement.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Des tendances écologiques et durables émergent.**

Le recyclage des ressources en tungstène est devenu un nouveau pôle de croissance, et la technologie et les politiques relatives aux tiges d'alliage de tungstène recyclées progressent rapidement.

9.2.5 Défis

- **Le prix des matières premières fluctue.**

Le prix du concentré de tungstène est fortement influencé par les limitations de ressources, les politiques de protection de l'environnement et les facteurs spéculatifs. La maîtrise des coûts est devenue un enjeu majeur pour les entreprises.

- **commerciales internationales**

, les restrictions à l'exportation, les blocages techniques, les enquêtes antidumping et d'autres problèmes commerciaux peuvent affecter la circulation transfrontalière des tiges en alliage de tungstène.

- **Obstacles techniques sur le marché haut de gamme :**

les tiges en alliage de tungstène nationales sont toujours confrontées à des lacunes de processus et à des barrières de certification dans certains domaines de haute technologie tels que l'aviation et l'énergie nucléaire.

résumé

Le marché des tiges en alliage de tungstène connaît une croissance rapide, bénéficiant du développement des secteurs mondial de la fabrication haut de gamme, de la médecine et de l'énergie. Il est également confronté à des défis tels que la dépendance aux matières premières, les progrès technologiques et les risques commerciaux. Au cours des prochaines années, grâce à la modernisation des capacités de production et à l'expansion des domaines d'application, le marché des tiges en alliage de tungstène poursuivra son expansion. Les entreprises du secteur doivent se concentrer sur trois axes majeurs : les produits haut de gamme, l'internationalisation et la transformation verte afin de saisir les opportunités stratégiques.

9.3 Grands fabricants et concurrence (Chine, Europe, Amérique, Japon et Corée du Sud)

L'industrie des barres en alliage de tungstène présente une double caractéristique : forte intensité technologique et dépendance aux ressources. Le marché mondial est principalement dominé par des pays riches en tungstène ou dotés de technologies de transformation de pointe, comme la Chine, l'Europe, les États-Unis, le Japon et la Corée du Sud. Les entreprises de différentes régions ont développé des différences marquées en termes de contrôle des ressources, de trajectoires technologiques, de positionnement produit et de stratégies de marché, qui constituent ensemble le modèle concurrentiel multipolaire actuel de l'industrie des barres en alliage de tungstène.

9.3.1 Entreprises chinoises : accent sur les avantages en matière de ressources et la production à grande échelle

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En tant que premier pays producteur de tungstène et centre de traitement du tungstène au monde, la Chine dispose d'une vaste base d'entreprises et d'une chaîne industrielle complète dans le domaine des tiges en alliage de tungstène. Les entreprises chinoises se distinguent par une grande capacité de production, une grande variété de produits et une maîtrise rigoureuse des coûts.

- **Sociétés représentatives**
 - **CTIA GROUP LTD**, un contrôle fort sur les ressources et de fortes capacités de soutien de la chaîne industrielle.
- **Avantage concurrentiel**
 - Taux élevé d'autosuffisance en matières premières pour assurer un approvisionnement stable ;
 - Forte capacité de contrôle des coûts et prix des produits compétitifs ;
 - Répondez rapidement aux besoins de personnalisation des clients et au cycle de livraison court.
- **Goulot d'étranglement du développement**
 - Il existe encore un écart entre la Chine et l'Europe, les États-Unis et le Japon en termes de traitement de haute précision et de contrôle des performances extrêmes ;
 - L'influence sur le marché international est relativement limitée et la construction d'un système de certification haut de gamme est toujours en cours.

9.3.2 Entreprises européennes et américaines : les barrières technologiques et les applications haut de gamme dominant

Les entreprises européennes et américaines sont depuis longtemps très actives dans le développement d'alliages hautes performances. Fortes de leurs atouts technologiques dans les domaines de la métallurgie des poudres, des alliages haute température, des matériaux pour l'énergie nucléaire, etc., elles occupent une position dominante dans le domaine des applications haut de gamme des tiges en alliage de tungstène.

- **Sociétés représentatives**
 - **Plansee Group (Autriche)** : un producteur mondial de premier plan d'alliages de tungstène et de molybdène, dont les produits sont largement utilisés dans l'aviation, les semi-conducteurs et les dispositifs médicaux ;
 - **HC Starck Tungsten (Allemagne/États-Unis)** : se concentre sur le tungstène de haute pureté et les alliages de tungstène haute performance, et maîtrise les technologies avancées de métallurgie des poudres et de contrôle de l'atmosphère ;
 - **Global Tungsten & Powders Corp (GTP, USA)** : Elle dispose d'une technologie mature dans la préparation de poudre de tungstène de haute pureté et de tiges d'alliage et dispose d'un réseau de vente mondial.
- **Avantage concurrentiel**
 - Nous disposons d'une vaste expérience technique et possédons une série de brevets indépendants et de technologies de base ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- A passé avec succès des systèmes de certification haut de gamme tels que AS9100 et NADCAP, et est entré dans les chaînes d'approvisionnement de l'aviation et de l'armée ;
- L'effet de marque est fort et il fournit des services stables aux clients haut de gamme en Europe et aux États-Unis.
- **Défis et tendances**
 - Coût élevé, long cycle de livraison et faible compétitivité sur les marchés milieu et bas de gamme ;
 - Face à la pression des réglementations environnementales et à la hausse des coûts de l'énergie, certaines capacités de production sont transférées vers l'Europe de l'Est ou l'Asie du Sud-Est.

9.3.3 Entreprises japonaises et coréennes : portées par l'usinage de précision et les applications électroniques

Les entreprises japonaises et coréennes disposent d'avantages uniques dans le traitement ultra-précis et le contrôle de haute pureté des tiges en alliage de tungstène, et leurs produits sont largement utilisés dans la microélectronique, le traitement médical et les instruments de précision.

- **Sociétés représentatives**
 - **Mitsui Mining & Smelting** : Développement d'une variété d'alliages de tungstène renforcés à grains fins pour servir les industries de l'emballage électronique et de la médecine ;
 - **Tosoh du Japon** : a accumulé une technologie dans le traitement fin de la poudre de tungstène et le développement d'alliages à haute densité ;
 - **HEMC Co., Ltd. de Corée du Sud** : se concentre sur la production personnalisée de tiges en alliage de tungstène de haute précision et de pièces de forme spéciale, avec de solides capacités de R&D et de réponse rapide.
- **Points forts techniques**
 - Capacité exceptionnelle dans la préparation de matériaux de haute pureté ;
 - Leader dans le contrôle de la microstructure et la nano-amélioration ;
 - traitement par lots et stable de pièces complexes en alliage de tungstène de petite taille.
- **Positionnement sur le marché**
 - Ciblant les marchés de milieu et haut de gamme tels que l'électronique, les appareils d'affichage et les composants laser ;
 - Le prix unitaire du produit est élevé, la capacité de service est forte et il gagne en qualité et en technologie.

9.3.4 Résumé du paysage et des tendances de la concurrence mondiale

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| zone | Caractéristiques de l'entreprise | Niveau technique | Positionnement sur le marché | Avantages | Inconvénients |
|--------------------|--|---|--|---|--|
| Chine | Production axée sur les ressources et à grande échelle | Le milieu de gamme et le haut de gamme cohabitent | Se concentrer sur le milieu de gamme, percer vers le haut de gamme | Faible coût et approvisionnement stable | Système de certification haut de gamme insuffisant |
| Europe et Amérique | Axé sur la technologie et leader de la marque | Leadership haut de gamme | Aviation, militaire, médical | Une technologie puissante et des normes parfaites | Coût élevé et prix élevé |
| japonais et coréen | Précision + Personnalisation | Haute pureté et finesse | Applications électroniques et médicales | Haute précision de traitement | Petite capacité de production |

résumé

Le marché mondial des barres en alliage de tungstène présente un paysage concurrentiel marqué par la domination de la Chine sur le marché des capacités de production, l'Europe et les États-Unis sur le marché haut de gamme, tandis que le Japon et la Corée du Sud sont fortement impliqués dans la précision. À l'avenir, avec le développement de nouvelles technologies de matériaux, le renforcement de la tendance à la localisation de la chaîne d'approvisionnement et l'intensification de la concurrence sur le marché haut de gamme, les entreprises de diverses régions continueront d'optimiser leur positionnement stratégique. Si les entreprises chinoises souhaitent passer de grandes entreprises à des entreprises performantes, elles devront poursuivre leurs efforts sur la conception des matériaux, l'usinage de précision et les systèmes de certification. Les entreprises européennes et américaines devront faire face à la pression des coûts et à la restructuration de leur chaîne d'approvisionnement, tout en conservant leur leadership technologique. Les entreprises japonaises et coréennes continueront d'approfondir leurs segments de marché et de préserver leur avantage sur les produits à forte valeur ajoutée.

9.4 Analyse des fluctuations des prix des matières premières et de la structure des coûts

Le prix des tiges en alliage de tungstène dépend fortement du prix des matières premières, notamment des fluctuations de prix du concentré de tungstène, de la poudre de tungstène et des éléments d'alliage (tels que Ni, Fe, Cu), qui ont un impact profond sur la stabilité et la rentabilité de l'ensemble de la chaîne industrielle. Les réserves mondiales de tungstène sont limitées, le marché est très concentré et, sous l'influence de l'offre et de la demande, des politiques, de la protection de l'environnement et de la géopolitique, son prix connaît des fluctuations cycliques.

Structure des tiges en alliage de tungstène

Les tiges en alliage de tungstène sont principalement composées des éléments suivants :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Catégorie de coût | Proportion (plage de référence) | illustrer |
|---|---------------------------------|---|
| Coût de la matière première du tungstène | 50%~65% | Y compris le concentré de tungstène, le paratungstate d'ammonium (APT), la poudre de tungstène, etc., les fluctuations de prix ont le plus grand impact sur le coût total |
| Coût des éléments d'alliage | 10%~15% | Comme pour le Ni, le Fe et le Cu, la fluctuation des prix est plus faible que celle du tungstène mais reste volatile |
| Énergie et matières auxiliaires | 8%~12% | L'électricité, l'hydrogène, le gaz protecteur, les matériaux de moulage, etc. sont affectés par la structure de consommation énergétique et les politiques régionales. |
| Coûts de main-d'œuvre et de gestion | 5%~10% | Y compris les salaires, le loyer de l'usine, les frais administratifs, etc. |
| Coûts d'équipement et d'amortissement | 3% à 5% | Grands équipements de frittage et de pressage et leurs coûts de maintenance |
| Coûts de la protection de l'environnement et de la sécurité | 2% à 5% | En Chine et dans l'UE notamment, les investissements dans la protection de l'environnement continuent d'augmenter |

Remarque : La structure des coûts varie en fonction du processus, de l'origine, de l'échelle de production et des spécifications du produit.

9.4.2 Tendance de fluctuation des prix des matières premières du tungstène

Le tungstène est influencé par de nombreux facteurs complexes. Voici les fluctuations de prix des principales matières premières du tungstène ces dernières années :

(1) Tendance des prix du concentré de tungstène (WO₃ ≥ 65 %)

- **2020– 2022** : Le prix se stabilisera autour de **95 000 à 110 000 RMB la tonne** ;
- **2022-2023** : Affecté par le boom des investissements dans les nouvelles énergies, l'offre restreinte et les restrictions en matière de protection de l'environnement, le prix monte à **plus de 125 000 yuans/ tonne** ;
- **2024** : Sous l'influence de la réglementation de la politique intérieure et du ralentissement économique mondial, les prix vont baisser et fluctuer entre **113 000 et 120 000 yuans la tonne** .

(2) Prix de l'APT (paratungstate d'ammonium) et de la poudre de tungstène

- **175 000 à 190 000 RMB la tonne** à la mi- 2024 ;
- La stabilité du prix de la poudre de tungstène est légèrement faible. En raison de l'influence considérable de la technologie de traitement et des spécifications granulométriques, le prix fluctue souvent entre **240 000 et 280 000 yuans la tonne** .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) Prix des éléments d'alliage

- Les prix du nickel (Ni) connaissent de fortes fluctuations. Sous l'influence des nouvelles industries énergétiques et de l'acier inoxydable, ils ont dépassé **200 000 yuans/tonne en 2023**, avant de se stabiliser en 2024.
- Les prix du cuivre (Cu) et du fer (Fe) fluctuent relativement peu, mais sont néanmoins affectés dans une certaine mesure par les changements de la situation du commerce international.

