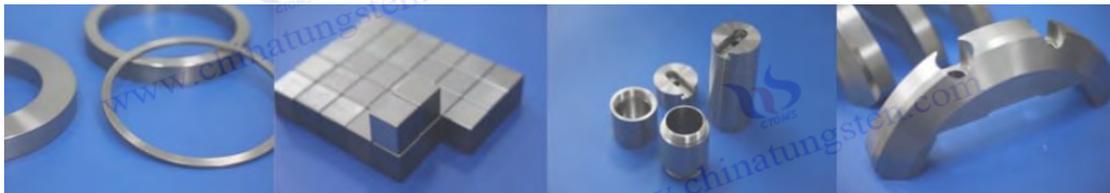


Encyclopédie des alliages lourds de tungstène

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 commerciale mondiale, devenant ainsi un fournisseur de solutions d'application complètes dans les domaines des produits chimiques à base de tungstène, des métaux tungstène, des carbures cémentés, des alliages haute densité, du molybdène et de ses alliages.

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

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

Forts de plus de 30 ans d'expérience dans le secteur, le Dr Hanns et son équipe 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

Chapitre 1 : Introduction

- 1.1 Définition et aperçu des alliages de tungstène à haute densité
- 1.2 Importance de la recherche et de l'application des alliages de tungstène à haute densité
- 1.3 Objectif et structure de ce livre

Chapitre 2 : Connaissances de base sur l'alliage de tungstène à densité élevée

- 2.1 Propriétés chimiques et physiques des alliages de tungstène à haute densité
- 2.2 Développement historique des alliages de tungstène à haute densité
- 2.3 Comparaison des alliages de tungstène à haute densité avec d'autres matériaux
- 2.4 Classification des alliages de tungstène lourds
 - 2.4.1 Classification basée sur la composition (W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, W-Ni-Fe-Co, etc.)
 - 2.4.2 Classification basée sur la densité et les propriétés mécaniques (Classe 1 ~ Classe 4)
 - 2.4.3 Classification basée sur l'usage (militaire, aérospatial, médical, industriel, etc.)

Chapitre 3 : Analyse des performances de l'alliage de tungstène à haute teneur en carbone

- 3.1 Propriétés mécaniques de l'alliage de tungstène haute densité
- 3.2 Propriétés physiques de l'alliage de tungstène haute densité
- 3.3 Principaux éléments et leurs fonctions des alliages de tungstène lourds
- 3.4 Résistance à la corrosion et à l'usure des alliages de tungstène lourds
- 3.5 Capacité de protection contre les radiations des alliages de tungstène lourds
- 3.6 Méthodes d'optimisation des performances des alliages de tungstène lourds

Chapitre 4 : Technologie de préparation de l'alliage de tungstène à densité élevée

- 4.1 Sélection et prétraitement des matières premières en alliage de tungstène à haute densité
- 4.2 Procédé de métallurgie des poudres d'alliage de tungstène à haute densité
- 4.3 Autres méthodes de préparation d'alliages de tungstène à haute densité
- 4.4 Influence des paramètres de processus de l'alliage de tungstène à haute densité
- 4.5 Contrôle qualité et tests de l'alliage de tungstène haute densité

Chapitre 5 : Traitement et post-traitement des alliages de tungstène à densité élevée

- 5.1 Technologie d'usinage de l'alliage de tungstène à haute densité
- 5.2 Traitement de surface de l'alliage de tungstène haute densité
- 5.3 Soudage et connexion d'alliages de tungstène à haute densité

Chapitre 6 : Équipement de production d'alliages de tungstène à haute densité

- 6.1 Équipement de préparation de poudre d'alliage de tungstène lourd
- 6.2 Équipement de moulage d'alliages de tungstène lourds
- 6.3 Équipement de frittage d'alliages de tungstène lourds
- 6.4 Équipement de traitement et de post-traitement des alliages de tungstène lourds

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.5 Sélection et optimisation des équipements de production d'alliages de tungstène lourds

Chapitre 7 : Équipement d'essai des alliages de tungstène à haute densité

- 7.1 Équipement d'essai de densité d'alliage de tungstène à haute densité
- 7.2 Équipement d'essai des propriétés mécaniques des alliages de tungstène à haute densité
- 7.3 Équipement d'analyse de la microstructure des alliages de tungstène à haute densité
- 7.4 Équipement d'analyse de la composition des alliages de tungstène à haute densité
- 7.5 Équipement de contrôle non destructif pour alliages de tungstène haute densité
- 7.6 Tendances de sélection et de développement des équipements d'essai d'alliages de tungstène à haute densité

Chapitre 8 : Principaux produits de l'alliage de tungstène à haute densité de CTIA GROUP LTD

8.1 Produits de contreponds en alliage de tungstène à densité élevée

- 8.1.1 Contreponds aérospatial en alliage de tungstène à haute densité
- 8.1.2 Contreponds automobile en alliage de tungstène à haute densité
- 8.1.3 Poids d'équipements sportifs en alliage de tungstène à densité élevée
- 8.1.4 Contreponds de navire en alliage de tungstène à haute densité
- 8.1.5 Contreponds d'ascenseur en alliage de tungstène à haute densité
- 8.1.6 Tige de fléchette en alliage de tungstène lourd
- 8.1.7 Plombs de pêche lourds en alliage de tungstène

8.2 Produits militaires en alliage de tungstène à densité élevée

- 8.2.1 Noyau perforant en alliage de tungstène lourd
- 8.2.2 Plaque de blindage de protection en alliage de tungstène haute densité
- 8.2.3 Boîtier de protection pour munitions en alliage de tungstène à haute densité
- 8.2.4 Composants de missiles antichars en alliage de tungstène haute densité
- 8.2.5 Contreponds d'armes à feu en alliage de tungstène à haute densité
- 8.2.6 Contreponds de gyroscope d'aviation en alliage de tungstène à haute densité
- 8.2.7 Bague de tuyère de fusée en alliage de tungstène lourd

8.3 Alliage de tungstène à densité élevée, produits médicaux connexes

- 8.3.1 Composants de protection contre les radiations en alliage de tungstène lourd
- 8.3.2 Conteneur d'isotopes en alliage de tungstène lourd
- 8.3.3 Aiguille médicale en alliage de tungstène à haute densité
- 8.3.4 Cible de radiothérapie en alliage de tungstène haute densité
- 8.3.5 Écran de protection médicale en alliage de tungstène à haute densité
- 8.3.6 Conteneur de déchets nucléaires en alliage de tungstène lourd
- 8.3.7 Composants de couteau gamma en alliage de tungstène lourd

8.4 Outils et composants industriels en alliage de tungstène lourd

- 8.4.1 Outils de coupe en alliage de tungstène lourd

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 8.4.2 Moule et poinçon en alliage de tungstène à haute densité
- 8.4.3 Pièces antivibratoires en alliage de tungstène lourd
- 8.4.4 Outils de forage en alliage de tungstène haute densité
- 8.4.5 Composants de roulement en alliage de tungstène lourd
- 8.4.6 Manchon de meulage en alliage de tungstène lourd
- 8.4.7 Contrepoids lourds en alliage de tungstène pour machines-outils lourdes

8.5 Produits électroniques et énergétiques en alliage de tungstène lourd

- 8.5.1 Matériaux d'électrodes en alliage de tungstène à haute densité
- 8.5.2 Dissipateur thermique en alliage de tungstène haute densité (radiateur)
- 8.5.3 Composants de réacteur nucléaire en alliage de tungstène lourd
- 8.5.4 Contrepoids de batterie en alliage de tungstène à haute densité
- 8.5.5 Composants d'équipement solaire en alliage de tungstène lourd
- 8.5.6 Cible d'anode de tube à rayons X en alliage de tungstène lourd
- 8.5.7 Contrepoids d'éolienne en alliage de tungstène à haute densité

8.6 Produits personnalisés en alliage de tungstène lourd

- 8.6.1 Impression 3D de pièces en alliage de tungstène à densité élevée
- 8.6.2 Contrepoids de forme spéciale en alliage de tungstène à haute densité
- 8.6.3 Œuvres d'art et pièces décoratives en alliage de tungstène haute densité
- 8.6.4 Composants d'instruments expérimentaux en alliage de tungstène lourd
- 8.6.5 Pièces de micro-précision en alliage de tungstène haute densité
- 8.6.6 Cryptomonnaie en alliage de tungstène lourd
- 8.6.7 Carte bancaire en alliage de tungstène à densité élevée

Chapitre 9 : Domaines d'application de l'alliage de tungstène à densité élevée

9.1 Application de l'alliage de tungstène à haute densité dans l'aérospatiale

- 9.1.1 Composants de contrepoids et d'équilibrage d'aéronefs
- 9.1.2 Composants du système de propulsion du vaisseau spatial
- 9.1.3 Gyroscope et système de navigation inertielle

9.2 Application de l'alliage de tungstène à haute densité dans l'industrie militaire

- 9.2.1 Projectiles perforants à énergie cinétique et noyaux de projectiles
- 9.2.2 Matériaux de blindage et de blindage protecteurs
- 9.2.3 Composants de missiles et d'armes à feu
- 9.2.4 Projectiles formés de manière explosive (EFP)

9.3 Application de l'alliage de tungstène lourd dans le domaine médical

- 9.3.1 Équipement de protection et de blindage contre les radiations
- 9.3.2 Conteneurs de radiothérapie et d'isotopes
- 9.3.3 Instruments chirurgicaux et implants

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.4 Application des alliages de tungstène lourds dans l'industrie et les domaines civils

- 9.4.1 Outils d'usinage
- 9.4.2 Contrepoids pour équipements lourds
- 9.4.3 Industrie automobile et de course automobile
- 9.4.4 Équipements de sport et de divertissement

9.5 Application des alliages de tungstène à haute densité dans le domaine de l'électronique et de l'énergie

- 9.5.1 Dissipation thermique et blindage des équipements électroniques
- 9.5.2 Composantes de l'énergie nucléaire et renouvelable
- 9.5.3 Composants semi-conducteurs et microélectroniques

9.6 Application des alliages de tungstène lourds dans les domaines émergents

- 9.6.1 Application de la fabrication additive (impression 3D)
- 9.6.2 Exploration spatiale et exploration des grands fonds marins
- 9.6.3 Développement d'alliages à haute entropie et de matériaux composites

Chapitre 10 : Normes nationales et internationales relatives aux alliages de tungstène lourds

- 10.1 Normes internationales pour les alliages de tungstène lourds
- 10.2 Normes nationales pour les alliages de tungstène lourds
- 10.3 Contenu et exigences des normes relatives aux alliages de tungstène lourds
- 10.4 Comparaison des normes nationales et internationales pour les alliages de tungstène lourds
- 10.5 Tendances de développement des normes pour les alliages de tungstène lourds
- 10.6 CTIA GROUP LTD Alliage de tungstène à haute densité MSDS

Chapitre 11 : Considérations environnementales et économiques des alliages de tungstène lourds

- 11.1 Impact environnemental du processus de production d'alliages de tungstène lourds
- 11.2 Recyclage et réutilisation des alliages de tungstène lourds
- 11.3 Analyse des coûts de l'alliage de tungstène lourd

Chapitre 12 : Frontières de la recherche sur les alliages de tungstène à haute densité

- 12.1 Développement de nouveaux matériaux en alliages de tungstène à haute densité
- 12.2 Orientations pour améliorer les performances des alliages de tungstène à haute densité
- 12.3 Simulation et science des matériaux computationnels des alliages de tungstène à haute densité
- 12.4 Conception et personnalisation assistées par IA d'alliages de tungstène à haute densité
- 12.5 Relation entre les alliages de tungstène à haute densité et les alliages à haute entropie contenant du tungstène
- 12.6 Alliage de tungstène à faible toxicité (sans nickel ou alliage à faible teneur en nickel)
- 12.7 Alliage de tungstène nanostructuré

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Appendice

Glossaire des alliages de tungstène lourds

Références de l'alliage de tungstène lourd

Fiche technique de l'alliage de tungstène lourd

Brevets relatifs à l'alliage de tungstène à haute densité

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 1 : Introduction

Définition et aperçu de l'alliage de tungstène lourd

haute densité, comme son nom l'indique, est un matériau composite composé de tungstène (W) comme composant principal et d'une faible quantité d'autres éléments métalliques (tels que le nickel Ni, le fer Fe, le cuivre Cu, etc.) ajoutés par un procédé spécifique. Ce type d'alliage est réputé pour sa densité extrêmement élevée (généralement comprise entre 17,0 et 19,3 g/cm³, proche des 19,25 g/cm³ du tungstène pur), bien supérieure à celle des métaux courants tels que l'acier (7,8 g/cm³) ou le plomb (11,3 g/cm³). Ses principales caractéristiques sont non seulement sa densité élevée, mais aussi ses excellentes résistance mécanique, à la corrosion, aux hautes températures et à la radiation, ce qui en fait un matériau précieux dans de nombreux domaines.