9.4.3 Impact des fluctuations des matières premières sur les opérations commerciales

| Dimension d'impact | Manifestations spécifiques |
|--|--|
| Le contrôle des coûts devient plus difficile | les matières premières en tungstène ont réduit les bénéfices bruts, en particulier pour les petites et moyennes entreprises |
| Fluctuations fréquentes des prix | Le cycle d'achat des clients en aval ne correspond pas à la fluctuation des prix des matières premières, ce qui augmente l'incertitude des commandes |
| Les risques liés aux stocks et aux stratégies d'approvisionnement augmentent | Le blocage du prix des matières premières à l'avance peut entraîner une inadéquation des prix, affectant ainsi les flux de trésorerie et la valeur des stocks. |
| Différenciation de conductivité | Les entreprises leaders peuvent répercuter la pression sur les coûts par le biais de primes technologiques, tandis que les petites entreprises ont un faible pouvoir de négociation. |

9.4.4 Stratégies de réponse et jugement de tendance

(1) Construction d'un mécanisme de verrouillage des prix et de couverture

- Les entreprises peuvent utiliser des contrats à terme ou des accords à long terme pour bloquer les prix d'achat des matières premières ;
- Renforcer la coopération avec les fournisseurs de ressources et établir des canaux d'approvisionnement stables.

(2) Optimisation de la structure du produit et transformation à haute valeur ajoutée

- Améliorer la marge bénéficiaire brute de l'unité en développant des tiges en alliage de tungstène avec des propriétés spéciales telles qu'une résistance élevée et une résistance aux températures élevées ;
- Protection contre les fluctuations des coûts des matières premières grâce à la différenciation des processus.

(3) Renforcer la conservation de l'énergie et le contrôle des coûts dans le processus de production

- Réduire la consommation d'énergie spécifique grâce à des procédés d'économie d'énergie tels que le pressage isostatique et le frittage laser ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Mettre en œuvre une gestion de production allégée pour améliorer le taux de rendement et le taux d'utilisation des matières premières.

(4) Recyclage vert et utilisation d'alliage de tungstène recyclé

- Mettre en place un système de recyclage des matériaux en tungstène et développer une technologie de poudre de tungstène recyclée ;
- Le coût du tungstène recyclé est nettement inférieur à celui de l'extraction du minerai, ce qui en fait un moyen important de réduire les coûts à l'avenir.

résumé

La production de barres en alliage de tungstène est extrêmement sensible aux prix des matières premières, notamment aux fluctuations de prix de la poudre de tungstène et des éléments d'alliage, qui affectent directement la rentabilité des entreprises. Dans un contexte de stratégie mondiale des ressources, de politiques environnementales plus strictes et de croissance continue des applications haut de gamme, de fortes fluctuations des coûts des matières premières pourraient devenir la norme. À l'avenir, les entreprises devront renforcer leurs capacités de gestion des risques, faire face à la pression des coûts et parvenir à un développement durable grâce à des stratégies diversifiées en matière de matières premières, des produits haut de gamme et une fabrication écologique.

9.5 Interprétation de la politique industrielle et de la situation des exportations

En tant que métal rare à haute teneur technologique et à forte valeur ajoutée, les tiges en alliage de tungstène sont fortement impactées par les politiques industrielles et les contrôles internationaux à l'exportation. Dans le contexte de la « stratégie mondiale des ressources » et de la « localisation des chaînes d'approvisionnement », les gouvernements de divers pays ont mis en place des politiques adaptées pour garantir la sécurité de leurs chaînes d'approvisionnement en matériaux clés et renforcer la surveillance commerciale des métaux clés. Les entreprises doivent appréhender avec précision l'évolution des politiques dans un souci de conformité afin d'améliorer leur résistance aux risques et leur compétitivité mondiale.

9.5.1 Orientation politique de l'industrie chinoise du tungstène

(1) Protection des ressources et contrôle de la quantité totale

- Le tungstène est répertorié comme un minéral clé protégé par l'État, et un contrôle total obligatoire de la production est mis en œuvre ;
- Depuis 2002, le plan de contrôle du volume total d'exploitation minière a été mis en œuvre pour les mines de tungstène, et la production obligatoire de concentré de tungstène (teneur en WO₃ 65 %) en 2024 est d'environ **110 000 tonnes** ;
- Le pays contrôle strictement l'exploitation minière illégale et réprime le commerce illégal des ressources.

(2) Modernisation industrielle et transformation verte

- Le « Plan de développement de l'industrie des métaux rares » et les « Lignes directrices pour le développement de l'industrie des nouveaux matériaux » encouragent la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

transformation des ressources en tungstène en alliages hautes performances, en matériaux structurels avancés et en matériaux fonctionnels ;

- de produits haut de gamme tels que la métallurgie des poudres, les alliages à haute densité et les matériaux composites à base de tungstène, et éliminer la forte pollution et la capacité de production inefficace ;
- Améliorer les avancées technologiques et les capacités de localisation des équipements dans le domaine des alliages de tungstène, et former une chaîne complète de « ressources-produits-applications ».

(3) Politiques de gestion et de restriction des exportations

- Les tiges en alliage de tungstène et leurs matériaux de base sont des produits sensibles figurant sur la « Liste de contrôle des exportations d'articles et de technologies à double usage » et nécessitent une licence d'exportation conformément à la loi ;
- Le Ministère du Commerce et l'Administration Générale des Douanes supervisent conjointement et les entreprises exportatrices doivent disposer des qualifications et des systèmes de gestion pertinents ;
- Il est interdit de se soustraire au contrôle des exportations en dissimulant des déclarations ou en modifiant le nom d'un produit par l'intermédiaire d'un tiers. Les contrevenants s'exposent à des amendes et au gel des autorisations d'exportation.

9.5.2 Évolution de l'environnement international des exportations

(1) Renforcement du « contrôle à double sens » entre l'Europe et les États-Unis

- Les États-Unis et l'Europe ont inclus les alliages de tungstène dans la liste des « minéraux critiques » ou « matériaux stratégiques » et ont renforcé le contrôle des produits de tungstène importés ;
- Imposer certaines restrictions commerciales aux produits chinois en tungstène (y compris les tiges en alliage de tungstène), y compris des exigences de traçabilité technique et un examen du double usage ;
- Les États-Unis accordent la priorité à l'achat de certains produits militaires en tungstène auprès de fournisseurs nationaux ou de « pays amis », ce qui constitue une barrière technique.

(2) Les marchés japonais et coréen sont relativement ouverts mais présentent des barrières à l'entrée élevées

- La Corée du Sud et le Japon ont des exigences extrêmement élevées en termes d'examen technique et de normes de performance des produits, en particulier dans les applications de haute précision telles que le médical, l'électronique et les semi-conducteurs, et proposent des seuils techniques tels que la personnalisation et le contrôle de la microstructure pour les tiges en alliage de tungstène ;
- Les entreprises doivent passer les certifications ISO, JIS, MIL et d'autres séries de normes, ainsi que des processus stricts tels que les audits d'usine des clients et la vérification de la stabilité des lots.

(3) Le potentiel de marché des pays situés le long de l'initiative « Ceinture et Route » augmente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- L'expansion de la construction d'infrastructures et des investissements énergétiques dans les pays situés le long de la « Ceinture et la Route » tels que l'Asie centrale, le Moyen-Orient et l'Europe de l'Est a créé de nouvelles demandes de contreponds à haute densité et de produits en alliage de tungstène de protection contre les radiations ;
- Les politiques aident les entreprises à explorer les marchés émergents grâce à des outils tels que l'assurance-crédit à l'exportation, le règlement transfrontalier en RMB et les accords fiscaux.

9.5.3 Situation des exportations et prévention et contrôle des risques

| Principaux types de risques | Explication et contre-mesures |
|---|---|
| Les frictions commerciales s'intensifient | Pour faire face aux potentielles « enquêtes antidumping » et aux politiques de « discrimination du pays d'origine » sur des marchés comme les États-Unis, il est possible d'adopter une différenciation des produits et un schéma d'évitement (comme le commerce de réexportation). |
| Restrictions du seuil de certification | Accélérer la mise en place de capacités de certification de systèmes de normes internationales, telles que AS9100 (aérospatiale), NADCAP (traitement thermique), etc., pour entrer dans la chaîne d'approvisionnement haut de gamme |
| Retards dans l'approbation des exportations | L'allongement du cycle de licence d'exportation peut avoir des répercussions sur les livraisons. Il est recommandé aux entreprises de planifier à l'avance le cycle de dédouanement et d'améliorer leurs capacités internes de préparation à la conformité. |
| volatilité géopolitique | Diversifier les marchés clients pour éviter une dépendance excessive à un seul pays ; renforcer la collaboration avec les partenaires locaux pour diversifier les risques |

9.5.4 Recommandations politiques et stratégies de réponse des entreprises

1. Renforcer les mécanismes de suivi des politiques et d'alerte précoce.

Les entreprises devraient mettre en place des équipes permanentes chargées de suivre l'évolution des politiques publiées par la Commission nationale du développement et de la réforme, le ministère du Commerce, les douanes et les associations industrielles internationales, et de s'adapter proactivement aux changements réglementaires.

2. Construire un système d'exportation conforme et des capacités de gestion des qualifications

- Demander les qualifications nécessaires telles que « licence d'article à double usage » et « certificat d'enregistrement d'exportation » ;
- Mettre en place un système de traçabilité des produits et un mécanisme d'archivage complet des documents de déclaration douanière.

3. Participer activement à l'élaboration de normes internationales

et, conjointement avec les institutions de recherche scientifique, participer à la formulation de nouvelles normes ISO/ASTM pour renforcer la voix internationale et améliorer la construction du système de qualité des produits.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Développer des marchés internationaux diversifiés

- Cultiver en profondeur une clientèle haut de gamme en Europe, en Amérique et au Japon ;
- Parallèlement, nous développerons les marchés émergents tels que le Moyen-Orient, l'Inde et l'Asie du Sud-Est afin de réduire le risque de concentration géopolitique.

résumé

En tant que matériau stratégique, la situation des exportations de tiges en alliage de tungstène est profondément influencée par les orientations politiques et les fluctuations environnementales internationales. La Chine met en œuvre une stratégie de contrôle des ressources et de transformation à forte valeur ajoutée, l'Europe et les États-Unis renforcent les barrières technologiques et commerciales, et le Japon et la Corée du Sud encadrent l'entrée de produits par des certifications technologiques. Les entreprises doivent comprendre et s'adapter précisément à ces logiques politiques, et établir leur propre avantage concurrentiel international en améliorant le contenu technique, en perfectionnant les systèmes de conformité et en élargissant les marchés.

9.6 Prévission de la demande future de tiges en alliage de tungstène dans la fabrication haut de gamme

Alors que l'industrie manufacturière mondiale s'oriente vers une nouvelle ère de haute performance, de légèreté, d'intelligence et d'écologie, des normes plus strictes et des exigences diversifiées en matière de matériaux sont imposées. Les tiges en alliage de tungstène sont devenues un matériau essentiel dans des secteurs manufacturiers haut de gamme tels que l'aérospatiale, l'énergie nucléaire, l'industrie militaire et l'électronique médicale, grâce à leur excellente densité, leur point de fusion élevé, leurs excellentes propriétés mécaniques, leur résistance aux radiations et leur stabilité thermique. À l'avenir, la modernisation de ces industries continuera de stimuler la demande de tiges en alliage de tungstène, les exigences de performance et la diversité des applications.

9.6.1 Aperçu des tendances de développement de la fabrication haut de gamme

| Direction de l'industrie | Tendance de développement | Exigences relatives aux tiges en alliage de tungstène |
|----------------------------|---|--|
| Aérospatial | Évoluer vers un rapport poussée/poids plus élevé et une résistance à la charge plus forte | Pièces structurelles à densité élevée + ténacité élevée + inertie contrôlable |
| Armes hypersoniques | Vol à grande vitesse + environnement de choc à haute température | Résistance aux chocs thermiques + Stabilité thermique + Résistance à la fatigue par cavitation |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | |
|---|---|--|
| Fusion/fission nucléaire | Températures extrêmes + forte intensité de rayonnement | Résistance aux radiations + résistance aux hautes températures + absorption des neutrons |
| Équipement médical | Miniaturisation et précision | Haute densité + aptitude au traitement + biocompatibilité des matériaux |
| Semi-conducteurs et emballage électronique | Densité de puissance élevée + défis de gestion thermique | Conductivité thermique + Résistance de l'emballage + Structure de petite précision |
| Machines de précision et robotique | Composants personnalisés à contrôle dynamique élevé + inertie | Capacité de contrôle de haute densité + précision géométrique |

9.6.2 Prévision de la demande future dans des domaines clés

(1) Composants aérospatiaux et de contrôle inertiel

- Avec le développement accéléré des **constellations de satellites**, **fusées réutilisables** et **avions commerciaux**, la demande de tiges en alliage de tungstène pour les contrepoids et les pièces de contrôle inertiel a considérablement augmenté ;
- La nouvelle génération d'avions impose des exigences plus élevées en matière de précision dimensionnelle, de résistance mécanique et de fiabilité des matériaux ;
- On estime que d'ici 2030, le taux de croissance annuel moyen de la demande de tiges en alliage de tungstène dans le domaine aérospatial sera de **10 à 12 %** .

(2) Ingénierie de l'énergie nucléaire et de l'énergie de fusion

- les matériaux en tungstène dans les projets de fusion nucléaire tels qu'ITER et CFETR continuent de s'approfondir, et l'application de tiges en alliage de tungstène dans les structures de blindage contre les radiations et de barres de contrôle continue de s'étendre ;
- La quatrième génération de réacteurs à fission (réacteurs à neutrons rapides, réacteurs à sels fondus) répertorie également les alliages de tungstène comme candidats pour les matériaux de structure ;
- La Chine, l'Union européenne, les États-Unis, le Japon et d'autres pays ont tous lancé des projets visant à développer des matériaux nucléaires à base de tungstène ;
- D'ici 2035, le taux de croissance annuel composé des tiges en alliage de tungstène dans le domaine de l'énergie nucléaire devrait rester **supérieur à 13 %** .

(3) Équipement médical haut de gamme

- Les tiges en alliage de tungstène médical sont utilisées dans les **accélérateurs de radiothérapie**, **couteaux à rayons gamma**, **structures de protection des sources de rayonnement**, etc.
- Le vieillissement de la population et la croissance rapide de la demande d'équipements de traitement du cancer ;
- En particulier dans le domaine des **tiges de tungstène médical à haute densité et à faible impureté**, les entreprises chinoises accélèrent la percée des barrières standard européennes et américaines ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- On prévoit que le marché mondial des tiges en alliage de tungstène médical atteindra **plus de 300 millions de dollars américains d'ici 2030**.

(4) Fabrication intelligente et machines-outils haut de gamme

- Les contrepoids d'outils à grande vitesse et à haute inertie, les montages d'outillage automatisés, etc. utilisent progressivement des alliages de tungstène à haute densité pour remplacer l'acier traditionnel ;
- les tiges en alliage de tungstène pour machines-outils CNC et composants de broche de haute précision sont devenues un nouveau point de croissance ;
- La demande en Asie (Chine, Japon et Corée du Sud) est particulièrement importante, avec un taux de croissance estimé de **8 à 10 % au cours des cinq prochaines années**.

(5) Défense nationale et systèmes d'armes hypersoniques

- À mesure que les armes tactiques évoluent vers une pénétration à grande vitesse, un réglage des chenilles et une miniaturisation, les tiges en alliage de tungstène sont de plus en plus utilisées dans les noyaux de balles, les compartiments de queue équilibrés, etc.
- pour **les projectiles perforants et les armes cinétiques**, l'accent sera mis sur la mise à niveau vers des matériaux nano-renforcés, à haute densité et à haute ténacité ;
- Les tiges en alliage de tungstène de qualité militaire devraient maintenir un taux de croissance annuel moyen de **8 à 9 %**.

9.6.3 Tendances en matière de technologies de performance

| Indicateurs de performance | Orientation du développement | Exemple de parcours technologique |
|--|---|---|
| Précision du contrôle de la gravité spécifique | À $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ | Pressage de cibles + formage par extrusion CNC |
| Résistance aux chocs thermiques | Choc de gradient thermique dépassant 1000°C | Ajout de particules céramiques composites ZrC / La_2O_3 |
| Uniformité de la microstructure | La granulométrie est contrôlée à $5 \mu\text{m}$ près | Nanopoudre + frittage sous vide |
| Précision du traitement | $\phi \pm 0,005 \text{ mm}$, surface $\text{Ra} < 0,1 \mu\text{m}$ | Densification des grains fins + broyage superfine |
| Résistance aux radiations | Amélioration de l'absorption des neutrons et de la protection contre les rayonnements gamma | Revêtement/co-frittage B/C et autres éléments |

9.6.4 Suggestions de développement d'entreprise et conception prospective

1. **La structure du produit évolue vers une personnalisation haute performance et** développe des séries de produits pour différentes applications, telles que : les séries de contrepoids inertiels aérospatiaux, les séries de blindage de radiothérapie médicale, les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

séries de dissipation thermique des semi-conducteurs, etc., pour améliorer la fidélité des clients.

2. **Établir un système de certification client haut de gamme,**
planifier à l'avance les systèmes de qualité AS9100, ISO13485, MIL et autres, et élargir la base de clientèle mondiale de fabrication haut de gamme.
3. **L'investissement dans des systèmes de fabrication écologiques et recyclables**
prend le recyclage de la poudre d'alliage de tungstène, le frittage vert et la technologie à faible émission de carbone comme point d'appui pour créer de nouveaux avantages dans la future chaîne d'approvisionnement.
4. **En adoptant la fabrication intelligente et la surveillance numérique,**
nous introduisons le concept de l'Industrie 4.0, réalisons une surveillance numérique et basée sur les données tout au long du processus de préparation des matériaux et améliorons la cohérence et le rendement.

résumé

Les tiges en alliage de tungstène ouvriront de nouvelles perspectives de développement au cours de la prochaine décennie, avec des produits haut de gamme, segmentés et mondialisés. Les secteurs de l'aérospatiale, de la fusion nucléaire, de la protection médicale, de la fabrication de précision et de la défense continueront d'être les principaux moteurs de leur demande. Seuls des efforts continus en matière d'innovation matérielle, de système qualité, d'expansion du marché et de modernisation technologique permettront aux entreprises de prendre l'initiative du développement dans cette vague de fabrication haut de gamme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

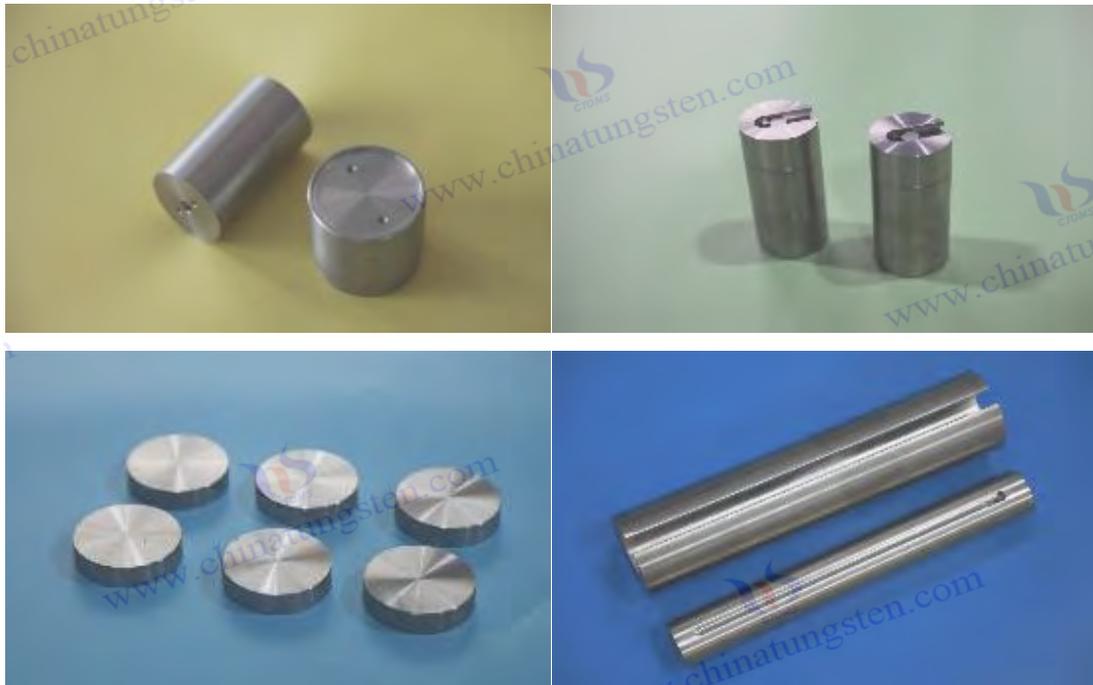
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



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



Chapitre 10 Points chauds de recherche et technologies de pointe des tiges en alliage de tungstène

10.1 Étude du processus de densification des tiges en alliage de tungstène à haute densité

La densification des tiges en alliage de tungstène a une influence déterminante sur leurs propriétés mécaniques, leur conductivité thermique, leur résistance à la corrosion et leur durée de vie. L'obtention de tiges en alliage de tungstène **proches de la densité théorique (> 98,5 %), voire proches de la densité maximale**, constitue un axe de recherche majeur dans le domaine actuel de l'ingénierie des matériaux et de la métallurgie des poudres. La qualité du processus de densification détermine directement l'intégrité structurelle, l'uniformité de la microstructure et la fiabilité du produit dans les applications haut de gamme (telles que les pièces structurales pour la fusion nucléaire, les pièces d'équilibrage de missiles et les dissipateurs thermiques électroniques haute puissance).

10.1.1 Principes de base et exigences d'indice de densification

La densification fait référence au processus dans lequel les pores entre les particules sont progressivement fermés, les interfaces des particules sont liées et les grains sont efficacement empilés et diffusés en appliquant de la température, de la pression ou un autre apport d'énergie au compact de poudre.

Indicateurs clés :

- Masse volumique apparente $\geq 18,5 \text{ g/cm}^3$ (teneur en W > 90 % de l'alliage)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Porosité $\leq 1,5\%$
- Aucune inclusion, fissure ou zone de concentration de pores évidente
- La granulométrie peut être contrôlée en dessous de 20 μm

10.1.2 Technologie traditionnelle de densification par frittage

(1) Frittage sous vide conventionnel

- Température de processus typique : 1450–1550 °C
- Applicable aux systèmes W-Ni-Fe, W-Ni-Cu
- Avantages : technologie mature, adaptée à la production en série
- Inconvénients : Les pores sont difficiles à drainer complètement et une phase liquide est nécessaire pour favoriser la densification

(2) Frittage assisté en phase liquide

- La formation d'une phase liquide critique par Ni ou Cu favorise le réarrangement des particules à la température de frittage
- Peut améliorer l'uniformité des tissus et la capacité de liaison
- Il existe des risques de « ségrégation de phase liquide » et de « croissance des grains », et le rapport de phase liquide doit être strictement contrôlé.