Du point de vue de la composition chimique, les alliages de tungstène haute densité contiennent généralement 85 à 99 % de tungstène, le reste étant constitué d'éléments de phase liante (tels que le nickel et le fer) ou d'éléments de substitution (tels que le cuivre). Ces éléments ajoutés sont mélangés à de la poudre de tungstène, pressés et frittés par métallurgie des poudres pour former une microstructure uniforme. Le rôle de la phase liante est d'améliorer la ténacité et l'usinabilité de l'alliage. En effet, malgré sa densité extrêmement élevée, le tungstène pur est trop dur et cassant pour répondre aux exigences réelles de traitement et d'application. Grâce à l'optimisation de la formule, les alliages de tungstène haute densité conservent non seulement les caractéristiques de haute densité du tungstène, mais améliorent également ses propriétés mécaniques, ce qui en fait un matériau avancé, à la fois fonctionnel et pratique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En science des matériaux, les alliages de tungstène lourds sont considérés comme une combinaison de matériaux fonctionnels et structurels. Leur densité élevée les rend excellents pour les applications nécessitant un faible volume et un poids élevé, comme les contrepoids aérospatiaux et les noyaux perforants militaires. Parallèlement, leur stabilité physique et chimique les rend adaptés aux environnements extrêmes, comme les blindages anti-radiations ou les outils de traitement à haute température dans l'industrie nucléaire. Cette polyvalence a conféré aux alliages de tungstène lourds une place importante dans l'industrie et la technologie modernes, et ils sont reconnus comme « les meilleurs parmi les métaux lourds ».

D'un point de vue historique, le développement des alliages de tungstène haute densité est né des recherches sur les matériaux à base de tungstène au début du XXe siècle, notamment de la demande de matériaux militaires hautes performances pendant la Seconde Guerre mondiale, qui a favorisé leur progrès technologique. Aujourd'hui, grâce à l'amélioration continue des procédés de fabrication (frittage en phase liquide, pressage isostatique à chaud, etc.) et à l'élargissement de leurs domaines d'application, les alliages de tungstène haute densité ont dépassé leurs applications militaires initiales pour s'étendre aux domaines médicaux, industriels, civils et même aux domaines scientifiques et technologiques émergents, devenant ainsi un domaine de recherche et d'application important en science des matériaux.

1.2 L'importance de la recherche et de l'application des alliages de tungstène à densité élevée

haute densité présentent une importance scientifique et pratique considérable, et leur importance se reflète à de nombreux égards. D'un point de vue scientifique, ils constituent un modèle pour la recherche sur les matériaux composites à base de métaux. En ajustant le ratio tungstène/autres éléments et en optimisant le procédé de préparation, la relation entre des propriétés telles que la densité, la résistance et la ténacité peut être explorée de manière systématique. Ce type de recherche favorise non seulement le développement théorique de la science des matériaux, mais fournit également une expérience précieuse pour le développement d'autres alliages hautes performances. Par exemple, la technologie de contrôle de la microstructure des alliages de tungstène haute densité (optimisation de la granulométrie et uniformité de la distribution des phases, par exemple) a été utilisée dans la recherche sur les alliages à haute entropie et les nanomatériaux.

Dans le domaine industriel, l'utilisation d'alliages de tungstène haute densité améliore directement l'efficacité et la sécurité de nombreuses industries. Dans l'aérospatiale par exemple, leur haute densité permet aux composants de contrepoids des avions et des engins spatiaux d'obtenir une répartition précise de la masse dans un espace restreint, optimisant ainsi les performances de vol et la consommation de carburant. Dans l'industrie militaire, les projectiles perforants en alliages de tungstène lourds peuvent pénétrer efficacement les blindages modernes et améliorer la capacité de combat des systèmes d'armes grâce à leur dureté et leur densité élevées. De plus, leur résistance aux températures élevées et à la corrosion en fait un choix idéal pour les outils d'usinage haute température et les équipements sous-marins, prolongeant considérablement leur durée de vie et réduisant les coûts de maintenance.

L'application dans le domaine médical souligne l'intérêt social des alliages de tungstène haute densité. Grâce à leur excellente capacité de protection contre les radiations, ils sont largement utilisés dans les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

composants de blindage des appareils à rayons X, des scanners et des appareils de radiothérapie. Comparés aux matériaux traditionnels à base de plomb, les alliages de tungstène sont non toxiques et présentent une densité plus élevée. Ils offrent une protection équivalente, voire supérieure, dans un volume plus fin, réduisent le poids des équipements et améliorent la sécurité des patients et du personnel médical. De plus, les alliages de tungstène haute densité sont également utilisés dans la fabrication de conteneurs d'isotopes médicaux et de composants de gamma knife, garantissant ainsi le transport sûr et le traitement précis des matières radioactives, et favorisant le développement des technologies médicales modernes.

Dans le domaine civil, l'application des alliages de tungstène haute densité est incontournable. Par exemple, leur utilisation dans les équipements sportifs (poids de clubs de golf, cannes à fléchettes) et les plombs de pêche remplace les matériaux toxiques à base de plomb, ce qui améliore non seulement les performances des produits, mais répond également aux exigences de protection de l'environnement. Cette large pénétration de l'industrie vers le civil témoigne du potentiel des alliages de tungstène haute densité pour améliorer la qualité de vie et promouvoir le développement durable.

D'un point de vue économique, la recherche, le développement et l'application des alliages de tungstène haute densité ont stimulé le développement de filières industrielles connexes, notamment l'extraction du tungstène, la fabrication d'équipements pour la métallurgie des poudres et les technologies d'usinage de précision. Face à la demande mondiale croissante de matériaux hautes performances, les perspectives de marché des alliages de tungstène haute densité sont vastes, générant des avantages économiques considérables pour les entreprises et les pays. Cependant, leur coût de production élevé et leur dépendance aux ressources (le tungstène étant un métal rare) incitent les chercheurs à explorer en permanence des procédés de production et des technologies de recyclage plus performants afin de parvenir à une situation gagnant-gagnant pour l'économie et l'environnement.

1.3 Objectif et organisation de ce livre

Cet ouvrage vise à présenter de manière exhaustive et systématique les connaissances pertinentes sur les alliages de tungstène haute densité, de la théorie fondamentale à l'application pratique, de la technologie de production aux développements futurs, et à fournir aux lecteurs un ouvrage de référence fiable et détaillé. Ses principaux objectifs sont les suivants :

Premièrement, il offre un soutien théorique aux chercheurs universitaires. Cet ouvrage explore en profondeur les propriétés chimiques et physiques, les procédés de préparation et les méthodes d'optimisation des performances des alliages de tungstène haute densité, aide les chercheurs à comprendre la relation entre leur microstructure et leurs propriétés macroscopiques et inspire la conception de nouveaux matériaux à base de tungstène. Deuxièmement, il constitue un guide pratique pour les ingénieurs et les techniciens. En présentant en détail les équipements de production, les technologies d'essai et les applications spécifiques des produits, cet ouvrage vise à aider les praticiens à maîtriser les compétences de traitement et d'application des alliages de tungstène haute densité et à améliorer l'efficacité de la production industrielle. Troisièmement, il fournit une référence stratégique aux décideurs et aux gestionnaires de l'industrie. En analysant les normes nationales et internationales,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

les impacts environnementaux et les considérations économiques, cet ouvrage révèle les tendances de développement et les défis de l'industrie des alliages de tungstène haute densité et fournit une base pour l'élaboration des politiques et les décisions d'investissement.

Cet ouvrage s'adresse notamment aux chercheurs et étudiants en science et ingénierie des matériaux, aux ingénieurs impliqués dans la production et la transformation des alliages de tungstène, aux experts techniques des secteurs de l'aérospatiale et de la défense, aux fabricants d'équipements médicaux et aux professionnels de l'industrie intéressés par les matériaux hautes performances. Afin de répondre aux besoins de différents lecteurs, cet ouvrage allie profondeur théorique et champ d'application, avec une revue systématique des connaissances fondamentales et des dernières avancées de la recherche de pointe.

Le livre est organisé comme suit :

Chapitre 2 à Chapitre 5 : Poser les bases, présenter les connaissances de base, l'analyse des performances, la technologie de préparation, la technologie de traitement et de post-traitement de l'alliage de tungstène haute densité et établir un cadre théorique complet pour les lecteurs.

Chapitre 6 à Chapitre 7 : En se concentrant sur la production et les tests, les équipements de production et les équipements de test de l'alliage de tungstène haute densité sont élaborés en détail, mettant en évidence le support matériel pour la mise en œuvre technique.

Chapitre 8 à Chapitre 9 : En ce qui concerne les applications, les principaux produits et les domaines d'application plus larges de [China Tungsten Intelligence](#) sont répertoriés respectivement, démontrant la valeur réelle de l'alliage de tungstène haute densité.

Chapitres 10 à 11 : Se concentrent sur les normes et les impacts, analysent les normes nationales et internationales ainsi que les considérations environnementales et économiques, et fournissent un soutien contextuel à l'industrialisation.

Chapitre 12 : En regardant vers l'avenir, cet article discute des frontières de la recherche sur les alliages de tungstène à haute densité, y compris la recherche croisée sur la conception assistée par l'IA et les alliages à haute entropie.

Annexe : Fournit un glossaire, des références et des tableaux de données pour faciliter la référence des lecteurs et la recherche approfondie.

Grâce à cette structure, cet ouvrage s'efforce de présenter une vue d'ensemble des alliages de tungstène haute densité, de la théorie à la pratique, de la technologie à l'application, de la situation actuelle à l'avenir. Que vous soyez un apprenant novice dans ce domaine ou un professionnel souhaitant approfondir ses recherches, cet ouvrage se veut un partenaire fiable pour explorer le monde des alliages de tungstène haute densité.

[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

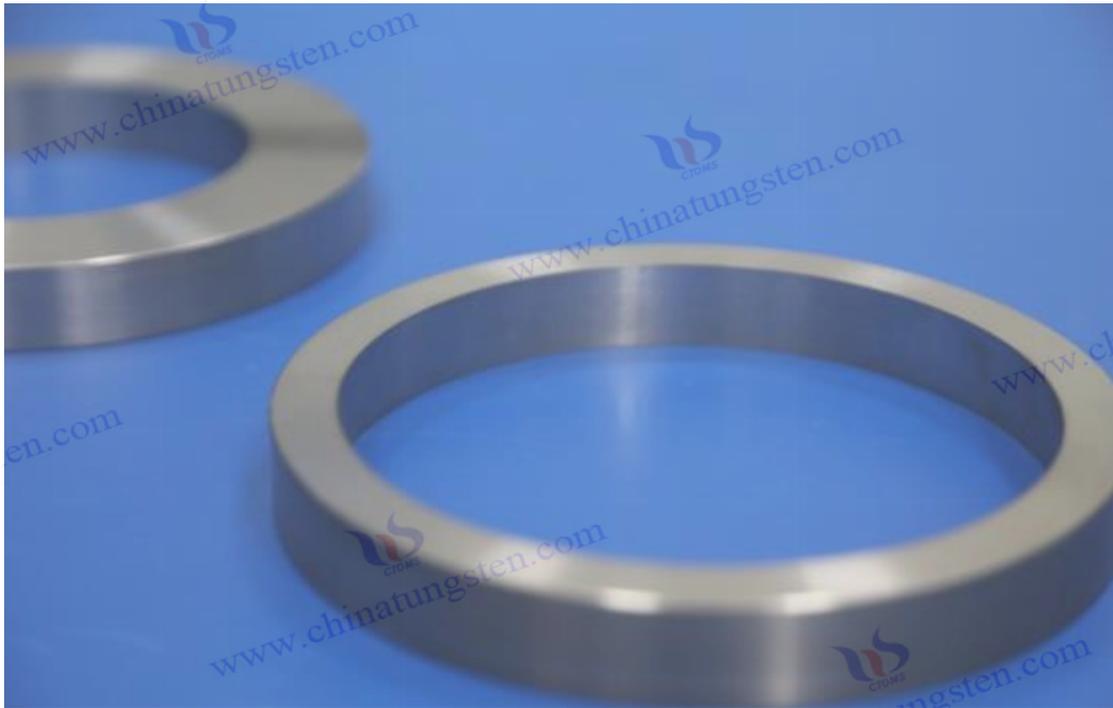
Official website: www.tungsten-alloy.com



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 : Connaissances de base sur l'alliage de tungstène à densité élevée