(3) Frittage multi-étapes et frittage différé

- Le chauffage en plusieurs étapes ou le maintien de différentes zones de température pendant un certain temps permet d'évacuer et de contrôler la taille des grains
- Particulièrement efficace pour les poudres ultrafines ou les nanopoudres

10.1.3 Chemin technologique de densification avancée

(1) Pressage isostatique à chaud (HIP)

- Appliquer une pression de gaz isotrope (100–200 MPa) à haute température pour provoquer l'effondrement des micropores internes
- Peut augmenter la densité jusqu'à $> 99,5\%$
- Inconvénients : Équipement coûteux, cycle long, adapté au post-traitement de pièces haut de gamme

(2) Frittage par plasma d'étincelles (SPS)

- Densification rapide par impulsion de courant élevé + pression axiale
- Vitesse de chauffage rapide (jusqu'à 100°C/min) et temps de frittage court (quelques minutes)
- Peut maintenir les nano-grains et inhiber la croissance excessive
- Inconvénients : La taille du produit est limitée par le moule, convient aux petits matériaux de grande valeur

(3) Frittage par micro-ondes

- Utilisation de l'absorption des micro-ondes par le tungstène pour obtenir un chauffage interne uniforme

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Efficacité thermique élevée et taux de densification rapide, mais les problèmes d'arc et de points chauds doivent être résolus

(4) Densification assistée par laser

- tiges en alliage de tungstène avec des structures de forme spéciale ou des structures composites multicouches.
- La technologie est encore au stade de la recherche et de l'expérimentation, et l'industrialisation nécessite de nouvelles avancées.

10.1.4 Effet des facteurs matériels sur la densification

- **Taille des particules de poudre** : Plus la taille des particules est petite (en particulier $< 1 \mu\text{m}$), plus la température de densification est basse et plus la vitesse est rapide, mais une croissance anormale du col de frittage est plus susceptible de se produire ;
- **Morphologie de la poudre** : La poudre sphérique est plus facile à densifier, tandis que la poudre feuilletée ou anguleuse est plus susceptible de former une agrégation de vides lors du frittage ;
- **Impuretés et teneur en oxygène** : Les impuretés telles que Si, O et C ont tendance à former des couches intermédiaires ou des secondes phases à l'interface, entravant le processus de densification ;
- **Répartition des éléments d'alliage** : Une répartition uniforme de Ni/Cu peut optimiser le chemin de diffusion de la phase liquide et améliorer la densité.

10.1.5 Mécanismes microscopiques de densification

- **Mécanisme de diffusion** : La diffusion en masse et la diffusion aux joints de grains sont dominantes, et l'ajout d'éléments actifs (tels que La et Zr) peut favoriser la diffusion à courte portée ;
- **Théorie du réarrangement des particules** : En présence de phase liquide, les particules tendent vers la configuration d'énergie minimale, formant une structure d'empilement dense ;
- **Migration et contraction des pores** : les petits pores se rassemblent vers les grands pores, ou se ferment sous l'action du couplage thermomécanique pour former un corps dense complet ;
- **Inhibition de la croissance des grains** : Contrôlez la vitesse de chauffage et ajoutez des inhibiteurs de joint de grains (tels que des oxydes de terres rares) pour maintenir une structure à grains fins.

10.1.6 Exemples d'application et progrès de la recherche

- **Institut de recherche sur les métaux, Académie chinoise des sciences** : Utilisation du SPS pour obtenir une densité d'alliage W-5Ni-2Fe de 99,4 % et une taille de grain moyenne de $6,2 \mu\text{m}$;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Plansee , Autriche** : La technologie commerciale de forgeage isotherme HIP+ est appliquée aux tiges de tungstène haute densité destinées à l'aérospatiale, avec une porosité inférieure à 0,3 % ;
- **Chine Tungstène High- Tech** : Développement d'un processus de densification composite en phase liquide et micro-ondes pour permettre à la densité de la tige W-Ni-Cu d'atteindre plus de 18,9 g/cm³, ce qui est largement utilisé dans les noyaux de projectiles militaires.

10.1.7 Tendances et défis du développement futur

| Orientation du développement | Parcours technique | défi |
|---|---|--|
| Densification de poudre à l'échelle nanométrique | Frittage ultra-rapide et frittage à froid | L'agglomération de poudre et l'inhibition de l'oxydation sont difficiles |
| Densification de tiges en alliage de tungstène de grande taille | Combinaison HIP + forgeage à chaud à plusieurs étages | Contrôle des contraintes thermiques, contrôle des coûts |
| Conception de structure composite dense | Poudre à noyau-enveloppe, matériaux à structure à gradient | Précision du processus et limites de capacité des équipements |
| Surveillance intelligente du processus de frittage | Évaluation de la densité en ligne + contrôle de rétroaction | Il est difficile d'intégrer la technologie de perception et les algorithmes d'IA |

résumé

Les tiges en alliage de tungstène haute densité sont un système complexe d'ingénierie des matériaux intégrant l'ingénierie des poudres, le contrôle thermodynamique, la physique des interfaces et les technologies de traitement. À l'avenir, grâce à **l'amélioration continue de la demande d'applications haut de gamme, à l'évolution constante de la technologie de densification et à l'intégration approfondie de concepts de fabrication intelligents**, le processus de densification des tiges en alliage de tungstène évoluera vers la précision, l'écologie et la personnalisation.

10.2 Fabrication intelligente et ligne de production automatisée de tiges en alliage de tungstène

Alors que l'industrie manufacturière mondiale évolue vers le haut de gamme, l'intelligence et l'écologie, la production de barres en alliage de tungstène passe progressivement du modèle traditionnel de production de masse à la **fabrication intelligente**. L'introduction de technologies de fabrication de nouvelle génération, telles que les systèmes cyberphysiques (CPS), l'Internet industriel des objets (IIoT), l'intelligence artificielle (IA) et les jumeaux numériques, a permis de créer des usines intelligentes **hautement automatisées, offrant une qualité constante et une**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

grande réactivité. Ces technologies constituent désormais l'orientation stratégique principale des entreprises de matériaux de tungstène de pointe.

10.2.1 Nécessité d'une fabrication intelligente de tiges en alliage de tungstène

| Conducteurs | illustrer |
|--|---|
| Spécifications de produits diversifiées | la demande de produits personnalisés avec différentes tailles, compositions d'alliages et structures organisationnelles augmente |
| Pression sur les coûts et l'efficacité | L'augmentation des coûts de main-d'œuvre, le contrôle de la consommation d'énergie et les fluctuations de qualité entraînent des défis de production |
| Exigences de stabilité de la qualité | L'aviation, l'énergie nucléaire, la médecine et d'autres domaines ont des exigences extrêmement élevées en matière de cohérence des lots |
| Pression de conformité et de traçabilité | Les systèmes de certification internationaux exigent une traçabilité complète des processus et des enregistrements complets des données de production |
| Exigences en matière de sécurité et de protection de l'environnement | Les procédés de fabrication de poudre sont inflammables et explosifs, l'automatisation contribue à améliorer les niveaux de sécurité |

10.2.2 Modules clés de la ligne de production de fabrication intelligente

Les lignes de production intelligentes de tiges en alliage de tungstène couvrent généralement la chaîne de processus complète depuis **la préparation de la poudre → le formage → le frittage → le traitement thermique → le traitement → les tests et l'emballage**, intégrant des équipements d'automatisation et des systèmes d'information pour obtenir un contrôle collaboratif de bout en bout.

(1) Système automatique de mélange et de mélange de poudre

- Contrôler avec précision la proportion de diverses poudres à base de tungstène et d'éléments ajoutés ;
- Équipé d'une balance automatique, d'un système d'alimentation sous vide, d'un broyeur à boulets fermé et d'un système de séchage ;
- Coopérer avec le système MES pour réaliser la gestion des données de formule et de lot.

(2) Unité de pressage intelligente (moulage/pressage isostatique)

- Moulage : Presse automatique avec système hydraulique servo et contrôle de position en boucle fermée ;
- Pressage isostatique : Système de contrôle intelligent de l'autoclave avec préréglage à distance et gestion des courbes de processus ;
- Réaliser l'intégration du chargement-pressage-démoulage automatique.

(3) Ligne automatique de frittage et de contrôle d'atmosphère

- Four à vide ou four à hydrogène à contrôle automatique de la température et du gaz ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Équipé d'un système de transport de matériaux à crémaillère de type piste pour réaliser un frittage continu ;
- Planification à distance des paramètres du processus et surveillance de la qualité de l'atmosphère en temps réel (analyse en ligne de la teneur en O₂ et H₂) .

(4) Contrôle intégré du traitement thermique et de la densification

- Équipé d'un système de chargement et de déchargement automatique par pressage isostatique à chaud (HIP) ;
- Coopérer avec un processus de forgeage ou d'extrusion à haute température pour former une capacité de traitement d'organisation uniforme et à haute densité ;
- Les courbes de température et de pression sont contrôlées automatiquement et les enregistrements de données de processus sont téléchargés vers le cloud.

(5) Système d'usinage CNC et de test en ligne

- Les tours CNC, les rectifieuses et les lignes de polissage sont connectés au système MES ;
- L'instrument de vision CCD et de mesure du diamètre laser surveille l'écart de taille en temps réel ;
- Les paramètres d'usinage sont automatiquement ajustés pour prendre en charge l'usinage adaptatif.

(6) Emballage et étiquetage automatiques

- La ligne d'emballage intelligente réalise le vide, le remplissage de dessiccant et la configuration du tampon anti-vibration ;
- Système d'impression automatique d'étiquettes et de traçabilité par code-barres/QR code + RFID.

10.2.3 Digitalisation et soutien aux systèmes d'information

| Type de système | Fonction |
|---|--|
| MES (Système d'exécution de la fabrication) | Réaliser la gestion de la planification de la production, la planification des équipements, la traçabilité des lots et le suivi de l'exécution des processus |
| Système SCADA | Collecte en temps réel de paramètres clés tels que la température, l'atmosphère, la pression, le courant, etc. et affichage visuel |
| SMQ (Système de gestion de la qualité) | Mettre en place un processus de contrôle qualité complet pour obtenir un avertissement de défaut et un contrôle statistique des processus (SPC) |
| Liaison avec le système ERP | Intégrer les commandes, l'approvisionnement, l'inventaire et la fabrication pour former une gestion en boucle fermée |
| Moteur de prise de décision assistée par l'IA | Analysez plusieurs lots de données, optimisez les paramètres et améliorez le taux de réussite du premier coup |
| Système de jumeau numérique | Construire un modèle de production virtuel pour réaliser l'optimisation des processus, la maintenance prédictive des équipements et la simulation |

10.2.4 Goulots d'étranglement actuels et orientations futures

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Principaux défis | Performance | Orientation du développement |
|--|--|--|
| Seuil de coût élevé | L'investissement initial dans les équipements d'automatisation est important | Production à grande échelle + soutien gouvernemental + investissement progressif |
| Faible adaptabilité aux pièces de forme spéciale | La plupart des équipements existants sont des spécifications de barre standard | Développer des unités intelligentes modulaires pour s'adapter au traitement multi-formes |
| Silos de systèmes de données | Interfaces incohérentes entre les systèmes d'information | Promouvoir les normes ouvertes et l'unification des protocoles industriels (tels que OPC UA) |
| Collaboration homme-machine insuffisante | L'intervention humaine est toujours nécessaire dans les liens clés | Renforcer la collaboration homme-machine et la fabrication intégrée en réalité virtuelle |

10.2.5 Perspectives des tendances technologiques futures

- Déploiement de l'informatique de pointe et de l'IA en périphérie** : déployez des terminaux intelligents d'IA dans les liens de processus clés pour obtenir une surveillance en temps réel des périphériques, un auto-ajustement des paramètres et une prédiction de l'état des équipements.
- Analyse de fusion de données multi-sources** : Fusion de plusieurs données de capteurs telles que des images, de l'acoustique, de l'imagerie thermique, des vibrations, etc. pour obtenir un jugement complet de la qualité du produit et de la localisation des défauts.
- Système de fabrication à faible émission de carbone et de suivi de l'empreinte carbone** : Évaluer les émissions de carbone des tiges en alliage de tungstène tout au long de leur cycle de vie et établir un système d'évaluation de la fabrication verte.
- Fabrication en cloud et réseau collaboratif flexible** : grâce à l'Internet industriel 5G+, les ressources de fabrication en amont et en aval sont connectées pour réaliser une planification de production collaborative multi-usines et une configuration de processus à distance.

résumé

La fabrication de tiges en alliage de tungstène se trouve à un stade critique de transition, passant d'une automatisation partielle à une intelligence complète des procédés. À l'avenir, grâce à la numérisation poussée des paramètres clés des procédés, à l'amélioration des capacités d'intelligence des équipements et à l'interconnexion et l'intégration des systèmes de gestion, la fabrication de tiges en alliage de tungstène connaîtra progressivement une transformation fondamentale, passant d'une approche axée sur l'expérience à une approche axée sur les données, et propulsera l'ensemble de l'industrie des matériaux métalliques haute performance vers une nouvelle ère d'intelligence.

Développement intégré de tiges en alliage de tungstène et fabrication additive

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Avec l'application accélérée de la technologie de fabrication additive dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'énergie nucléaire, de l'armée et de la médecine, les alliages traditionnels hautes performances sont confrontés à de nouveaux défis : formes complexes, organisation sur mesure et fabrication efficace. L'alliage de tungstène, matériau structurel et fonctionnel soumis à des conditions extrêmes, s'intègre progressivement dans **le système de matériaux des composants de précision pouvant être fabriqués de manière additive**. Les tiges en alliage de tungstène ne sont pas seulement utilisées comme source de matériaux de base pour l'impression (fils, poudres), mais sont également progressivement intégrées à la fabrication additive, entrant dans divers scénarios d'application, tels que **l'impression directe de pièces fonctionnelles et la fabrication mixte de moules et de pièces métallurgiques**.

Valeur technique des matériaux en alliage de tungstène adaptés à la fabrication additive

| caractéristiques | Demande de fabrication additive | Avantages correspondants de l'alliage de tungstène |
|---|---|--|
| Point de fusion très élevé | Procédé de fusion à chaud > 3000 °C | Les alliages à base de tungstène sont résistants à la chaleur et à la corrosion, ce qui les rend adaptés à l'impression de pièces dans des champs thermiques extrêmes. |
| Haute densité | Contrepoids fonctionnel, structure de radioprotection | AM peut imprimer des contrepoids/structures creuses complexes pour obtenir des résultats légers |
| Protection contre les radiations | Applications de la fusion nucléaire et des équipements médicaux | Pièces structurelles d'absorption de neutrons personnalisables pour améliorer l'intégration |
| Conductivité thermique | Dissipateur thermique, buse, refroidissement par microcanaux | La fabrication additive permet la fabrication de canaux de refroidissement très complexes |
| Organisation contrôlable | Optimisation de la microstructure | La fabrication additive permet un contrôle directionnel de la solidification et du gradient de composition |

10.3.2 Types de procédés de fabrication additive applicables aux alliages de tungstène

(1) Fusion laser sur lit de poudre (LPBF)

- Principe : Le laser fait fondre la poudre métallique couche par couche et la refroidit et la solidifie rapidement ;
- Avantages : Haute précision d'impression, capable de réaliser des microstructures complexes ;
- Poudre appropriée : poudre d'alliage sphérique W, W-Ni-Fe, W-Cu ;
- Défi : Un point de fusion élevé entraîne une faible efficacité d'absorption laser et une forte tendance aux fissures.

(2) Fusion par faisceau d'électrons (EBM)

- Principe : Utiliser un faisceau d'électrons à haute densité énergétique pour faire fondre la poudre de tungstène ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Convient aux métaux à point de fusion élevé, tels que le tungstène pur ou l'alliage W-Ta ;
- Il présente les avantages d'un environnement sous vide et d'une faible teneur en oxygène ;
- Utilisé dans les composants à haute température tels que les buses des systèmes de propulsion aérospatiale.

(3) Dépôt d'énergie dirigé (DED)

- Principe : Alimentation synchrone en poudre ou en fil + source laser/faisceau d'électrons/plasma ;
- Structures en alliage de tungstène de grande taille pouvant atteindre une forme quasi nette ;
- Convient pour la reconstruction, la réparation et l'épaississement des segments de tige en alliage de tungstène et des pièces à haute température.

(4) Fabrication de filaments fondus (édition métal FDM) + frittage par déliantage

- Utiliser de la poudre métallique + un liant polymère pour le moulage par extrusion ;
- Après l'impression, un dégraissage et un frittage sont effectués pour obtenir une structure dense ;
- Les alliages de tungstène ont le potentiel de produire de petites pièces personnalisées à faible coût ;
- Il a été commercialisé pour être utilisé dans les appareils à micro-ondes W-Cu, les contrepoids, etc.

10.3.3 Principales difficultés techniques de la fabrication additive d'alliages de tungstène

| question | Performance | Stratégies d'adaptation |
|--|--|--|
| Les matériaux à point de fusion élevé sont difficiles à fondre | Énergie laser insuffisante ou contrôle difficile du bain de fusion | Augmenter la puissance du laser, utiliser un substrat préchauffé |
| Sensible à l'oxydation des poudres | Des inclusions d'oxydation ou des pores se forment facilement lors de l'impression | Utiliser un système de protection à l'argon de haute pureté / d'impression sous vide |
| Fissures thermiques et contraintes résiduelles | Un refroidissement rapide provoque la formation de fissures | Utilisez une plate-forme préchauffée et un chemin de numérisation optimisé |
| Mauvaise fluidité du matériau | Accumulation inégale de poudre et bain de fusion instable | Modification de la sphéroïdisation des poudres, utilisation de poudres mélangées de taille égale |
| ségrégation des composants | Le point de fusion du W est très différent de celui des éléments d'alliage | Prémélange homogène par mécanosynthèse |

10.3.4 Exemples d'application et progrès de la recherche

- **NASA et ORNL :**
La technologie DED a été utilisée pour imprimer des modules de buses en tungstène pur,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

qui ont été utilisés avec succès dans des tests de poussée à haute température ; des pièces structurelles en alliage W-Re ont été développées pour les tests de propulsion thermique nucléaire.

- **Institut de recherche sur les métaux, Académie chinoise des sciences :**
Grâce à l'impression LPBF de l'alliage W-5Ni, la densité a atteint plus de 97 % après optimisation des paramètres laser, la microstructure était uniforme et la suppression des fissures était bonne.
- **Institut Fraunhofer, Allemagne :**
Procédé d'impression LPBF de poudre W-Cu établi pour l'emballage électronique à flux thermique élevé et réalisation réussie d'une structure de dissipateur thermique à microcanaux intégrée.
- **Université de technologie de Tomsk, Russie :**
Exploration de la voie d'impression 3D de l'alliage W-Mo-Ta pour la recherche sur les matériaux des parois intérieures des conteneurs à plasma haute température.

Modèle de développement de couplage des tiges en alliage de tungstène et de la fabrication additive

| modèle | décrire | Valeur de l'application |
|--|---|--|
| Fabrication composite additive et soustractive | Les tiges en alliage de tungstène sont préfabriquées en ébauches brutes, puis la fabrication additive est utilisée pour obtenir une amélioration de la microstructure ou un revêtement fonctionnel. | Réduire les coûts et améliorer les performances |
| Fabrication additive d'outillage | Moules complexes fabriqués par AM pour le pressage de poudre inversé de tiges | Convient pour la production en série de barres de formes spéciales |
| Impression par alimentation tige → fil → fil | Des tiges en alliage de tungstène de haute pureté sont étirées et utilisées pour l'impression DED de composants de grande taille | Établir une chaîne complète de matériaux et de processus |
| Modification des performances de la tige | Impression de couches fonctionnelles locales (couche anti-oxydation, agent à libération lente, etc.) sur la surface des tiges de tungstène | Améliorer la fonction et la durée de vie du service |
| Évolution des pièces structurelles des jumeaux numériques | Utilisation de la fabrication additive pour réaliser des pièces structurelles à gradient de densité, telles que des tiges de réglage d'inertie et des tiges d'absorption d'énergie | Réaliser une conception de contrôle des performances directionnelles |

10.3.6 Tendances de développement futures et suggestions de voies

1. **Construisez un système spécial de poudre AM en alliage de tungstène**
pour développer une poudre d'alliage de tungstène avec une distribution granulométrique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimisée, une sphéricité élevée, une faible teneur en oxygène et une forte fluidité, et favorisez la normalisation.

2. **Les mises à niveau des équipements et des sources d'énergie**

comprennent le développement d'équipements laser/faisceau d'électrons à densité d'énergie plus élevée et de plates-formes de contrôle intelligentes pour s'adapter à l'impression de matériaux à base de tungstène.

3. **Le contrôle et la simulation des tissus à plusieurs échelles**

introduisent une simulation de couplage de contraintes thermiques et un algorithme d'inversion des paramètres de processus pour obtenir un contrôle précis de la cartographie composition-structure-performance.

4. **La production de masse et la vérification des composants haut de gamme**

sont passées d'une production d'essai en une seule pièce à une cohérence à grande échelle, et un système standard de test de formage, de traitement thermique a été établi pour s'adapter à l'aérospatiale, à l'énergie nucléaire, aux équipements médicaux et à d'autres domaines.

5. **La ligne de production intégrée d'alliage de tungstène-AM**

construit une « usine d'impression » intégrée à partir de la préparation de la matière première de la tige d'alliage de tungstène - production de poudre sphéroïdisée - formage d'impression - post-traitement - test, améliorant le contrôle de l'ensemble du processus.

résumé

L'alliage de tungstène et la fabrication additive offrent des possibilités sans précédent pour résoudre les problèmes de traitement traditionnels et réaliser la fabrication de composants complexes. Grâce à l'amélioration continue de l'adaptation des matériaux, des capacités des équipements et des normes de procédés, les tiges en alliage de tungstène ne seront plus de simples produits finis, mais deviendront également le matériau de base, le composant principal et le vecteur technologique composite de l'impression 3D, permettant à l'industrie métallurgique d'entrer dans une nouvelle ère d'intelligence, de fonctionnalité et de précision.

10.4 Comparaison et voies techniques des matériaux alternatifs aux alliages à hautes performances

Avec le développement de nouvelles technologies de matériaux, les alliages de tungstène sont confrontés à la concurrence et à la substitution de nombreux nouveaux alliages hautes performances dans certains scénarios d'application. Dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'énergie nucléaire, de la dissipation thermique électronique et des structures haute température, notamment, les exigences multidimensionnelles des clients en matière de performances des matériaux ne cessent de croître, obligeant les alliages de tungstène à poursuivre leur évolution vers des matériaux plus légers, plus solides, plus résistants aux hautes températures et plus respectueux de l'environnement.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dans le même temps, une variété de matériaux alternatifs avec des « fonctions similaires » ou des « avantages évidents en termes de rapport coût-efficacité » accélèrent l'industrialisation, ce qui a un impact profond sur la structure du marché des alliages de tungstène.