Propriétés chimiques et physiques des alliages de tungstène lourds

Les alliages de tungstène haute densité constituent la base de leur large application dans l'industrie et les technologies modernes. Ces propriétés découlent non seulement des excellentes propriétés du tungstène lui-même, mais bénéficient également de l'optimisation du procédé d'alliage. Du point de vue de la composition chimique, les alliages de tungstène haute densité sont dominés par le tungstène (W), dont la teneur en tungstène se situe généralement entre 85 % et 99 %, le reste étant constitué d'une faible quantité de phase de liaison ou d'éléments ajoutés, notamment le nickel (Ni), le fer (Fe), le cuivre (Cu), le cobalt (Co) ou le molybdène (Mo). Le tungstène est un métal de transition situé dans la sixième période du tableau périodique, de numéro atomique 74 et de masse atomique 183,84 μm . Il présente un point de fusion extrêmement élevé (3422 °C) et une stabilité chimique exceptionnelle. Sa configuration électronique ($[\text{Xe}] 4f^1 4 5d^4 6s^2$) détermine sa densité et sa dureté élevées, tandis que des éléments ajoutés tels que le nickel et le fer améliorent considérablement la fragilité du tungstène en formant des solutions solides ou des composés intermétalliques (tels que Ni_3Fe). Par exemple, dans un alliage tungstène-nickel-fer typique (W-Ni-Fe), la teneur en tungstène est de 90 % à 97 %, et le rapport nickel/fer est généralement de 7:3 ou 5:5. Ce rapport forme une phase liquide pendant le processus de frittage, ce qui favorise la liaison uniforme des particules de tungstène et améliore la ténacité de l'alliage. D'autre part, l'alliage tungstène-cuivre (W-Cu) est souvent utilisé dans les appareils électroniques en raison de la conductivité électrique et thermique élevée du cuivre. La teneur en tungstène est généralement de 70 % à 90 % pour équilibrer la densité et les propriétés thermiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Du point de vue des propriétés physiques, la densité de l'alliage de tungstène lourd constitue son principal avantage, comprise entre 17,0 et 19,3 g/cm³, proche des 19,25 g/cm³ du tungstène pur. Cette densité élevée provient de la structure cristalline cubique centrée (BCC) du tungstène et de sa masse atomique élevée, qui rendent son empilement atomique par unité de volume extrêmement efficace. Par exemple, la densité de l'alliage W-90Ni-7Fe-3 peut atteindre 18,5 g/cm³, ce qui est bien supérieur à celui de l'acier (7,85 g/cm³), de l'aluminium (2,7 g/cm³) et du plomb (11,34 g/cm³), et à peine inférieur à celui du tungstène pur. Cette caractéristique le rend irremplaçable dans les applications exigeant un encombrement réduit et une qualité élevée, comme les contrepoids aéronautiques ou les noyaux perforants. Bien que le point de fusion de l'alliage de tungstène lourd soit inférieur à celui du tungstène pur en raison de l'ajout d'éléments, il reste compris entre 2 500 et 3 000 °C. Par exemple, le point de fusion de l'alliage W-95Ni-Fe est d'environ 2 800 °C, ce qui reste bien supérieur à celui de l'acier (environ 1 500 °C) et du plomb (327 °C), ce qui en fait un excellent matériau pour les environnements à haute température.

En termes de propriétés mécaniques, les alliages de tungstène lourds présentent à la fois une résistance élevée et une ténacité modérée. Leur résistance à la traction se situe généralement entre 700 et 1 200 MPa, selon la composition et le procédé. Par exemple, la résistance à la traction de l'alliage W-90Ni-7Fe-3 peut atteindre 1 000 MPa, tandis que celle de l'alliage W-95Ni-Cu peut être légèrement inférieure, autour de 800 MPa. Sa dureté (dureté Vickers, HV) varie de 300 à 500 HV, ce qui est inférieur à celui du tungstène pur (350 à 650 HV) mais bien supérieur à celui du plomb (~5 HV). Comparée à la fragilité du tungstène pur (allongement < 1 %), la ductilité des alliages de tungstène haute densité est nettement améliorée, avec un allongement de 10 à 30 %, grâce à l'effet plastique de la phase liante (comme le Ni-Fe). Par exemple, l'alliage W-93Ni-Fe peut présenter un allongement de 20 % lors des essais de traction, ce qui le rend moins susceptible à la rupture sous des charges dynamiques telles que l'impact d'une explosion. De plus, sa résistance à l'usure et à la fatigue est excellente, avec un taux d'usure inférieur d'environ 30 à 50 % à celui de l'acier, ce qui lui confère une longue durée de vie pour les outils de coupe et les équipements de forage.

Les propriétés thermiques et électriques sont un autre aspect important des alliages de tungstène haute densité. Sa conductivité thermique varie de 80 à 150 W/(m·K), ce qui est inférieur à celui du tungstène pur (173 W/(m·K)) et du cuivre (400 W/(m·K)), mais supérieur à celui de l'acier (~50 W/(m·K)). Par exemple, la conductivité thermique de l'alliage W-80Cu peut atteindre 140 W/(m·K), ce qui le rend idéal comme dissipateur thermique pour les appareils électroniques. Sa résistivité est d'environ 5,5 à 7,0 μΩ·cm, ce qui est légèrement supérieur à celui du cuivre (1,68 μΩ·cm) et du tungstène pur (5,5 μΩ·cm), tout en conservant une bonne conductivité et en le rendant adapté aux matériaux d'électrodes. Sa capacité de protection contre les radiations est particulièrement remarquable. Le numéro atomique élevé du tungstène (Z = 74) et sa densité élevée lui confèrent une excellente absorption des rayons X et gamma. Par exemple, l'alliage W-95Ni-Fe, d'une épaisseur de seulement 1 cm, peut bloquer environ 90 % des rayons gamma, dépassant largement le plomb de même épaisseur (environ 70 %). De plus, il est non toxique, ce qui en fait un matériau de choix pour les industries médicale et nucléaire.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En termes de résistance à la corrosion, le tungstène présente une stabilité extrêmement élevée aux acides, aux bases et à l'oxygène à température ambiante. Il réagit peu avec l'acide chlorhydrique et l'acide sulfurique et se dissout lentement dans les milieux fortement oxydants (comme l'acide nitrique concentré). Les alliages lourds de tungstène héritent de cette propriété, mais leur résistance à la corrosion diminue légèrement après ajout de nickel et de fer. Par exemple, le taux de perte de masse de l'alliage W-Ni-Fe est inférieur à 0,5 % après immersion dans l'acide chlorhydrique pendant 100 heures, mais il peut atteindre 2 à 3 % dans l'acide nitrique. En revanche, l'alliage W-Cu présente une meilleure tolérance à l'humidité et à l'eau de mer grâce à la présence de cuivre, et son taux de corrosion en milieu marin n'est que 1/10 de celui de l'acier. Ces caractéristiques permettent aux alliages lourds de tungstène de rester stables dans divers environnements chimiques.

Pour démontrer intuitivement ses performances, le tableau suivant compare les principaux paramètres de l'alliage de tungstène à densité élevée avec l'acier, le plomb et le tungstène pur :

Paramètres de performance	Alliage de tungstène lourd	Acier (acier au carbone ordinaire)	plomb	Tungstène pur
Densité (g/cm ³)	17,0-19,3	7,85	11.34	19h25
Point de fusion (°C)	2500-3000	~1500	327	3422
à la traction (MPa)	700-1200	400-1000	~15	900-1500
Dureté (HV)	300-500	120-250	~5	350-650
Allongement (%)	10-30	20-40	>50	<1
Conductivité thermique (W/(m·K))	80-150	~50	35	173
Résistivité (μΩ·cm)	5,5-7,0	~15	20	5.5
Résistance à la corrosion	Bon (environnement non oxydant)	Moyen (facile à rouiller)	Bon (résistant aux acides)	Excellent
Capacité de protection contre les radiations	Excellent	Pauvre	bien	Excellent

Remarque : les données du tableau sont des plages typiques et les valeurs spécifiques peuvent varier en fonction des ingrédients et des procédés.

Développement historique des alliages de tungstène lourds

La création d'alliages de tungstène haute densité est un long processus, de la découverte fondamentale à l'application industrielle, puis à l'innovation technologique, reflétant la quête constante de l'humanité pour des matériaux hautes performances. La découverte du tungstène a commencé à la fin du XVIIIe siècle. En 1781, le chimiste suédois Carl Wilhelm Scheele a émis l'hypothèse de l'existence du tungstène en décomposant le tungstate (CaWO₄). Puis, en 1783, les frères espagnols Juan José et Fausto Eljuar ont été les premiers à extraire du tungstène métallique par réduction de l'oxyde de tungstène (WO₃). Ils l'ont baptisé « wolfram » (de l'allemand « écume de loup »), car son minerai est souvent associé à l'étain et de l'écume se forme lors de sa fusion. Cependant,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En raison de la technologie métallurgique arriérée des premiers temps, le tungstène existait sous forme de poudre ou de composés et ne pouvait pas être transformé en matériaux en vrac, ce qui limitait son application.

Au XIXe siècle, avec l'avancée de la révolution industrielle, l'utilisation du tungstène s'est progressivement développée. En 1847, le scientifique britannique Robert Oxland a mis au point une méthode de préparation du tungstate de sodium, jetant ainsi les bases de sa production industrielle. À la fin du XIXe siècle, l'apparition des fours à arc électrique et de la métallurgie des poudres a rendu possible le traitement du tungstène. En 1904, la General Electric Company des États-Unis a utilisé pour la première fois le filament de tungstène dans les ampoules à incandescence pour remplacer les filaments de carbone, ce qui a considérablement prolongé la durée de vie des ampoules grâce à son point de fusion élevé et à sa durabilité. Cette avancée a marqué la transition du tungstène du laboratoire à l'industrie, mais la fragilité du tungstène pur compliquait encore la satisfaction de besoins plus complexes.

haute densité est apparu au début du XXe siècle, stimulé par les besoins militaires. Pendant la Première Guerre mondiale (1914-1918), le tungstène était utilisé pour fabriquer des outils de coupe et de l'acier de blindage (comme l'« acier au tungstène » allemand) en raison de sa dureté élevée. Cependant, la difficulté de traiter le tungstène pur a incité les scientifiques à explorer des voies d'alliage. Dans les années 1930, des métallurgistes allemands ont tenté pour la première fois de mélanger du tungstène avec du nickel et du fer pour préparer des alliages à base de tungstène par métallurgie des poudres. La formule typique de cette période est W-90Ni-10, avec une densité d'environ 17 g/cm³, une dureté d'environ 300 HV et une ténacité nettement supérieure à celle du tungstène pur. La Seconde Guerre mondiale (1939-1945) a marqué un tournant dans le développement des alliages de tungstène lourds. Dans les années 1940, l'armée américaine a développé l'alliage W-90Ni-7Fe-3 pour le noyau perforant du char M1. Sa densité (18,5 g/cm³) et sa pénétration surpassaient largement celles du noyau en acier de l'époque, améliorant considérablement sa puissance destructrice contre les blindages allemands. La technologie de l'époque reposait principalement sur le pressage et le frittage à haute température. Bien que simple, ce procédé a jeté les bases des alliages modernes de tungstène haute densité.

Après la guerre, la course aux armements et l'industrialisation civile pendant la Guerre froide ont favorisé le développement des alliages de tungstène à haute densité. Dans les années 1950 et 1960, le secteur aérospatial a commencé à exploiter sa forte densité, notamment pour les contrepoids des gyroscopes du chasseur américain F-15 et les blocs d'équilibrage des premiers satellites de la NASA, avec une densité requise supérieure à 18 g/cm³. À la même période, le secteur médical a découvert son potentiel en matière de protection contre les radiations. À la fin des années 1950, l'alliage W-95Ni-Fe a commencé à être utilisé dans les composants de blindage des appareils à rayons X, remplaçant progressivement le plomb. Dans les années 1970, la maturité de la technologie de frittage en phase liquide a permis d'augmenter la densité des alliages de 95 % à plus de 99 %. Par exemple, la porosité de l'alliage W-93Ni-Fe a été réduite à moins de 0,5 % et la constance des performances a été considérablement améliorée, ce qui a favorisé la production à grande échelle.

À l'aube du XXIe siècle, la recherche et le développement d'alliages de tungstène haute densité se sont orientés vers l'optimisation des performances et la protection de l'environnement. Après 2000, la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nanotechnologie a été introduite dans la préparation de la poudre de tungstène, réduisant la taille des grains de l'ordre du micron à 50-100 nm, augmentant ainsi la résistance à la traction de l'alliage W-95Ni-Fe de 1 000 MPa à 1 200 MPa. L'essor des technologies d'impression 3D (comme le frittage sélectif par laser) a permis la réalisation de pièces en alliage de tungstène de formes complexes, telles que des contrepoids de forme spéciale pour l'aéronautique. De plus, face aux préoccupations liées à la toxicité du plomb, l'alliage W-90Ni-Cu a été promu dans le domaine civil (plombs de pêche et lests de clubs de golf, par exemple), et sa part de marché est passée de 5 % en 2000 à plus de 30 % en 2020. Aujourd'hui, la recherche sur les alliages de tungstène haute densité se concentre sur la conception assistée par IA et son association avec des alliages à haute entropie. Son évolution historique témoigne non seulement du progrès technologique, mais reflète également l'étroite interaction entre la science des matériaux et les besoins sociaux.