10.4.1 Principaux avantages et limites de performance de l'alliage de tungstène

| Dimension de performance | Avantages | Limites |
|---|--|--|
| densité | Extrêmement élevé (19,3 g/cm ³), irremplaçable dans les contrepoids, les protections et les systèmes inertiels | La forte densité entraîne des difficultés de traitement et des coûts de transport |
| Point de fusion et stabilité thermique | Point de fusion jusqu'à 3422°C, adapté aux environnements à températures extrêmement élevées | Le traitement et le soudage à haute température sont difficiles et la contrainte thermique est importante |
| Résistance aux radiations | Excellentes performances d'absorption des neutrons et de protection contre les rayons gamma | Le support d'une couche protectrice est toujours nécessaire dans les environnements nucléaires hautement corrosifs |
| Conductivité thermique | Deuxième seulement après le cuivre et l'argent, adapté à la structure de dissipateur thermique/dissipation thermique | Il est difficile d'équilibrer la conductivité thermique et la résistance à l'oxydation |
| Usinabilité | Après alliage (comme W-Ni-Fe), il présente une certaine aptitude au traitement | Le tungstène pur ou les alliages à forte teneur en tungstène sont encore difficiles à traiter |
| Garantie de prix et de ressources | La Chine dispose de réserves de ressources abondantes et d'un approvisionnement stable | Le tungstène de haute pureté est cher et difficile à traiter |

10.4.2 Analyse comparative des matériaux alternatifs hautes performances typiques

| Matériel | Point de fusion/densité | Avantages typiques | limitation | Chevauchement des applications |
|---------------------------------------|--|---|---|--|
| Alliage de molybdène (Mo) | ~2620°C / 10,3 g/cm ³ | Léger, bonne conductivité thermique, excellente formabilité | Faible résistance à la corrosion, résistance à la température inférieure à celle du tungstène | Électrodes haute température, feuilles conductrices thermiques, structures électroniques de dissipation de chaleur |
| Alliage de tantale (Ta) | ~3017°C / 16,6 g/cm ³ | Résistance à la corrosion, bonne ductilité | Des ressources coûteuses et rares | Matériaux pour réacteurs nucléaires, matériaux biocompatibles |
| Alliage à haute entropie (HEA) | Point de fusion variable / densité moyenne | Contrôle multi-niveaux, résistance à | Processus complexe, étape de R&D | Composants et pièces structurelles pour l'aviation |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | | | |
|--|--------------------------|---|---|--|
| | | la corrosion/haute résistance | | |
| Composites à matrice céramique (CMC) | >2000°C / faible densité | Résistance aux hautes températures et légèreté | Fragile, faible résistance aux chocs | Buses aérospatiales, structures d'isolation thermique |
| Matériau composite tungstène-cuivre (W-Cu) | Densité élevée/moyenne | Forte conductivité thermique, résistance à l'arc, résistance aux chocs thermiques | Coût élevé, résistance moyenne | Électrodes de soudage par points, modules de dissipateur thermique |
| Matériaux à base de carbone (C/C, graphite) | Élevé/Très léger | Extrêmement léger, résistant aux chocs thermiques et à l'ablation | Facile à oxyder, pas résistant à la corrosion | Buse, isolation du missile |

10.4.3 Stratégie de différenciation de l'alliage de tungstène sous tendance de substitution

1. Stratégie d'application de segmentation fonctionnelle :

- Il reste irremplaçable dans les situations nécessitant une densité et des performances inertielles extrêmement élevées (systèmes de navigation inertielle, masselottes d'équilibrage dynamiques) ;
- Dans les expériences d'énergie nucléaire et de physique des hautes énergies, sa capacité d'absorption des neutrons est supérieure à celle des autres métaux et présente l'avantage d'une stabilité à long terme.

2. Améliorer la stratégie de limites de performance :

- Améliorez sa résistance aux hautes températures et sa résistance aux chocs grâce au renforcement des éléments de terres rares et à la technologie de densification des nanopoudres ;
- Développer des structures composites (telles que le bimétal tungstène/tantale, les composites de cuivre plaqué tungstène, etc.) pour élargir les domaines d'application multifonctionnels.

3. Stratégie de collaboration en matière de fabrication :

- avec la fabrication additive, l'usinage ultra-précis et la technologie de soudage par faisceau à haute énergie pour améliorer la faisabilité de structures complexes ;
- Combinez des matériaux différents (tels que des alliages de titane et des alliages à base de nickel) pour une fabrication collaborative multi-matériaux et une intégration fonctionnelle.

4. Protection de l'environnement vert et stratégie du cycle de vie complet :

- Mettre en place un système en boucle fermée de recyclage, de retraitement et de réutilisation pour répondre aux réglementations environnementales et aux exigences de durabilité des ressources ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Promouvoir des formules et des technologies de traitement à faible pollution conformes à la directive RoHS/REACH.

10.4.4 Comparaison complète : le statut de l'alliage de tungstène dans le futur système de matériaux

| Dimensions | Alliage de tungstène | Avantages et inconvénients des matériaux alternatifs | Stratégie de développement |
|--|------------------------|---|---|
| Protection haute densité | Des avantages évidents | Seuls le tantale et le cuivre tungstène peuvent le remplacer partiellement, mais le coût est plus élevé | Maintenir une position dominante |
| Pièces structurales à haute température | puissant | HEA, CMC, etc. sont compétitifs | Renforcer le système d'alliage et développer des matériaux composites |
| Dissipateur thermique et dissipation de la chaleur | Disponible | W-Cu et Mo sont plus avantageux | Chemin composite multi-matériaux |
| Structure de l'énergie nucléaire | excellent | Le tantale et le molybdène ont quelques applications | Revêtement de surface + alliage multicouche |
| Coût et protection de l'environnement | Inconvénients | Mo, C/C sont plus légers et moins chers | Mettre en place un système de fabrication écologique |

10.4.5 Recommandations de parcours technique et orientations de R&D

1. Optimisation des alliages multi-composants :

- Développer des systèmes ternaires/quaternaires tels que W-Mo-Re et W-Ta-Ni, en tenant compte de la résistance à haute température, de la ductilité et de la transformabilité.

2. Développement de matériaux composites :

- Concevez des structures composites tungstène/céramique, tungstène/métal et tungstène/graphite pour maximiser le renforcement de l'interface et les performances multifonctionnelles.

3. Construction d'une plateforme de processus avancés :

- Investissez dans LPBF, DED, HIP+forgeage, soudage par diffusion sous vide et d'autres plateformes pour explorer le formage collaboratif d'alliages de tungstène + matériaux alternatifs.

4. Mise en place d'une base de données de simulation et de fiabilité de services :

- Construire une plateforme de simulation de couplage multi-champs haute température-irradiation-corrosion pour évaluer la durée de vie et l'économie de nouveaux matériaux.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Stratégie de développement « Tungstène+ » :

- Lancement d'unités structurelles intégrées multifonctionnelles avec du tungstène comme noyau, telles que le « module d'inertie de tungstène » et le « bloc intégré de protection de dissipation thermique de tungstène ».

résumé

Bien que divers matériaux hautes performances exercent une pression potentielle sur les alliages de tungstène pour les remplacer, leurs principaux atouts en termes de densité, de protection contre les radiations et d'extrême adaptabilité environnementale leur permettront de conserver une place incontournable dans de nombreux domaines clés pendant longtemps. À l'avenir, nous devons nous concentrer sur la modernisation des matériaux et l'intégration de la fabrication, élaborer un modèle de développement « intégré irremplaçable et synergique » pour les alliages de tungstène et consolider davantage leur position stratégique dans la fabrication haut de gamme.

10.5 Évolution des performances des alliages de tungstène dans des conditions de service extrêmes dans le futur

Les alliages de tungstène sont utilisés depuis longtemps dans les composants de base en environnements extrêmes en raison de leur point de fusion extrêmement élevé, de leur densité élevée, de leur bonne conductivité thermique et de leur capacité d'absorption neutronique, notamment pour la première paroi des dispositifs de fusion nucléaire, les tuyères aérospatiales, les boucliers neutroniques des réacteurs et les structures de protection thermique des avions hypersoniques. Cependant, dans ces conditions de fonctionnement, le matériau est soumis à de fortes charges thermiques, à des contraintes thermiques importantes, à des dommages dus aux radiations, à l'érosion gazeuse et à **des effets de dégradation du couplage multi-champs**. Une compréhension approfondie de l'évolution des performances au cours de son utilisation est essentielle pour garantir la durabilité et la stabilité des pièces structurelles en alliage de tungstène.

10.5.1 Classification et caractéristiques des environnements de service extrêmes

| Type d'environnement | Paramètres caractéristiques | Scénarios d'application typiques |
|---|--|---|
| Choc thermique à haute température | >2000°C, flux thermique>10 MW/m ² | Buses aérospatiales, réchauffeurs à plasma et premier mur de fusion nucléaire |
| Champ d'irradiation puissant | Flux neutronique > 10 ²⁵ n/m ² avec rayonnement gamma | Réacteur de fission/fusion nucléaire |
| Impact élevé / Taux de déformation élevé | Ondes de choc, charges explosives, accélération inertielle | Corps perforant balistique, contrepoids d'arme cinétique |
| Corrosion et oxydation chimiques | Atmosphère oxydante à haute température, liquide de refroidissement en métal | Etage de rentrée de l'avion, grand système de refroidissement |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | |
|--|---|---|
| Environnement de cycle thermique sous vide | Alternance fréquente de vide + contrainte thermique | Structure de la coque d'un vaisseau spatial, sonde d'exploration de l'espace lointain |
|--|---|---|

10.5.2 Mécanisme d'évolution de la microstructure et des performances

(1) Recristallisation à haute température et grossissement des grains

- Un service à long terme à haute température peut facilement entraîner une migration des limites des grains et une croissance des grains ;
- Cela conduit à une diminution de la résistance et à une mauvaise plasticité, en particulier pour les alliages de tungstène à grains fins ;
- peut être retardé par dopage (La_2O_3 , Y_2O_3) ou par une stratégie d'ancrage des joints de grains.

(2) Accumulation de dislocations et formation de bulles induites par l'irradiation

- L'irradiation par neutrons rapides produit des boucles de dislocations et des paires lacunes-interstitiels ;
- L'injection de gaz He/H conduit à la nanocavitation et même à des « chaînes de bulles » ;
- Cela entraînera une fragilisation du matériau, une diminution de la conductivité thermique et des changements dimensionnels (dilatation) ;
- Les solutions comprennent : la nanocrystallisation, la conception d'interface et la structure de barrière de dépôt d'He.

(3) Fatigue thermique et corrosion par choc thermique

- Le chauffage-refroidissement cyclique peut provoquer l'initiation et la propagation de fissures ;
- À haute densité de flux thermique ($> 20 \text{ MW/m}^2$), la surface du matériau est sujette à la « fissuration » ou à l'érosion ;
- Le prétraitement de surface (rugosité) et le revêtement fonctionnel (W-Re, W-TaC) peuvent améliorer la résistance aux chocs.

(4) Dégradation par oxydation et corrosion

- à haute température, le tungstène réagit facilement avec O_2 , H_2O , etc. pour générer WO_3 , ce qui augmente les pertes par évaporation ;
- Les liquides de refroidissement à base de métaux tels que PbLi ont une forte perméabilité aux joints de grains ;
- Le revêtement de surface dense et l'alliage inhibant l'oxydation sont les principales stratégies d'adaptation.

10.5.3 Comportement de dégradation des performances et modèle de prédiction de la durée de vie

| | | |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Comportement évolutif | Impact sur les performances | Approche de modélisation |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | |
|---|--|--|
| Recristallisation et croissance des grains | Réduire la résistance et la ténacité | Modèle de cinétique de croissance des grains |
| Croissance des fissures de fatigue thermique | Défaillance structurelle | Formule de Paris, modèle Coffin-Manson |
| Fragilisation par les radiations | Diminution de l'allongement et de la ténacité à la rupture | Théorie des taux + simulation MD |
| Évaporation oxydative | Perte de masse et dégradation de la conductivité thermique | Taux de réaction d'Arrhenius + modèle de couplage multi-champs |
| L'expansion de cavitation | Modifications dimensionnelles, distorsion structurelle | Modèle de dynamique de cluster |

10.5.4 Optimisation de l'adaptabilité dans des scénarios d'application typiques

● Première paroi en alliage de tungstène du réacteur de fusion (comme le projet ITER)

- Nécessite une résistance au flux neutronique $> 10^{26}$ n/m² et une stabilité élevée du flux thermique ;
- Développer des structures fonctionnelles à grains ultrafins en W, en alliages W-Re et en acier W/ ;
- Orientation de recherche : Contrôle des bulles, mécanisme d'auto-réparation des microfissures.

● Matériaux de pointe pour véhicules hypersoniques

- Le chauffage par emboutissage provoque des températures locales atteignant 2500°C+, entraînant un choc thermique sévère ;
- Des composites céramiques à base de W ou des structures renforcées de fibres de tungstène peuvent être utilisés ;
- Le système de revêtement doit être résistant à l'oxydation, avoir une transmittance de rayonnement élevée et une faible transmittance de rayonnement.

● Noyau perforant/projectile à énergie cinétique

- L'accélération de l'impact atteint $10^4 \sim 10^5$ g, provoquant un cisaillement et une déformation importants ;
- Les alliages W-Ni-Fe dopés sont conçus pour améliorer le contrôle du mode de fracture ;
- La résistance dynamique et la ténacité à la rupture sous des taux de déformation élevés doivent être examinées en détail.