2.3 Comparaison entre l'alliage de tungstène à densité élevée et d'autres matériaux

L'alliage de tungstène haute densité se distingue parmi de nombreux matériaux, mais ses avantages et ses limites doivent être compris par une comparaison détaillée avec d'autres matériaux. Voici une analyse systématique de l'alliage de tungstène haute densité avec l'acier (acier au carbone ordinaire), le plomb, l'alliage de titane (Ti-6Al-4V) et le tungstène pur, sous six angles : densité, propriétés mécaniques, propriétés thermiques, résistance à la corrosion, aptitude à la transformation et coût.

La densité est le principal avantage des alliages de tungstène haute densité. Sa densité, comprise entre 17,0 et 19,3 g/cm³, est proche de celle du tungstène pur (19,25 g/cm³) et dépasse largement celle de l'acier (7,85 g/cm³), de l'alliage de titane (4,51 g/cm³) et du plomb (11,34 g/cm³). Par exemple, la densité de l'alliage W-95Ni-Fe est de 18,5 g/cm³, alors que le même volume d'acier ne représente que 40 % de son poids. Cela le rend irremplaçable dans les applications nécessitant un poids élevé et un faible volume, comme les contrepoids aéronautiques et les noyaux perforants. L'acier et les alliages de titane sont quant à eux plus adaptés aux conceptions légères, tandis que le plomb est limité en raison de sa toxicité.

Français Propriétés mécaniques, la résistance à la traction des alliages de tungstène haute densité (700-1200 MPa) est du même ordre de grandeur que l'acier (400-1000 MPa) et les alliages de titane (environ 1100 MPa), mais bien supérieure à celle du plomb (~15 MPa) et légèrement inférieure à celle du tungstène pur (900-1500 MPa). La dureté (300-500 HV) est également meilleure que celle de l'acier (120-250 HV) et du plomb (~5 HV), mais inférieure à celle du tungstène pur (350-650 HV). Son allongement (10%-30%) est significativement meilleur que celui du tungstène pur (<1%), et proche de l'acier (20%-40%) et de l'alliage de titane (10%-15%), compensant la fragilité du tungstène pur. Par exemple, l'alliage W-90Ni-Fe peut supporter une énergie de 50 J/cm² lors d'un essai d'impact, tandis que le tungstène pur ne supporte que 5 J/cm². Cet équilibre entre résistance et ténacité le rend plus fiable sous charges dynamiques, tandis que la très faible résistance du plomb limite ses applications structurelles.

Propriétés thermiques, La conductivité thermique de l'alliage de tungstène lourd (80-150 W/(m·K)) est inférieure à celle du tungstène pur (173 W/(m·K)) et du cuivre (400 W/(m·K)), mais supérieure à celle de l'acier (~50 W/(m·K)) et du plomb (35 W/(m·K)). Son point de fusion (2500-3000 °C) est bien supérieur à celui de l'acier (~1500 °C), du plomb (327 °C) et de l'alliage de titane (~1660 °C), juste derrière le tungstène pur (3422 °C). Par exemple, la conductivité thermique de l'alliage W-80Cu est de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

140 W/(m·K), ce qui convient aux applications de dissipation thermique, tandis que l'acier se ramollit facilement à haute température et le plomb fond complètement.

Résistance à la corrosion : l'alliage de tungstène haute densité offre de bonnes performances dans les environnements non oxydants. Par exemple, après immersion dans de l'acide chlorhydrique à 10 % pendant 1 000 heures, le taux de perte de masse est inférieur à 1 %, ce qui est supérieur à celui de l'acier (facile à rouiller, taux de perte d'environ 20 %) et du plomb (résistant aux acides mais non aux alcalis, taux de perte d'environ 5 %). L'alliage de titane (excellente résistance à la corrosion, taux de perte < 0,1 %) et le tungstène pur (quasiment sans corrosion) sont légèrement supérieurs, mais l'alliage W-Cu offre de bonnes performances en eau de mer, avec un taux de corrosion de seulement 1/15 de celui de l'acier, ce qui le rend adapté à la construction navale.

L'usinabilité est une amélioration clé des alliages de tungstène lourds. Le tungstène pur présente une dureté et une fragilité élevées, ce qui nécessite un forgeage à haute température ou des outils spéciaux pour son usinage, ce qui est coûteux. Les alliages de tungstène lourds sont optimisés par des phases de liaison (comme Ni-Fe) et peuvent être usinés par tournage et fraisage. Leur difficulté d'usinage est proche de celle de l'acier (facile à usiner), mais reste supérieure à celle des alliages de titane (moyennement) et du plomb (très facile à usiner). Par exemple, la vitesse de coupe de l'alliage W-90Ni-Fe peut atteindre 50 m/min, contre seulement 10 m/min pour le tungstène pur.

30 000 et 50 000 dollars la tonne, un prix bien supérieur à celui de l'acier (environ 500 dollars la tonne) et du plomb (environ 2 000 dollars la tonne), comparable aux alliages de titane (environ 30 000 dollars la tonne), mais inférieur à celui du tungstène pur (environ 60 000 dollars la tonne), car le tungstène est un métal rare (les réserves mondiales sont d'environ 3,5 millions de tonnes, principalement concentrées en Chine) et le procédé est complexe (métallurgie des poudres, frittage). Cela le rend plus économique dans les domaines à forte valeur ajoutée (tels que l'aviation et le médical), mais il peut être remplacé par l'acier dans les applications bas de gamme.

En général, l'alliage de tungstène haute densité se distingue par ses performances globales en termes de densité, de résistance, de ténacité, de résistance à la corrosion et d'aptitude à la transformation. Il compense la fragilité du tungstène pur et la toxicité du plomb, surpasse les limites de l'acier et des alliages de titane dans les applications à haute densité et constitue une base solide pour la conception de procédés et le choix des applications.

Classification des alliages de tungstène lourds

haute densité (HDTA) sont des alliages dont le tungstène (W) est le composant principal (teneur généralement comprise entre 85 % et 97 %). Grâce à leur densité élevée, leurs excellentes propriétés mécaniques et leur bonne résistance à la corrosion, ils sont largement utilisés dans les secteurs militaire, aérospatial, médical, électronique et industriel. Selon différentes méthodes de classification, les alliages de tungstène haute densité peuvent être classés selon les catégories suivantes :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.4.1 Classification basée sur les ingrédients

haute densité est composé de tungstène, auquel on ajoute du nickel (Ni), du fer (Fe), du cuivre (Cu), du cobalt (Co) et d'autres éléments, selon les besoins, pour optimiser ses performances. Selon la composition des éléments secondaires, l'alliage se divise principalement en plusieurs catégories :

(1) Alliage W-Ni-Fe

Caractéristiques de composition : Contient généralement 90 % à 97 % de tungstène et le rapport nickel/fer est d'environ 7:3 ou 8:2.

Avantages de performance : bonne ductilité, résistance et dureté élevées et perméabilité magnétique élevée.

Principales applications : Largement utilisé dans l'industrie militaire (noyau perforant), l'aérospatiale (contreponds), le contreponds industriel (contreponds gyroscopique).

(2) Alliage W-Ni-Cu

Caractéristiques de composition : La teneur en tungstène est généralement de 90 % à 95 %, et le rapport nickel/cuivre est généralement proche de 7:3.

Avantages de performance : Comparé à l'alliage W-Ni-Fe, l'alliage W-Ni-Cu a une perméabilité magnétique plus faible, presque aucun magnétisme et une bonne résistance à la corrosion.

Principales applications : Utilisé dans le blindage médical contre les radiations (protection contre les rayons X), l'emballage électronique et dans les zones sensibles au magnétisme.

(3) Alliage W-Ni-Fe-Co

Caractéristiques de composition : Du cobalt (Co) est ajouté à la base W-Ni-Fe pour améliorer la résistance et la résistance à l'usure.

Avantages de performance : Résistance et dureté supérieures à celles de l'alliage W-Ni-Fe, et présente une certaine stabilité à haute température.

Principales applications : Utilisé pour les matériaux structurels à haute température, tels que les composants de moteurs aérospatiaux, les outils de coupe résistants à l'usure, etc.

(4) Autres alliages spéciaux

Alliage W-Cu : principalement utilisé pour les applications à haute conductivité thermique et à haute conductivité électrique, telles que les matériaux d'électrodes.

W-Re (tungstène- rhénium) alliage : présente de meilleures performances à haute température et est souvent utilisé dans le domaine aérospatial.

2.4.2 Classification basée sur la densité et les propriétés mécaniques (Classe 1 ~ Classe 4)

Selon les normes **ASTM B777** et **MIL-T-21014**, les alliages de tungstène lourds peuvent être classés en quatre catégories (de la classe 1 à la classe 4) selon leur densité et leurs propriétés mécaniques. Chaque catégorie d'alliage est adaptée à différents scénarios d'application :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

grade	Teneur en tungstène (%)	Densité (g/cm ³)	Résistance à la traction (MPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Allongement (%)	Perméabilité magnétique	Applications typiques
Classe 1	90	17.0	≥ 758	≥ 517	≥ 5	> 1,05	Contrepoids aéronautique, contrepoids industriel
Classe 2	92,5	17,5	≥ 758	≥ 517	≥ 5	> 1,05	Armure militaire, noyau perforant
Classe 3	95	18.0	≥ 724	≥ 517	≥ 3	> 1,05	Protection contre les rayons X, blindage contre les radiations nucléaires
Classe 4	97	18,5	≥ 689	≥ 517	≥ 2	> 1,05	Radioprotection médicale, emballage électronique

Classe 1 et Classe 2 : Résistance supérieure et meilleure ténacité, adaptées aux applications telles que les contrepoids aérospatiaux, militaires et industriels.

Classe 3 et Classe 4 : Densité plus élevée, généralement utilisée dans la radioprotection, l'industrie nucléaire et les domaines des contrepoids de haute précision.

2.4.3 Classification basée sur l'utilisation

Selon l'application de l'alliage de tungstène à densité élevée dans différents domaines, il peut être divisé dans les catégories suivantes :

(1) Industrie militaire

Il est principalement utilisé pour **les noyaux perforants** (tels que l'APFSDS, un substitut aux obus en uranium appauvri), **les blindages de protection**, **fragments métalliques explosifs**, etc.

Exigences : haute densité, haute dureté, haute résistance aux chocs.

Matériaux principaux : W-Ni-Fe, W-Ni-Fe-Co.

(2) Aérospatiale

les contrepoids des avions et des engins spatiaux, **contrepoids de gyroscope inertiel**, **composants haute température du moteur**, etc.

Exigences : haute densité, résistance aux hautes températures et résistance à l'oxydation.

Matériaux principaux : W-Ni-Fe, W-Ni-Fe-Co, W-Re.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) Domaine médical

Principalement utilisé pour **les matériaux de protection contre les rayons X , protection contre la radiothérapie** (comme les blocs de protection contre les rayons gamma), **conteneurs de transport de médicaments radioactifs** , etc.

Exigences : haute densité, non magnétique, non toxique, résistant à la corrosion.

Matériaux principaux : W-Ni-Cu, W-Ni-Cu-Co.

(4) Domaines industriels et civils

Principalement utilisé dans **les contrepoids de précision (pendules, gyroscopes, contrepoids de course) , outils de forage pétrolier , matériaux d'électrodes** , etc.

Exigences : haute densité, résistance à l'usure, bonne usinabilité.

Matériaux principaux : W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, W-Cu.

(5) Domaines de l'électronique et des semi-conducteurs

Principalement utilisé **dans les matériaux d'emballage électronique , dissipateurs thermiques à semi-conducteurs de haute puissance et matériaux d'interconnexion microélectronique** .

Exigences : conductivité thermique élevée, faible dilatation thermique, non magnétique.

Matériaux principaux : W-Cu, W-Ag (alliage tungstène -argent) .

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 3 : Analyse des performances de l'alliage de tungstène à poids élevé

3.1 Propriétés mécaniques de l'alliage de tungstène lourd

Les propriétés mécaniques des alliages de tungstène à haute densité sont les facteurs clés qui les rendent populaires dans les applications d'ingénierie, couvrant la résistance, la dureté, la ténacité, la résistance à l'usure, la résistance à la fatigue, etc. Les excellentes performances de ces propriétés sont dues à la dureté élevée du tungstène et à l'effet synergique des éléments ajoutés, ce qui lui permet de bien fonctionner sous des charges statiques et dynamiques.

La résistance à la traction et la limite d'élasticité sont les principaux indicateurs des propriétés mécaniques. La résistance à la traction des alliages de tungstène lourds se situe généralement entre 700 et 1 200 MPa, et la limite d'élasticité entre 500 et 1 000 MPa. Ces valeurs varient selon la composition et le procédé. Par exemple, la résistance à la traction de l'alliage W-90Ni-7Fe-3 (teneur en tungstène de 90 %, rapport nickel-fer de 7:3) peut atteindre 1 050 MPa et la limite d'élasticité est d'environ 850 MPa, tandis que celle du W-95Ni-Cu (teneur en tungstène de 95 %, rapport nickel-cuivre) est d'environ 800 MPa. Ce niveau de résistance est comparable à celui des aciers à haute résistance (tels que l'AISI 4340, environ 1 000 MPa), mais dépasse largement la limite du plomb (environ 15 MPa) et du tungstène pur avant rupture fragile (900-1 500 MPa). Sa résistance élevée réside dans la dureté élevée des particules de tungstène et dans l'effet de renforcement de la phase de liaison (telle que Ni-Fe), qui absorbe l'énergie lors de la traction et retarde la propagation des fissures.