● Diffuseurs/ blindeurs de radiothérapie médicale

- Nécessite un contrôle précis de la dose et une géométrie stable ;
- Les dimensions et les propriétés physiques doivent rester stables dans un environnement irradié/à température élevée ;
- Le traitement de surface et la réparation au laser peuvent prolonger la durée de vie.

10.5.5 Nouvelles stratégies d'optimisation des matériaux et de conception structurelle

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **Organisation des gradients et conception de structures multi-échelles**
 - Matériaux à gradient fonctionnel (FGM) qui offrent une résistance à la corrosion dans la couche superficielle, une résistance élevée dans la couche intermédiaire et une ténacité dans la couche centrale.
 - La fabrication additive + soudage par diffusion sont utilisés pour obtenir une « structure personnalisée ».
2. **Renforcement des interfaces et contrôle des joints de grains hétérogènes**
 - Des joints de grains à haute énergie sont introduits par pressage isostatique à chaud + processus de refroidissement rapide pour améliorer la résistance aux radiations ;
 - L'interface multiphasée agit comme un « piège » à cavitation He, ralentissant l'expansion et la fragilisation.
3. **Revêtements résistants aux radiations et systèmes auto-réparateurs**
 - Utiliser de fines couches de céramiques à point de fusion élevé telles que ZrC et HfN pour éviter l'oxydation/pénétration de surface ;
 - Développer des structures à petite échelle capables de s'auto-réparer dans des champs d'irradiation, tels que le dopage Bi et Cr.
4. **Prédiction de la dégradation des services basée sur l'IA**
 - Combinaison d'expériences à haut débit et d'apprentissage automatique pour prédire la dégradation des performances dans des conditions de travail complexes ;
 - Construire une « base de données à vie » d'alliages de tungstène et une plateforme de conception de matériaux numériques.

résumé

Les alliages de tungstène dans les environnements extrêmes du futur constituent un sujet de recherche transversal, multidisciplinaire et multi-échelles. Bien que les températures élevées, l'irradiation, les chocs thermiques et autres problématiques qu'ils posent posent de sérieux défis, la conception des matériaux, l'optimisation des procédés et la modélisation numérique permettent d'accroître en permanence leurs capacités de service extrême dans des domaines clés tels que l'énergie nucléaire, l'aérospatiale et la défense. Le développement futur des alliages de tungstène ne reposera plus sur le modèle traditionnel « matériau unique + service statique », mais évoluera vers un nouveau système de matériaux alliant « structure multi-échelle + adaptation dynamique + prédiction intelligente ».

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe

Annexe 1 : Résumé des paramètres techniques courants des tiges en alliage de tungstène

Cette annexe résume les principaux paramètres techniques des tiges en alliage de tungstène dans la production et les applications industrielles, couvrant la gamme de composition chimique, les indicateurs de performance physique, les paramètres de performance mécanique et les spécifications de taille, etc., pour référence dans le contrôle de la production et l'inspection de la qualité.

1. Composition chimique (plage de proportions typique)

| élément | Gamme de teneur (pourcentage massique) | Remarque |
|-----------------|--|--|
| Tungstène (W) | 85% – 98% | Les principaux composants déterminent la densité et la résistance |
| Nickel (Ni) | 0% – 10% | Phase liante, améliorant la ténacité et la formabilité |
| Fer (Fe) | 0% – 5% | Phase adhésive, améliorant les propriétés mécaniques |
| Cuivre (Cu) | 0% – 5% | Améliorer la conductivité thermique et la résistance à l'usure |
| Cobalt (Co) | 0% – 3% | Utilisé dans des formulations d'alliages spéciaux |
| Autres éléments | Tracer | Tels que le molybdène, le manganèse, le titane, le niobium et d'autres traces d'ajouts |

2. Indicateurs de performance physique

| performance | Plage numérique | Normes/méthodes de test |
|------------------------------------|---|-------------------------|
| densité | 17,0 – 18,8 g/cm ³ | ASTM B311, GB/T 3879 |
| proportion | 17,0 – 18,8 | Identique à ci-dessus |
| Point de fusion | ≈ 3400°C | — |
| Coefficient de dilatation linéaire | 4,5 – 6,0 × 10 ⁻⁶ / °C | ASTM E228 |
| Conductivité thermique | 70 – 180 W / m·K | ASTM E1461 |
| Résistivité | 1,5 – 5,0 μΩ·cm | ASTM B193 |
| magnétique | Faiblement magnétique ou non magnétique | — |

3. Paramètres des propriétés mécaniques

| performance | Plage numérique | Normes/méthodes de test |
|--|-----------------|-------------------------|
| Résistance à la traction (σ _b) | 400 – 1200 MPa | ASTM E8, GB/T 228.1 |
| Limite d'élasticité (σ _{0,2}) | 200 – 900 MPa | Identique à ci-dessus |
| Allongement (δ) | 1% – 25% | Identique à ci-dessus |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | |
|----------------------|-----------------|-----------|
| dureté | HV 200 – HV 500 | ASTM E384 |
| Résistance aux chocs | 10 – 80 J | ASTM E23 |

4. Dimensions et tolérances

| paramètre | Spécifications communes | Remarque |
|--------------------------|-------------------------|--|
| Gamme de diamètres | 3 mm – 150 mm | La gamme de produits personnalisés peut être plus large |
| Plage de longueur | 100 mm – 2000 mm | Peut être personnalisé selon les exigences du client |
| Tolérance dimensionnelle | ±0,01 mm – ±0,1 mm | Selon la technologie de traitement et les exigences du produit |
| Rugosité de surface | Ra 0,2 – 1,6 µm | En fonction du processus de polissage/meulage |
| Rectitude | ≤ 0,05 mm/m | Tiges de haute précision |

5. Spécifications et performances spéciales

| taper | illustrer |
|---|---|
| Tige en alliage de tungstène haute densité | Teneur en W > 95 %, utilisé pour les applications à contreponds élevé et à blindage élevé |
| Tige en alliage de tungstène à haute ténacité | Augmenter la teneur en Ni et Fe pour améliorer la résistance aux chocs et les performances de traitement |
| Tige composite en tungstène et cuivre | Contient du Cu > 5 %, en tenant compte à la fois de la conductivité thermique et de la résistance |
| Tige en alliage de tungstène traitée en surface | Nickelage, pulvérisation et traitement de couche d'oxyde pour améliorer la résistance à la corrosion et la durée de vie |
| Tige en alliage de tungstène renforcé de nanoparticules | Ajouter une phase de renforcement à l'échelle nanométrique pour améliorer les propriétés mécaniques et la stabilité |

6. Exemples de modèles de produits typiques

| modèle | Composition chimique (W-Ni-Fe) | Densité (g/cm³) | à la traction (MPa) | Principales applications |
|--------|--------------------------------|-----------------|---------------------|--|
| WG-90 | 90-6-4 | 17,8 | 900 | Contreponds d'aviation, industrie militaire |
| WG-95 | 95-3-2 | 18,5 | 700 | Protection nucléaire, équipements médicaux |
| WG-97 | 97-2-1 | 18,7 | 600 | Instruments haut de gamme, pièces de précision |

VII. Normes de référence

- ASTM B311 — Norme technique pour les tiges en tungstène et en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- GB/T 3879 — Spécifications générales pour les tiges en alliage de tungstène
- ISO 683-11 — Spécification technique pour les alliages de tungstène
- MIL-STD-1567 — Exigences de contrôle qualité pour les alliages de tungstène militaires

8. Remarques

- Les alliages de tungstène varient selon les fabricants. Le tableau des paramètres est une plage typique et n'est fourni qu'à titre indicatif.
- Les produits spécifiques doivent être personnalisés et optimisés en fonction des besoins du client et de l'environnement d'application.
- Pour garantir la qualité du produit, le processus de production doit contrôler strictement la pureté de la poudre, la densité et les conditions de traitement thermique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe 2 : Tableau comparatif des nuances d'alliages de tungstène et des compositions chimiques

Cette annexe résume les nuances d'alliages de tungstène courantes sur le marché et le système standard ainsi que leurs principales plages de composition chimique correspondantes, ce qui permet aux ingénieurs, aux acheteurs et au personnel de contrôle qualité de correspondre et de sélectionner rapidement.

1. Classification et composition des nuances courantes d'alliages de tungstène (pourcentage massique)

| Marque | W (Tungstène) | Ni (Nickel) | Fe (Fer) | Cu (cuivre) | Co (Cobalt) | Remarque |
|--------|------------------|----------------|-------------|----------------|----------------|--|
| WG-90 | 90,0±1 | 6,0 ± 0,5 | 4,0 ± 0,5 | ≤0,5 | — | Haute densité et haute résistance, couramment utilisé dans l'aérospatiale |
| WG-93 | 93,0 ± 1 | 4,0 ± 0,5 | 3,0 ± 0,5 | ≤0,5 | — | Haute résistance et ténacité, privilégié dans le domaine militaire |
| WG-95 | 95,0 ± 1 | 3,0 ± 0,3 | 2,0 ± 0,3 | ≤0,3 | — | Blindage des équipements nucléaires et électroniques |
| WG-97 | 97,0 ± 1 | 2,0 ± 0,3 | 1,0 ± 0,3 | ≤0,2 | — | Alliage de tungstène de haute pureté, application d'instruments de précision |
| WG-Cu5 | 92,0–95,0 | — | — | 5,0 ± 0,5 | — | de cuivre et de tungstène, conductivité thermique et résistance |
| WG-Co3 | 92,0–95,0 | — | — | — | 3,0 ± 0,3 | Alliage tungstène-cobalt, bonne résistance à l'usure et à la corrosion |

2. Comparaison des marques chinoises standard (GB/T)

| Marque GB/T | Teneur en tungstène (W) | Teneur en nickel (Ni) | Teneur en fer (Fe) | Teneur en cuivre (Cu) | Remarque |
|-------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--|
| GBW90 | 89,5–90,5 | 5,5–6,5 | 3,5–4,5 | ≤0,5 | Contrepoids aéronautique et industrie militaire |
| GBW93 | 92,5–93,5 | 3,5–4,5 | 2,5–3,5 | ≤0,5 | Alliage général à haute résistance et ténacité |
| GBW95 | 94,5–95,5 | 2,5–3,5 | 1,5–2,5 | ≤0,3 | Applications de l'énergie nucléaire et de la protection |
| GBW97 | 96,5–97,5 | 1,5–2,5 | 0,5–1,5 | ≤0,2 | Alliage de tungstène de haute pureté et de haute densité |

3. Correspondance des grades des normes américaines ASTM et MIL

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Grades ASTM/MIL | Teneur en tungstène (W) | Teneur en nickel (Ni) | Teneur en fer (Fe) | Teneur en cuivre (Cu) | Remarque |
|---------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|---|
| ASTM B386 WG90 | 89,5–90,5 | 5,5–6,5 | 3,5–4,5 | ≤0,5 | Grades courants pour l'aérospatiale |
| ASTM B386 WG93 | 92,5–93,5 | 3,5–4,5 | 2,5–3,5 | ≤0,5 | Applications militaires et à haute ténacité |
| MIL-W-24441 WG95 | 94,5–95,5 | 2,5–3,5 | 1,5–2,5 | ≤0,3 | Domaine de l'énergie nucléaire et de la radioprotection |

4. Nuances d'alliages de tungstène à fonctions spéciales

| Marque | Combinaison d'éléments principaux | Caractéristiques et utilisations |
|------------------------------|--------------------------------------|--|
| WG-Nano | W + Ni + Fe + nanoparticules | Renforcement en nanoparticules pour améliorer la ténacité et la résistance |
| WG-Haute résistance | W + rapport Ni/Fe élevé | Conception à haute ténacité, adaptée à la résistance aux chocs et aux charges dynamiques |
| WG-Haute teneur en cuivre | teneur élevée en W + Cu | Alliage de cuivre tungstène à haute conductivité thermique, dissipation de chaleur électronique et applications d'électrodes |
| WG-Co | haute teneur en W + Co | Excellente résistance à l'usure et à la corrosion, machines-outils et pièces haute température |

5. Remarques

- Les formulations des différents fabricants varient et la gamme de qualité réelle peut être légèrement ajustée ;
- Le numéro dans la nuance correspond généralement au pourcentage de teneur en tungstène, et le suffixe peut représenter l'élément d'alliage principal ou le procédé spécial ;
- Lors de la candidature, la sélection doit être effectuée de manière exhaustive en fonction des exigences de performance spécifiques et des limites du processus.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe 3 : Documents standard et index de référence sur les tiges en alliage de tungstène

Cette annexe rassemble les documents normatifs faisant autorité, les spécifications techniques et les principaux matériaux de référence dans le domaine des tiges en alliage de tungstène, qui sont pratiques à consulter et à appliquer pour les chercheurs scientifiques, les ingénieurs et le personnel de contrôle qualité.