La dureté est une autre caractéristique importante des alliages de tungstène lourds, avec une dureté Vickers (HV) comprise entre 300 et 500 HV. Par exemple, la dureté de l'alliage W-93Ni-Fe est d'environ

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

450 HV, ce qui est proche de celle de certains aciers à outils (comme le H13, d'environ 400 à 500 HV), mais inférieure à celle du tungstène pur (350 à 650 HV). La distribution de la dureté est positivement corrélée à la teneur en tungstène. Plus la teneur en tungstène est élevée, plus la dureté est élevée. Cependant, l'ajout d'une phase liante réduit légèrement la dureté et améliore la résistance aux chocs. Par exemple, lors de l'essai de dureté Brinell (HB), l'alliage W-95Ni-Fe peut atteindre 400 HB, tandis que le tungstène pur est cassant et ne peut supporter des tests de charge élevée.

La ténacité est le principal avantage des alliages de tungstène haute densité par rapport au tungstène pur, ce qui se traduit par un allongement et une résistance à la rupture supérieurs. Son allongement varie de 10 % à 30 %, ce qui est bien supérieur à celui du tungstène pur (< 1 %). Par exemple, l'allongement de l'alliage W-90Ni-Fe peut atteindre 25 % à température ambiante et se maintient à plus de 15 % à -50 °C, ce qui témoigne d'une bonne ténacité à basse température. La ténacité à la rupture (K_{IC}) est généralement comprise entre 20 et 40 $MPa \cdot m^{1/2}$. Par exemple, le K_{IC} de l'alliage W-93Ni-Fe est d'environ 30 $MPa \cdot m^{1/2}$, ce qui est proche de celui de l'acier faiblement allié (environ 40 $MPa \cdot m^{1/2}$), tandis que le tungstène pur n'est que de 5 à 10 $MPa \cdot m^{1/2}$. Cette ténacité bénéficie de la capacité de déformation plastique de la phase de liaison, qui absorbe l'énergie lorsque la contrainte est concentrée pour éviter la rupture fragile.

La résistance à l'usure est étroitement liée à la dureté des alliages de tungstène haute densité. Lors des tests d'usure (tels que l'essai d'usure des meules ASTM G65), la perte de volume de l'alliage W-95Ni-Fe est d'environ 0,05 $mm^3/N \cdot m$, soit environ 70 % de moins que celle de l'acier (0,15 $mm^3/N \cdot m$) et proche de celle du carbure cémenté (tel que le WC-Co, 0,02 $mm^3/N \cdot m$). Sa résistance à l'usure en fait un matériau idéal pour les outils de forage et de coupe. Par exemple, pour le forage pétrolier, la durée de vie des forets en alliage de tungstène peut être 2 à 3 fois supérieure à celle des forets en acier.

La résistance à la fatigue est particulièrement importante dans les applications dynamiques. La limite de fatigue (10^7 cycles) des alliages de tungstène haute densité est d'environ 400 à 600 MPa. Par exemple, la résistance à la fatigue de l'alliage W-90Ni-Fe sous contrainte alternée est de 500 MPa, ce qui est supérieur à celui du plomb (résistance à la fatigue quasi nulle) et du tungstène pur (impossible à tester en raison de sa fragilité), et comparable à celui de l'acier (environ 400 MPa). Cette propriété le rend excellent dans les pièces antivibratoires et les contrepoids d'armes à feu, capable de supporter des charges cycliques à long terme sans défaillance.

3.2 Propriétés physiques de l'alliage de tungstène haute densité

Les propriétés physiques de l'alliage de tungstène haute densité comprennent la densité, les propriétés thermiques, les propriétés électriques et les propriétés acoustiques, qui affectent directement son applicabilité dans un environnement spécifique.

La densité est la propriété physique la plus importante des alliages de tungstène lourds, comprise entre 17,0 et 19,3 g/cm^3 . Par exemple, la densité de l'alliage W-97Ni-Fe peut atteindre 19,0 g/cm^3 , soit un niveau légèrement inférieur à celui du tungstène pur (19,25 g/cm^3), tandis que celle du W-85Cu est d'environ 17,0 g/cm^3 . Cette densité élevée résulte de la structure cristalline cubique centrée (BCC) et de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la masse atomique élevée (183,84 u) du tungstène, qui lui permettent de stocker davantage de masse par unité de volume. Par exemple, 1 centimètre cube d'alliage W-95Ni-Fe pèse environ 18,5 g, tandis que le même volume d'acier ne pèse que 7,85 g. Cette caractéristique lui confère un avantage irremplaçable dans les contrepoids aéronautiques et les blindages anti-radiations.

Les propriétés thermiques comprennent le point de fusion, la conductivité thermique et le coefficient de dilatation thermique. Le point de fusion des alliages de tungstène lourds se situe entre 2 500 et 3 000 °C, ce qui est inférieur à celui du tungstène pur (3 422 °C), mais bien supérieur à celui de l'acier (environ 1 500 °C). Par exemple, le point de fusion de l'alliage W-90Ni-Fe est d'environ 2 850 °C, ce qui lui permet de résister aux températures élevées des tuyères de fusée. Sa conductivité thermique est de 80 à 150 W/(m·K) ; par exemple, l'alliage W-80Cu peut atteindre 140 W/(m·K), ce qui est inférieur à celui du tungstène pur (173 W/(m·K)) mais supérieur à celui de l'acier (50 W/(m·K)), ce qui convient aux applications de dissipation thermique. Le coefficient de dilatation thermique est d'environ $4,5$ à $6,0 \times 10^{-6}$ /K, ce qui est proche du tungstène pur ($4,5 \times 10^{-6}$ /K) et bien inférieur à celui de l'acier (12×10^{-6} /K), et présente une meilleure stabilité dimensionnelle lorsque la température change.

Propriétés électriques : la résistivité des alliages de tungstène lourds est comprise entre 5,5 et 7,0 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$, par exemple 6,0 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ pour l'alliage W-90Ni-Fe, ce qui est légèrement supérieur à celui du tungstène pur (5,5 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$) et du cuivre (1,68 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$), mais inférieur à celui de l'acier (15 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$). Bien que sa conductivité ne soit pas aussi bonne que celle du cuivre, il reste compétitif parmi les matériaux d'électrode. De plus, son point de fusion élevé et sa densité élevée lui confèrent de bonnes performances dans les électrodes d'usinage par électroérosion (EDM). Par exemple, la durée de vie des électrodes W-70Cu est environ 50 % supérieure à celle des électrodes en cuivre.

Les propriétés acoustiques sont moins importantes, mais elles sont cruciales dans certaines applications comme la suppression des vibrations. La vitesse du son des alliages de tungstène lourds est d'environ 4 300 à 4 500 m/s, comme 4 400 m/s pour l'alliage W-95Ni-Fe, ce qui est inférieur à celui de l'acier (environ 5 000 m/s) mais supérieur à celui du plomb (1 200 m/s). Sa densité élevée et son module d'élasticité élevé (environ 400 GPa) lui permettent de décroître plus rapidement lors de la transmission des ondes sonores, ce qui en fait un matériau amortisseur de vibrations idéal. Par exemple, dans les contrepoids de machines-outils, les alliages de tungstène peuvent réduire l'amplitude des vibrations de 30 à 40 %.

3.3 Principaux éléments et leurs fonctions de l'alliage de tungstène à densité élevée

Les alliages de tungstène haute densité (HDTA) sont des alliages dont le tungstène (W) est le composant principal. Ils contiennent généralement entre 85 et 97 % de tungstène, auxquels sont ajoutés du nickel (Ni), du fer (Fe), du cuivre (Cu), du cobalt (Co) et d'autres éléments pour améliorer leurs propriétés mécaniques, leur résistance à la corrosion, leur conductivité, etc. Ces alliages sont largement utilisés dans les domaines militaire, aérospatial, médical, électronique et industriel en raison de leur haute densité, de leur résistance élevée et de leurs excellentes propriétés globales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Tungstène (W) : offre une densité et une résistance élevées

(1) Caractéristiques de base

- **Symbole de l'élément** : W
- **Numéro atomique** : 74
- **Densité** : 19,3 g/cm³
- **Point de fusion** : 3410°C
- **Fonction principale** : donner à un alliage de tungstène à densité spécifique élevée une densité, une dureté et une résistance extrêmement élevées.

(2) Rôle dans l'alliage de tungstène à densité élevée

- En tant **qu'élément en vrac**, il offre une densité élevée (16,5 à 18,5 g/cm³), permettant à l'alliage de fonctionner dans des applications telles que les contrepoids de masse élevée, le blindage contre les radiations et les noyaux de projectiles perforants.
- En raison de son point de fusion élevé et de sa résistance à l'usure, la stabilité de l'alliage dans un environnement à haute température est améliorée.
- Une bonne résistance à la corrosion permet à l'alliage d'être utilisé dans des environnements extrêmes.
- Cependant, le tungstène lui-même est cassant, il faut donc ajouter d'autres éléments métalliques pour améliorer l'usinabilité et la ductilité de l'alliage.

2. Nickel (Ni) : Améliore la ductilité et la résistance à la corrosion

(1) Caractéristiques de base

- **Symbole de l'élément** : Ni
- **Numéro atomique** : 28
- **Densité** : 8,9 g/cm³
- **Point de fusion** : 1455°C
- **Fonction principale** : conférer à l'alliage une bonne ductilité et améliorer sa résistance à la corrosion.

(2) Rôle dans l'alliage de tungstène à densité élevée

- En tant **qu'élément de phase de liaison**, le nickel peut favoriser la distribution uniforme des particules de tungstène et améliorer la plasticité et l'usinabilité de l'alliage.
- Améliorer la ductilité de l'alliage afin qu'il puisse supporter des déformations plus importantes sans rupture fragile.
- Il confère à l'alliage une forte résistance à la corrosion, lui permettant d'être utilisé pendant une longue période dans un environnement humide ou acide.
- Pendant le processus de frittage en phase liquide, cela contribue à abaisser la température de frittage et à augmenter la densité de l'alliage.
- Il est généralement utilisé en combinaison avec du fer (Fe) ou du cuivre (Cu) pour ajuster les propriétés magnétiques et mécaniques de l'alliage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Fer (Fe) : Améliore la résistance mécanique de l'alliage

(1) Caractéristiques de base

- **Symbole de l'élément** : Fe
- **Numéro atomique** : 26
- **Densité** : 7,87 g/cm³
- **Point de fusion** : 1538°C
- **Fonction principale** : Améliorer la résistance et la dureté de l'alliage, tout en lui conférant un certain degré de magnétisme.

(2) Rôle dans l'alliage de tungstène à densité élevée

- En tant que phase de renforcement, le fer et le nickel forment ensemble un **alliage ternaire W-Ni-Fe**, qui améliore la résistance mécanique et la dureté de l'alliage.
- Augmente la résistance à l'usure de l'alliage, lui permettant de supporter des charges élevées et des forces d'impact élevées.
- Cela confère à l'alliage **un certain degré de magnétisme**, le rendant adapté à certaines applications militaires et industrielles.
- Lors du processus de frittage en phase liquide, il contribue à améliorer la fluidité de la phase de liaison et à augmenter la densité de l'alliage.
- Les alliages W-Ni-Fe sont couramment utilisés dans des applications telles que **les noyaux perforants, les contrepoids aérospatiaux et les moules industriels**.

4. Cuivre (Cu) : réduit le magnétisme et améliore la conductivité

(1) Caractéristiques de base

- **Symbole de l'élément** : Cu
- **Numéro atomique** : 29
- **Densité** : 8,96 g/cm³
- **Point de fusion** : 1084,6°C
- **Fonction principale** : rendre l'alliage non magnétique et améliorer sa conductivité et sa résistance à la corrosion.

(2) Rôle dans l'alliage de tungstène à densité élevée

- Substitut du fer (Fe) pour fabriquer un **alliage de tungstène non magnétique (W-Ni-Cu)**, qui convient aux applications sensibles au magnétisme (comme les dispositifs médicaux, les composants électroniques).
- Améliore la conductivité de l'alliage, le rendant adapté aux matériaux d'électrodes, aux emballages électroniques et à d'autres domaines.
- Améliorez encore la résistance à la corrosion, de sorte que l'alliage ait une durée de vie plus longue dans un environnement humide ou un milieu acide.
- Réduit la dureté de l'alliage, le rendant plus facile à usiner.
- Les alliages W-Ni-Cu sont couramment utilisés dans **le blindage contre les rayons X et gamma, les équipements médicaux, les emballages électroniques**, etc.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Cobalt (Co) : Améliore la résistance à l'usure et aux températures élevées

(1) Caractéristiques de base

- **Symbole de l'élément** : Co
- **Numéro atomique** : 27
- **Densité** : 8,90 g/cm³
- **Point de fusion** : 1495°C
- **Fonctions principales** : Améliorer la résistance à l'usure, la résistance aux hautes températures et améliorer la résistance de l'alliage.

(2) Rôle dans les alliages de tungstène à haute densité

- En tant qu'élément de renforcement, le cobalt peut **améliorer la résistance à l'usure de l'alliage** et convient aux pièces résistantes à l'usure et à forte charge.
- Offrant **une résistance améliorée aux températures élevées**, permettant à l'alliage de maintenir sa résistance et sa stabilité à des températures extrêmes.
- Améliorez la dureté de l'alliage, le rendant adapté aux environnements à fort impact et à forte charge, tels que les noyaux perforants, les composants de moteurs aérospatiaux, etc.
- L'alliage W-Ni-Fe-Co a une résistance et une dureté supérieures à celles de l'alliage W-Ni-Fe ordinaire, mais le coût de fabrication est plus élevé.

Les propriétés d'un alliage de tungstène lourd dépendent de ses principaux éléments. Les fonctions de chaque élément sont les suivantes :

élément	effet	Impact sur les alliages
Tungstène (W)	Haute densité, haute résistance	Confère à l'alliage une densité élevée, une résistance élevée et une résistance à la corrosion
Nickel (Ni)	Ductilité, résistance à la corrosion	Augmenter la plasticité, améliorer la résistance à la corrosion et améliorer l'aptitude au traitement
Fer (Fe)	Résistance mécanique, dureté	Améliorer la dureté et la résistance de l'alliage et le rendre magnétique
Cuivre (Cu)	Non magnétique, conducteur	Réduit le magnétisme, améliore la conductivité et la résistance à la corrosion
Cobalt (Co)	Résistance à l'usure, résistance aux hautes températures	Améliorer la résistance à l'usure et la stabilité à haute température

3.4 Résistance à la corrosion et à l'usure de l'alliage de tungstène à densité élevée

La résistance à la corrosion est une propriété importante des alliages de tungstène lourds, notamment en milieu chimique et marin. Le tungstène lui-même est extrêmement stable aux acides, aux bases et à l'oxygène à température ambiante, et réagit peu avec l'acide chlorhydrique et l'acide sulfurique, se dissolvant lentement dans l'acide nitrique ou l'acide fluorhydrique concentrés. Les alliages de tungstène lourds héritent de cette propriété, mais celle-ci varie légèrement en fonction de l'ajout d'éléments. Par

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

exemple, le taux de perte de masse de l'alliage W-90Ni-Fe est inférieur à 0,5 % après immersion dans de l'acide chlorhydrique à 10 % pendant 1 000 heures, et de 0,1 à 0,2 % dans l'eau de mer, ce qui est bien inférieur à celui de l'acier (environ 20 %). L'alliage W-Cu est plus résistant à l'humidité et au brouillard salin grâce à la présence de cuivre. Lors de l'essai au brouillard salin ASTM B117, la profondeur de corrosion après 1 000 heures n'est que de 0,01 mm, alors que celle de l'acier peut atteindre 0,5 mm. Cependant, dans un environnement fortement oxydant (tel que l'acide nitrique concentré), la phase de liaison Ni-Fe peut être corrodée et le taux de corrosion augmente jusqu'à 2 à 3 %, ce qui doit être amélioré par un revêtement de surface (tel que le placage Ni).

La résistance à l'usure est étroitement liée à la dureté et à la microstructure. La résistance à l'usure des alliages de tungstène haute densité est excellente, tant par glissement que par abrasion. Par exemple, lors de l'essai ASTM G65, le taux d'usure de l'alliage W-95Ni-Fe est d'environ 0,05 mm³/N·m, soit 70 % de moins que celui de l'acier (0,15 mm³/N·m) et proche de celui du carbure cémenté WC-Co (0,02 mm³/N·m). Sa résistance à l'usure réside dans la dureté élevée des particules de tungstène (environ 1 000 HV) et la ténacité de la phase de liaison. Par exemple, pour le forage pétrolier, la durée de vie des forets W-90Ni-Fe peut être trois fois supérieure à celle des forets en acier, et la profondeur d'usure n'est que de 0,1 mm, contre 0,5 mm pour le foret en acier.

3.5 Capacité de protection contre les radiations de l'alliage de tungstène lourd

La capacité de protection contre les radiations de l'alliage de tungstène lourd est à la base de sa large application dans les industries médicale et nucléaire. Elle résulte du numéro atomique élevé ($Z = 74$) et de la forte densité (17,0-19,3 g/cm³) du tungstène. Son efficacité d'absorption des rayons X et gamma est bien supérieure à celle des matériaux traditionnels. Par exemple, un alliage W-95Ni-Fe d'une épaisseur de 1 cm peut protéger contre 90 % des rayons gamma (énergie de 1 MeV), tandis que la même épaisseur de plomb n'en protège que contre 70 % et l'acier contre 10 %. Sa capacité de protection est calculée à partir du coefficient d'absorption massique (μ/ρ). Le μ/ρ de l'alliage W-95Ni-Fe est d'environ 0,15 cm²/g, ce qui est supérieur à celui du plomb (0,12 cm²/g). Dans les applications pratiques, un blindage en alliage de tungstène de 10 mm d'épaisseur permet de réduire la dose de rayonnement de 100 mSv à 1 mSv, ce qui est supérieur à celui d'un blindage en plomb de 15 mm d'épaisseur. De plus, son absence de toxicité en fait une alternative écologique au plomb. Par exemple, pour le blindage des scanners, l'épaisseur de l'alliage de tungstène peut être réduite de 30 % et le poids de 20 %.

3.6 Méthodes d'optimisation des performances des alliages de tungstène à haute densité

L'optimisation des performances de l'alliage de tungstène haute densité est la clé pour améliorer son potentiel d'application, ce qui implique l'ajustement de la composition, l'amélioration du processus et la technologie de post-traitement.

L'optimisation de la composition est obtenue en ajustant la teneur en tungstène et le rapport de phase liante. Par exemple, une teneur en tungstène de 97 % peut augmenter la masse volumique à 19,0 g/cm³, mais la ténacité diminue ; l'ajout de cobalt (Co) peut augmenter la dureté de 450 HV à 500 HV tout en maintenant un allongement de 15 %. **Les améliorations du procédé** incluent la préparation de nanopoudres et le frittage en phase liquide. L'utilisation de nanopoudre de tungstène (granulométrie de 50 nm) permet de réduire la taille des grains de 10 μm à 1 μm et d'augmenter la résistance à la traction

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de 1 000 MPa à 1 200 MPa. La température de frittage en phase liquide est optimisée de 1 450 °C à 1 500 °C, ce qui permet d'augmenter la masse volumique de 98 % à 99,5 %. **Des techniques de post-traitement** telles que le pressage isostatique à chaud (HIP) et le durcissement superficiel améliorent encore les performances. Par exemple, le traitement HIP (200 MPa, 1400°C) peut éliminer les micropores et prolonger la durée de vie en fatigue de 50 % ; le traitement de carburation peut augmenter la dureté de surface à 600 HV et améliorer la résistance à l'usure de 30 %.

Liste des propriétés des alliages de tungstène à haute densité

Catégorie de performance	Indicateurs clés	Valeur typique	Méthodes d'optimisation
Propriétés mécaniques	résistance à la traction	700-1200 MPa	Ajout de cobalt, préparation de nano-poudre
	dureté	300-500 HV	Augmentation de la teneur en tungstène, traitement de cémentation
	Élongation	10 à 30 %	Optimisation du rapport Ni-Fe
	Résistance à l'usure	0,05 mm ³ /N·m	Pressage isostatique à chaud, cémentation
	Limite de fatigue	400-600 MPa	Traitement HIP, affinage du grain
Propriétés physiques	densité	17,0-19,3 g/cm ³	Augmenter la teneur en tungstène à 97 %
	Point de fusion	2500-3000°C	-
	Conductivité thermique	80-150 W/(m·K)	Cuivre ajouté (tel que W-80Cu)
Résistance à la corrosion	Taux de corrosion de l'acide chlorhydrique	<0,5% (1000 heures)	placage au nickel
Résistance à l'usure	Taux d'usure	0,05 mm ³ /N·m	Améliorer la dureté et optimiser la microstructure
Capacité de protection contre les radiations	Blindage contre les rayons gamma (1 cm d'épaisseur)	90 % (1 MeV)	Densité augmentée à 19 g/cm ³

Remarque : les données du tableau sont des plages typiques et les valeurs spécifiques peuvent varier en fonction des ingrédients et des procédés.

L'application de ces méthodes doit être évaluée en fonction des besoins spécifiques. Par exemple, le blindage médical privilégie la haute densité, tandis que les outils privilégient la résistance à l'usure, ce qui fournit des orientations théoriques pour la préparation et l'application ultérieures.

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

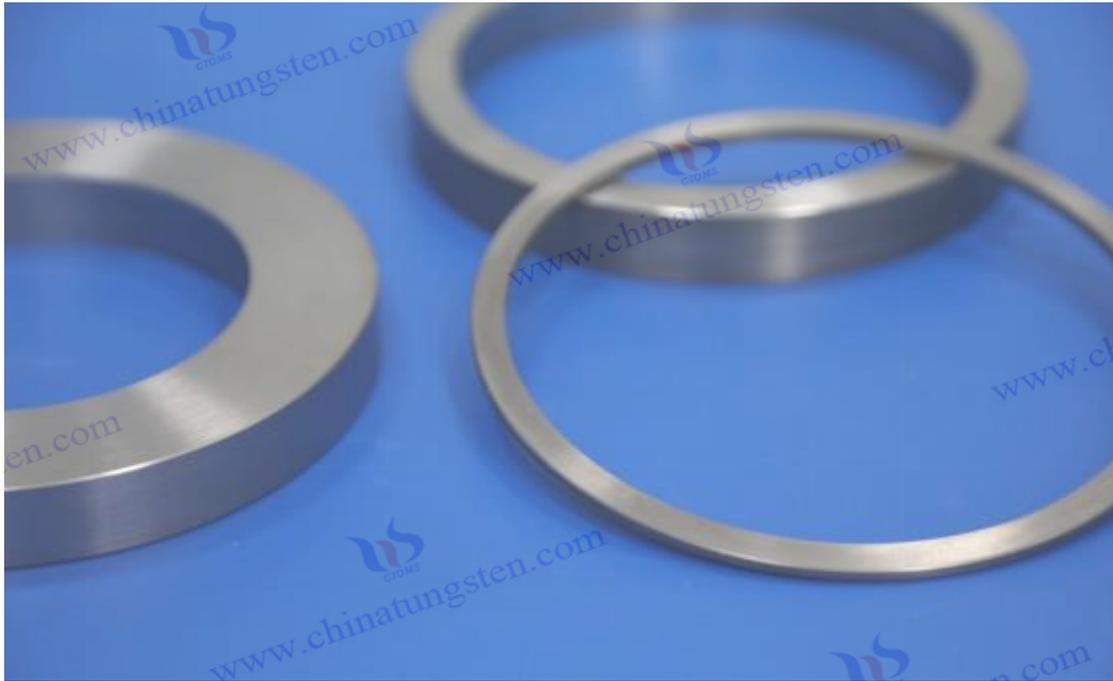
Official website: www.tungsten-alloy.com



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 : Technologie de préparation de l'alliage de tungstène à haute densité

4.1 Sélection et prétraitement des matières premières en alliage de tungstène à haute densité

La préparation d'un alliage de tungstène haute densité commence par la sélection et le prétraitement des matières premières, qui influencent directement les performances et la consistance du produit final. Ces matières premières comprennent principalement de la poudre de tungstène et des éléments de phase liante (tels que le nickel, le fer, le cuivre, etc.). Leur pureté, leur granulométrie et leurs propriétés chimiques doivent être rigoureusement contrôlées.

Le choix de la poudre de tungstène est essentiel à sa préparation. Elle est généralement obtenue par réduction à l'hydrogène de l'oxyde de tungstène (WO_3). Sa pureté doit être $\geq 99,9\%$ afin d'éviter que des impuretés (telles que l'oxygène et le carbone) n'affectent la qualité du frittage. La granulométrie est généralement comprise entre 1 et 10 μm . Par exemple, la granulométrie moyenne de la poudre de tungstène sélectionnée par CTIA GROUP LTD est de 3 μm , garantissant une densité et une uniformité élevées. Une granulométrie trop importante (par exemple, 20 μm) entraînera une augmentation de la porosité après frittage et une chute de la densité en dessous de 17 g/cm^3 . Une granulométrie trop faible (par exemple, $< 0,5 \mu m$) peut réduire la fluidité par agglomération, affectant ainsi le pressage et le moulage. La teneur en oxygène doit être contrôlée en dessous de 0,05 %, car une teneur en oxygène trop élevée générera des oxydes volatils (tels que WO_2) lors du frittage, formant des pores.