1. Normes internationales et nationales

| Norme n° | Nom standard | Agence d'édition | Champ d'application |
|--------------|--|--|--|
| ASTM B311 | Spécification standard pour les barres et tiges en tungstène et en alliage de tungstène | ASTM International | Spécifications et exigences techniques des tiges de tungstène et d'alliages de tungstène |
| GB/T 3879 | Exigences techniques générales pour les tiges en alliage de tungstène | Administration nationale de normalisation de Chine | Propriétés physiques et mécaniques et méthodes d'essai des tiges en alliage de tungstène |
| ISO 683-11 | Aciers pour traitement thermique, aciers alliés et aciers de décolletage — Partie 11 : Alliages de tungstène | Organisation internationale de normalisation (ISO) | Spécifications techniques de l'alliage de tungstène |
| MIL-STD-1567 | Norme militaire pour le contrôle de la qualité des alliages de tungstène | Département de la Défense des États-Unis | Produits militaires en alliage de tungstène |
| YS/T 547 | Exigences techniques de l'alliage de tungstène à haute densité | Norme de l'industrie métallurgique chinoise | Normes techniques de l'industrie des tiges en alliage de tungstène |

3. Articles de revues majeures et actes de conférences

| Titre de l'article | auteur | Revue/Conférences | Publié | Axes de recherche |
|--|------------------|------------------------------------|--------|---|
| Comportement à haute température des alliages de tungstène | S. Zhang, Y. Liu | Journal des sciences des matériaux | 2022 | Propriétés à haute température et évolution de la microstructure de l'alliage de tungstène |
| Évolution de la microstructure des alliages W-Ni-Fe | M. Chen, X. Wang | Métallurgie des poudres | 2021 | Relation entre l'évolution de la microstructure et les propriétés mécaniques |
| Progrès dans les alliages de tungstène résistants aux radiations | J. Lee, H. Kim | matières nucléaires | 2023 | Mécanisme de dommages causés par les radiations et conception résistante aux radiations de l'alliage de tungstène |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | | | |
|--|----------------------|--|------|--|
| Développement d'alliages de tungstène à haute densité pour l'aérospatiale | L. Smith, D. Johnson | Conférence internationale sur l'aérospatiale | 2022 | alliage de tungstène dans l'aérospatiale |
|--|----------------------|--|------|--|

4. Rapports techniques et informations sur l'industrie

| Nom du matériau | Unité de libération | années | Résumé |
|--|--|--------|---|
| Spécifications techniques des tests de performance des matériaux en alliage de tungstène | Association chinoise de l'industrie du tungstène | 2021 | Propriétés physiques des alliages de tungstène, propriétés mécaniques et normes de méthodes d'essai |
| Rapport sur le processus de production et le contrôle qualité des tiges en alliage de tungstène | Une grande entreprise de fabrication d'alliages de tungstène | 2023 | Processus de préparation des tiges en alliage de tungstène et indicateurs clés de qualité |
| alliage de tungstène dans le domaine de l'énergie nucléaire | Centre national de recherche sur les technologies de l'énergie nucléaire | 2022 | alliage de tungstène dans les réacteurs nucléaires et les matériaux de protection |

5. Sites Web et bases de données de référence

- **Association internationale de l'industrie du tungstène (ITIA)**
<https://www.itia.info/> International Tungsten Industry Association, ressources en tungstène et tendances de l'industrie.
- **Base de données internationale sur les matériaux ASM**
<https://www.asminternational.org/> Base de données sur la science et l'ingénierie des matériaux, y compris les données sur les matériaux en alliage de tungstène.
- **Référentiel de données sur les matériaux du NIST**
<https://materialsdata.nist.gov/> Référentiel de données sur les matériaux du National Institute of Standards and Technology.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe 4 : Glossaire des alliages de tungstène et abréviations anglaises

Cette annexe rassemble les définitions et les explications des termes professionnels couramment utilisés et des abréviations anglaises associées dans le domaine des alliages de tungstène, dans le but d'aider les lecteurs à mieux comprendre le contenu technique et la littérature internationale.

1. Termes professionnels liés aux alliages de tungstène

| le terme | Interprétation |
|--|--|
| Alliage de tungstène | Un matériau en alliage à haute densité avec du tungstène comme composant principal et des métaux de liaison (tels que le nickel, le fer et le cuivre) ajoutés. |
| Métallurgie des poudres (PM) | Procédé de préparation de matériaux métalliques par des procédés de pressage de poudre et de frittage. |
| Frittage | Processus de combinaison de particules de poudre en un solide dense à haute température. |
| Densification | Processus de réduction de la porosité du matériau et d'augmentation de la densité par frittage, traitement thermique et autres procédés. |
| Traitement thermique | Processus de modification de la structure et des propriétés des matériaux par le chauffage, l'isolation et le refroidissement. |
| Microstructure | La morphologie des grains, la structure de phase et la distribution des défauts du matériau peuvent être observées au microscope. |
| Dureté | La capacité d'un matériau à résister à la déformation plastique locale est généralement exprimée par la dureté Rockwell et la dureté Vickers. |
| Résistance à la traction | La capacité d'un matériau à résister à une contrainte maximale sous une charge de traction. |
| Limite d'élasticité | La valeur de contrainte à laquelle un matériau commence à subir une déformation permanente. |
| Élongation | Capacité d'un matériau à se déformer plastiquement avant de se rompre, généralement exprimée en pourcentage. |
| Coefficient de dilatation thermique (CTE) | La proportion de changement dimensionnel provoquée par un changement d'unité de température d'un matériau. |
| Conductivité thermique | La capacité d'un matériau à conduire la chaleur, mesurée en $W/(m \cdot K)$. |
| Contrôles non destructifs (CND) | Méthodes de détection qui ne détruisent pas l'intégrité du matériau, telles que les tests par ultrasons et par rayons X. |
| Nanorenforcement | Technologie qui utilise des particules ou des structures à l'échelle nanométrique pour améliorer les propriétés mécaniques des matériaux. |
| Performance du service | Comment le matériau se comporte dans des conditions de travail réelles. |

2. Explication des abréviations anglaises courantes

| Abréviations | Nom et prénom | Interprétation |
|--------------|---------------|----------------|
| W | Tungstène | Tungstène |
| Ni | Nickel | nickel |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | |
|------------------|---|---|
| Fe | Fer | fer |
| Cu | Cuivre | cuiivre |
| Co | Cobalt | cobalt |
| Premier ministre | Métallurgie des poudres | Métallurgie des poudres |
| ASTM | Société américaine pour les essais et les matériaux | ASTM |
| GB/T | Guobiao (normes nationales chinoises) | Norme nationale chinoise |
| ISO | Organisation internationale de normalisation | Organisation internationale de normalisation |
| MIL | Norme militaire | Normes militaires |
| CND | Essais non destructifs | Essais non destructifs |
| CTE | Coefficient de dilatation thermique | Coefficient de dilatation linéaire |
| HT | Dureté Vickers | Dureté Vickers |
| SEM | Microscope électronique à balayage | Microscopie électronique à balayage |
| XRF | Fluorescence X | Spectroscopie de fluorescence X |
| ICP | Plasma à couplage inductif | Spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif |
| ONH | Oxygène, azote, hydrogène | Analyse de la teneur en oxygène, azote et hydrogène |
| MGF | Matériau à gradient fonctionnel | Matériaux à gradation fonctionnelle |
| MARYLAND | Dynamique moléculaire | Dynamique moléculaire |
| IA | Intelligence artificielle | IA |

3. Supplément aux termes couramment utilisés

| le terme | Interprétation |
|--|---|
| alliage lourd | Les matériaux en alliage ayant une densité plus élevée, généralement supérieure à 10 g/cm ³ , l'alliage de tungstène appartient à cette catégorie. |
| Phase adhésive | Phases métalliques à bas point de fusion telles que Ni et Fe utilisées pour connecter les particules de tungstène dans les alliages de tungstène. |
| Inadéquation de la dilatation thermique | Contrainte ou déformation causée par différents coefficients de dilatation thermique entre différents matériaux ou phases. |
| Microfissures | De minuscules fissures à l'intérieur ou à la surface d'un matériau peuvent entraîner une défaillance par fatigue. |
| Résistance aux chocs | La capacité d'un matériau à absorber de l'énergie lorsqu'il est soumis à des charges d'impact. |
| Rugosité de surface | La rugosité microscopique de la surface du matériau affecte les propriétés de frottement, de fatigue et de corrosion. |
| Distribution granulométrique | Caractéristiques de distribution statistique de la taille des particules dans les matériaux en poudre. |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Contrôle de l'atmosphère

Contrôle de la composition et de la pression du gaz ambiant lors du frittage ou du traitement thermique.


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatun

1


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

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

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

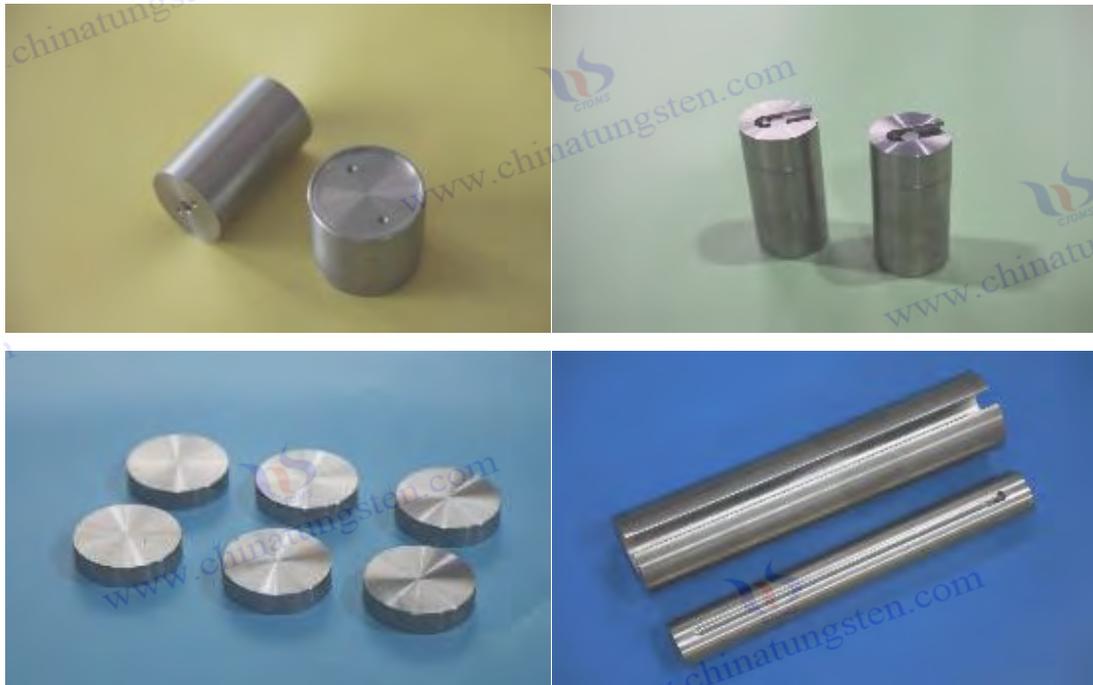
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



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