Les matières premières de la phase liante sont adaptées aux exigences de l'application. La poudre de nickel et la poudre de fer sont souvent utilisées pour améliorer la ténacité, nécessitant une pureté $\geq 99,5\%$ et une granulométrie de 2 à 5 μm . Par exemple, CTIA GROUP LTD utilise une poudre mixte avec un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rapport nickel-fer de 7:3 dans un alliage W-Ni-Fe, une granulométrie de 3 μm pour la poudre de nickel et de 4 μm pour une distribution uniforme lors du frittage en phase liquide. La poudre de cuivre est utilisée dans les scénarios nécessitant une conductivité thermique élevée, avec une pureté $\geq 99,8\%$ et une granulométrie d'environ 5 μm pour éviter la contamination par l'oxyde de cuivre (CuO). Lorsque du cobalt ou du molybdène est ajouté, la teneur ne dépasse généralement pas 5 % pour améliorer la dureté ou la résistance à la corrosion.

Le processus de prétraitement comprend le tamisage, le mélange et la réduction. Le tamisage permet d'éliminer les particules trop grosses ou trop petites, par exemple les agglomérats à travers un tamis de 200 mesh (environ 74 μm). Le mélange est effectué à l'aide d'un mélangeur en V ou d'un broyeur à boulets. Par exemple, China Tungsten Intelligence utilise un broyeur à boulets planétaire pour mélanger à 300 tr/min pendant 6 heures afin de garantir une répartition homogène de la poudre de tungstène et de la phase liante, et un écart d'uniformité de mélange inférieur à 1 %. Si la teneur en oxygène de la matière première est trop élevée, elle doit être réduite sous atmosphère d'hydrogène, par exemple à 800 °C pendant 2 heures pour réduire la teneur en oxygène de 0,1 % à 0,03 %. De plus, pour éviter l'oxydation de la poudre, les matières premières prétraitées doivent être stockées sous gaz inerte (tel que l'argon).

4.2 Procédé de métallurgie des poudres d'alliage de tungstène lourd

La métallurgie des poudres est la principale méthode de préparation des alliages de tungstène haute densité. Elle se divise en deux étapes principales : le pressage et le frittage. Elle est largement utilisée car elle permet de contrôler efficacement la microstructure et les performances.

Le pressage consiste à presser la poudre mélangée pour obtenir un corps vert, généralement par pressage isostatique à froid (NEP) ou moulage. Ce procédé utilise un liquide à haute pression (comme de l'eau ou de l'huile) pour appliquer une pression uniforme. Par exemple, CTIA GROUP LTD presse la poudre de W-90Ni-Fe à 200-300 MPa, et la densité du corps vert peut atteindre 60-70 % de la densité théorique (environ 11-13 g/cm^3). Le moulage est adapté à la production en petites séries, avec une pression de 500-700 MPa. Par exemple, un corps vert cylindrique de 50 mm de diamètre est formé en environ 30 secondes. Afin d'améliorer la résistance du corps vert, une faible quantité de liant organique (par exemple, 1 % d'alcool polyvinylique) peut être ajoutée, mais elle doit être éliminée lors du dégraissage ultérieur.

Le frittage est une étape clé de la métallurgie des poudres. La technologie de frittage en phase liquide est généralement utilisée pour chauffer l'ébauche au-dessus du point de fusion de la phase liante afin de la liquéfier et de combler les espaces entre les particules de tungstène. La température de frittage est généralement comprise entre 1 400 et 1 550 °C. Par exemple, CTIA GROUP LTD a fritté l'alliage W-93Ni-Fe à 1 480 °C pendant 2 heures. La phase liquide nickel-fer a fondu à 1 350 °C, favorisant le réarrangement des particules de tungstène. La masse volumique finale a atteint 18,5 g/cm^3 et était supérieure à 99 %. L'atmosphère de frittage doit être de l'hydrogène ou du vide pour éviter l'oxydation. Par exemple, lors d'un frittage sous vide de 10^{-3} Pa, la teneur en oxygène peut être réduite à 0,01 %. Le temps et la température de frittage doivent être contrôlés avec précision. Une température trop élevée (par exemple, 1 600 °C) peut entraîner une perte de phase liquide, tandis qu'une température trop basse (par exemple, 1 300 °C) entraînera une densité insuffisante, de seulement 95 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les traitements post-frittage, tels que la compression isostatique à chaud (CIC), peuvent encore optimiser les performances. Par exemple, un traitement à 200 MPa et 1 400 °C pendant une heure élimine la microporosité et augmente la densité de 99 % à 99,8 %, avec une masse volumique proche de 19 g/cm³. Ce procédé est particulièrement courant dans la production de contrepoids haut de gamme chez CTIA GROUP LTD.

4.3 Autres méthodes de préparation d'alliages de tungstène à densité élevée

Outre la métallurgie des poudres, les alliages de tungstène à haute densité peuvent également être préparés par d'autres méthodes pour répondre à des besoins spécifiques ou surmonter les limites des procédés traditionnels.

La méthode de fusion et de coulée convient aux alliages à faible teneur en tungstène (comme le W-50Cu). Le cuivre est fondu dans un four à arc ou à induction, puis de la poudre de tungstène est ajoutée pour la fusion. Par exemple, CTIA GROUP LTD fond et coule l'alliage W-70Cu à 1800 °C, dont la masse volumique atteint 14,5 g/cm³ après refroidissement. Cependant, le point de fusion du tungstène étant beaucoup plus élevé que celui du cuivre (3422 °C contre 1083 °C), cette méthode rend difficile la préparation d'alliages à forte teneur en tungstène, favorise la ségrégation et offre une moins bonne uniformité que la métallurgie des poudres.

L'alliage mécanique consiste à mélanger mécaniquement la poudre de tungstène à la poudre de phase liante par broyage à billes à haute énergie pour former un alliage hors équilibre. Par exemple, CTIA GROUP LTD utilise un broyeur à billes planétaire pour broyer la poudre de W-Ni-Fe à 500 tr/min pendant 10 heures, affinant les grains à 50 nm, puis pressant et frittant pour augmenter la résistance à la traction à 1 200 MPa. Cette méthode est adaptée au développement de nouveaux alliages hautes performances, mais son rendement de production est faible.

La fabrication additive (impression 3D) est une technologie de préparation apparue ces dernières années, utilisant la fusion sélective par laser (SLM) ou la fusion par faisceau d'électrons (EBM). Par exemple, CTIA GROUP LTD utilise la SLM pour fondre la poudre de W-90Ni-Fe avec un laser de 3 000 W et imprime couche par couche des pièces de formes complexes, d'une densité de 18 g/cm³ et d'une porosité inférieure à 1 %. Cette méthode est adaptée à la production sur mesure, mais elle est coûteuse, le coût par kilogramme de pièces étant environ 2 à 3 fois supérieur à celui des procédés traditionnels.

4.4 Influence des paramètres de procédé sur l'alliage de tungstène lourd

Les paramètres du processus ont un impact significatif sur les propriétés des alliages de tungstène à haute densité, notamment la taille des particules de la matière première, la température de frittage, la pression et l'atmosphère.

granulométrie de la matière première influence la densité et les propriétés mécaniques. La granulométrie de la poudre de tungstène passe de 10 µm à 1 µm, et sa densité après frittage passe de 18,0 g/cm³ à 18,8 g/cm³, car les particules fines sont plus denses. Cependant, les particules de taille inférieure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à 0,5 μm sont sujettes à l'agglomération et le processus de mélange doit être optimisé. Une granulométrie trop importante de la phase liante (comme la poudre de nickel) (par exemple, 10 μm) entraînera une répartition inégale de la phase liquide et une diminution de la ténacité de 10 à 15 %.

La température de frittage détermine la formation de la phase liquide et sa densité. Par exemple, la densité de l'alliage W-90Ni-Fe fritté à 1 450 °C est de 18,2 g/cm³ ; à 1 500 °C, elle atteint 18,6 g/cm³. Cependant, si la température est trop élevée (par exemple à 1 600 °C), le fer-nickel se volatilise, la densité chute à 18,0 g/cm³ et la dureté diminue de 20 %. La température optimale dépend de la composition et se situe généralement entre 50 et 100 °C au-dessus du point de fusion de la phase liante.

La pression de pressage affecte la densité du corps vert et l'efficacité du frittage. Lorsque le pressage isostatique à froid passe de 200 MPa à 300 MPa, la densité du corps vert passe de 11 g/cm³ à 12,5 g/cm³, et la densité du produit final augmente de 0,5 %. Cependant, une pression trop élevée (par exemple 400 MPa) peut entraîner une usure du moule et une augmentation des coûts.

L'atmosphère de frittage influence le degré d'oxydation. Une atmosphère d'hydrogène (débit de 100 mL/min) peut réduire la teneur en oxygène à 0,02 %, tandis que le frittage à l'air produit 0,5 % d'oxyde et la densité chute à 17,5 g/cm³. Le frittage sous vide (10⁻⁴ Pa) est plus efficace et convient aux pièces de haute précision.

4.5 Contrôle de la qualité et inspection des alliages de tungstène lourds

Le contrôle qualité et les tests sont la clé pour garantir les performances stables de l'alliage de tungstène haute densité et se déroulent tout au long du processus de préparation.

Le contrôle qualité des matières premières comprend des analyses chimiques et des tests granulométriques. Par exemple, CTIA GROUP LTD utilise l'ICP-MS pour déterminer la pureté de la poudre de tungstène (> 99,9 %) et un granulomètre laser pour mesurer la distribution granulométrique (D50 = 3 μm) afin de garantir la conformité des impuretés (telles que Fe < 0,01 %) et de la taille des particules.

Le contrôle du processus surveille les paramètres de pressage et de frittage. La pression de pressage est enregistrée en temps réel par des capteurs avec un écart inférieur à 5 MPa ; la température de frittage est contrôlée par des thermocouples avec une précision de ± 5 °C. Par exemple, CTIA GROUP LTD met en place un système de mesure de température multipoint dans le four de frittage afin de garantir une uniformité de température inférieure à 10 °C.

Les tests du produit fini comprennent l'analyse de la densité, des propriétés mécaniques et de la microstructure. La densité est mesurée par la méthode d'Archimède ; par exemple, la valeur cible pour l'alliage W-95Ni-Fe est de 18,8 \pm 0,1 g/cm³. Les essais de traction (selon la norme ASTM E8) testent la résistance à la traction (> 1 000 MPa) et l'allongement (> 15 %). Des microscopes (tels que le MEB) permettent d'observer la distribution des particules de tungstène et la porosité, par exemple pour des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

diamètres de pores < 5 µm et des proportions < 0,5 %. De plus, des essais non destructifs (tels que les ultrasons) sont utilisés pour vérifier les défauts internes afin de garantir la fiabilité des pièces.

Ces mesures garantissent que les produits de CTIA GROUP LTD répondent aux exigences strictes de l'aviation, de la médecine et d'autres domaines, tels que l'écart de densité des contrepoids < 0,2 % et la porosité des pièces de blindage < 0,1 %.

Procédé de préparation d'un alliage de tungstène à haute densité

Préparation	Paramètres/techniques clés	Valeurs/conditions typiques	Impact/Cible
Sélection des matières premières	Pureté et granulométrie de la poudre de tungstène	≥ 99,9 %, 3 µm	Assurer une densité et une uniformité élevées
Prétraitement	Vitesse de mélange, température de réduction	300 tr/min, 800 °C	Réparti uniformément, teneur en oxygène < 0,05 %
Pressage	Pression de pressage isostatique à froid, pression de moulage	200-300 MPa, 500-700 MPa	Densité du corps vert 60%-70%
Frittage par métallurgie des poudres	Température de frittage, atmosphère	1480°C, hydrogène/vide	Densité 18,5 g/cm ³ , densité > 99%
Coulée en fusion	Température de fusion	1800°C	Densité 14,5 g/cm ³ , convient pour W-Cu
Alliage mécanique	Vitesse et temps de broyage à boulets	500 tr/min, 10 heures	Taille des grains 50 nm, résistance 1200 MPa
Impression 3D	Puissance laser, porosité	3000 W, <1%	Forme complexe, densité 18 g/cm ³
Paramètres du processus	Taille des particules, température, pression	1-10 µm, 1450-1500°C, 200 MPa	Optimiser la densité et la ténacité
Contrôle de qualité	Écart de densité, porosité	±0,1 g/cm ³ , <0,5 %	Répondre aux normes aéronautiques et médicales

Remarque : Les données du tableau sont basées sur le processus standard de CTIA GROUP LTD. Les valeurs spécifiques varient selon les exigences du produit.

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

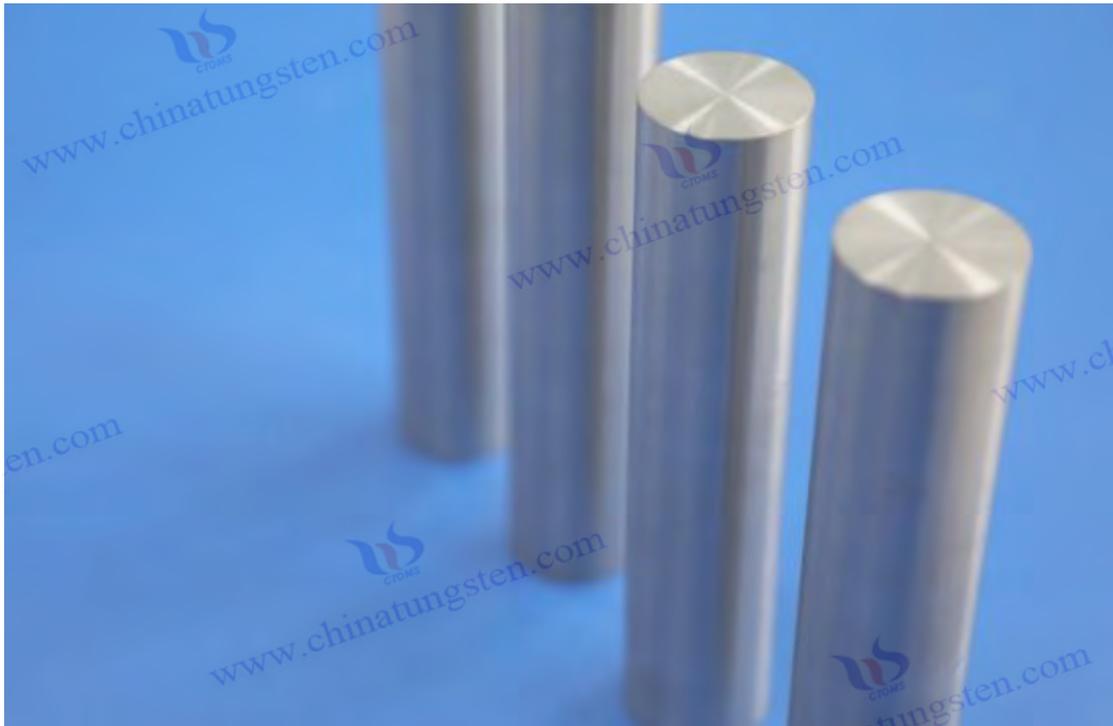
Official website: www.tungsten-alloy.com



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 5 : Technologie de traitement et de post-traitement des alliages de tungstène à densité élevée

5.1 Technologie d'usinage d'alliages de tungstène à densité élevée

L'usinage des alliages de tungstène lourds est essentiel pour les transformer de la billette frittée en pièces de précision. En raison de sa dureté élevée (300-500 HV) et de sa ténacité modérée (allongement de 10 à 30 %), la difficulté d'usinage se situe entre celle du tungstène pur et celle de l'acier ordinaire, nécessitant des outils spécifiques et une optimisation des paramètres de processus.

Le tournage et le fraisage sont des méthodes de coupe couramment utilisées. L'usinabilité des alliages de tungstène lourds bénéficie de la présence d'une phase liante (comme le Ni-Fe), ce qui rend leur résistance à la coupe inférieure à celle du tungstène pur. Par exemple, pour l'usinage de l'alliage W-90Ni-Fe, CTIA GROUP LTD utilise des outils en carbure (tels que des outils revêtus de WC-Co), avec une vitesse de coupe de 40 à 60 m/min, une avance de 0,1 à 0,2 mm/tr et une profondeur de coupe maximale de 1 mm. Ce paramètre permet de contrôler la rugosité de surface inférieure à Ra 1,6 μm , répondant ainsi aux besoins des contrepoids aéronautiques. Comparé au tungstène pur (vitesse de coupe de seulement 10 m/min), l'efficacité d'usinage des alliages de tungstène lourds est environ 3 à 5 fois supérieure, mais le taux d'usure des outils reste supérieur de 20 à 30 % à celui de l'acier et nécessite un remplacement régulier.

Le perçage et l'alésage sont adaptés à la réalisation de trous ou de pièces à cavité interne. Par exemple, pour l'usinage de pièces de blindage en alliage W-95Ni-Fe, CTIA GROUP LTD utilise un foret en acier rapide au cobalt de 5 mm de diamètre, dont la vitesse est contrôlée entre 500 et 800 tr/min et l'avance est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de 0,05 mm/tr, afin de garantir une tolérance de diamètre de trou de $\pm 0,02$ mm. En raison de la dureté élevée des alliages de tungstène haute densité, le foret doit être revêtu de TiN ou de TiAlN pour prolonger sa durée de vie. Un liquide de refroidissement (par exemple, une émulsion aqueuse) est essentiel pour réduire la température de la zone de coupe d'environ 50 °C et limiter le risque de fissuration thermique.

Le meulage et le polissage sont utilisés pour l'usinage de surface de haute précision. Par exemple, pour l'usinage de pièces médicales en alliage W-93Ni-Fe, CTIA GROUP LTD utilise des meules diamantées (grain 120#) pour le meulage grossier, suivi d'un meulage fin au papier de verre 2000#, et enfin d'un polissage à Ra 0,4 μm afin de répondre aux exigences de finition des pièces de protection contre les radiations. La vitesse de meulage est de 20 à 30 m/s et l'avance de 0,01 à 0,02 mm/passe afin d'éviter les microfissures dues à la surchauffe. Comparé au tungstène pur (qui nécessite une meule plus dure et est sujet aux fissures), la ténacité des alliages de tungstène haute densité facilite l'obtention d'un effet miroir.

Les difficultés d'usinage et les contre-mesures incluent l'usure des outils et la déformation thermique. La dureté élevée des alliages de tungstène lourds réduit la durée de vie des outils. Par exemple, après usinage de 100 pièces, la profondeur d'usure de l'arête de coupe peut atteindre 0,2 mm. Des outils en CBN (nitrure de bore cubique) sont nécessaires pour remplacer le carbure cémenté traditionnel, ce qui peut prolonger la durée de vie d'environ 50 %. De plus, la chaleur de coupe peut entraîner des écarts dimensionnels des pièces. Par exemple, à une augmentation de température de 60 °C, la dilatation thermique de l'alliage W-90Ni-Fe est d'environ 0,005 mm/cm, et la température doit être contrôlée par un liquide de refroidissement et une coupe intermittente.

5.2 Technologie de traitement thermique des alliages de tungstène à densité élevée

Le traitement thermique permet d'ajuster la microstructure des alliages de tungstène haute densité, d'améliorer leurs propriétés mécaniques ou d'éliminer les contraintes de traitement. Les méthodes courantes incluent le recuit, la trempe et le vieillissement, mais en raison du point de fusion élevé et des caractéristiques de l'alliage du tungstène, le procédé doit être spécialement conçu.

Le traitement de recuit est principalement utilisé pour éliminer les contraintes internes générées par le frittage ou l'usinage. Par exemple, CTIA GROUP LTD a recuit des pièces en alliage W-90Ni-Fe sous atmosphère d'hydrogène à 900 °C pendant 2 heures, avec une vitesse de refroidissement contrôlée à 50 °C/h. La contrainte est passée de 200 MPa à moins de 50 MPa, et l'allongement a augmenté d'environ 10 %. La température de recuit ne doit pas être trop élevée ($> 1\ 000$ °C), sous peine de ramollir la phase de liaison, entraînant une perte de dureté de 15 à 20 %.

La trempe est rarement utilisée pour les alliages de tungstène haute densité, car leur ténacité est optimisée par la phase liante. Cependant, pour des exigences spécifiques (comme l'augmentation de la dureté superficielle), une trempe locale peut être réalisée. Par exemple, CTIA GROUP LTD a chauffé rapidement la surface de l'alliage W-95Ni-Fe à 1 200 °C, puis l'a refroidie à l'eau, augmentant ainsi la dureté superficielle de 450 HV à 500 HV, sur une profondeur d'environ 0,5 mm, sans modification de la ténacité interne. Cette méthode nécessite un contrôle précis de la vitesse de refroidissement pour éviter les fissures.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le traitement de vieillissement convient aux alliages contenant du cobalt ou du molybdène afin de précipiter les phases de renforcement. Par exemple, CTIA GROUP LTD a réalisé un vieillissement à 600 °C pendant 4 heures sur un alliage W-93Ni-Fe-2Co afin de précipiter les composés à base de cobalt, augmentant ainsi la résistance à la traction de 1 000 MPa à 1 100 MPa et la dureté à 480 HV. Un vieillissement trop long (par exemple 8 heures) peut entraîner un vieillissement excessif, avec une diminution de la ténacité de 5 à 10 %.

L'effet du traitement thermique dépend du contrôle de l'atmosphère. L'hydrogène ou le vide (10^{-3} Pa) peuvent prévenir l'oxydation. Par exemple, dans le four de recuit de China Tungsten Intelligence, la teneur en oxygène est maintenue à moins de 0,01 % afin de garantir l'absence de couche d'oxyde en surface. Comparés au tungstène pur (qui nécessite une température plus élevée et est facilement fragilisé), les alliages de tungstène haute densité offrent une fenêtre de traitement thermique plus large et une plus grande adaptabilité.

5.3 Technologie de traitement de surface de l'alliage de tungstène haute densité

Les technologies de traitement de surface visent à améliorer la résistance à la corrosion, la résistance à l'usure ou l'esthétique des alliages de tungstène lourds. Les méthodes courantes incluent le placage, la cémentation et la pulvérisation.

La galvanoplastie est souvent utilisée pour améliorer la résistance à la corrosion. Par exemple, CTIA GROUP LTD a déposé une couche de nickel de 5 μm d'épaisseur sur la surface de pièces en alliage W-90Ni-Fe. Après immersion dans de l'acide chlorhydrique à 10 % pendant 1 000 heures, le taux de corrosion est passé de 2 % à 0,2 %, soit une multiplication par 10. L'épaisseur du revêtement doit être maintenue entre 3 et 10 μm . Une épaisseur excessive peut provoquer un écaillage. Le placage à l'or ou à l'argent est utilisé pour les composants électroniques. Par exemple, une couche d'or de 2 μm est déposée sur une électrode en alliage W-80Cu, ce qui réduit la résistivité à 4 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ et augmente la conductivité de 20 %.

Le traitement de cémentation améliore la dureté de surface et la résistance à l'usure. Par exemple, CTIA GROUP LTD carburise la surface de l'alliage W-95Ni-Fe à 950 °C pendant 3 heures, augmentant ainsi la teneur en carbone à 0,5 %, la dureté de surface de 450 HV à 600 HV et la résistance à l'usure de 30 %, ce qui le rend adapté aux outils de perçage. La profondeur de cémentation est généralement de 0,1 à 0,3 mm afin de préserver la ténacité interne.

La projection thermique est utilisée dans des environnements spécifiques. Par exemple, CTIA GROUP LTD pulvérise un revêtement céramique Al_2O_3 de 0,2 mm d'épaisseur sur des pièces en alliage W-90Ni-Fe, ce qui augmente la résistance à la corrosion de 50 % à 1 500 °C, le rendant ainsi adapté aux pièces aéronautiques haute température. L'épaisseur de la projection doit être uniforme, avec un écart inférieur à 0,02 mm, pour garantir l'adhérence.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le choix du traitement de surface doit être évalué en fonction du scénario d'application. Par exemple, les pièces de blindage médical sont préférablement nickelées pour leur résistance à la corrosion et leur non-toxicité, tandis que les outils de coupe sont plus adaptés à la cémentation pour améliorer leur résistance à l'usure.

5.4 Technologie de connexion en alliage de tungstène haute densité

La technologie d'assemblage permet d'assembler un alliage de tungstène lourd avec d'autres matériaux ou lui-même pour former des structures complexes. Les méthodes courantes incluent le soudage, le brasage et l'assemblage mécanique.

Le soudage est complexe en raison du point de fusion élevé du tungstène (3 422 °C), mais les alliages de tungstène haute densité permettent un soudage par fusion locale grâce à la présence d'une phase liante. Par exemple, CTIA GROUP LTD utilise le soudage par faisceau d'électrons (EBW) pour l'alliage W-90Ni-Fe, avec une puissance de faisceau de 5 kW, une vitesse de soudage de 1 m/min, une profondeur de soudure de 3 mm et un taux de rétention de résistance d'environ 90 %. Un recuit (800 °C, 1 heure) est nécessaire après le soudage pour éliminer les contraintes et éviter les fissures.

Le brasage est plus couramment utilisé en raison de sa température plus basse. Par exemple, CTIA GROUP LTD utilise un matériau de brasage Ag-Cu (point de fusion 780 °C) pour assembler l'alliage W-80Cu à un substrat en cuivre. La température de brasage est de 850 °C et la résistance au cisaillement du joint atteint 200 MPa, ce qui est adapté aux dispositifs électroniques. Le matériau de brasage doit être compatible avec la phase de liaison afin d'éviter toute réaction d'interface.

Les assemblages mécaniques tels que les boulons ou les rivets conviennent aux situations où le soudage est impossible. Par exemple, CTIA GROUP LTD perce et taraude des trous sur des contrepoids en alliage W-95Ni-Fe et utilise des boulons en titane M6 pour les assembler, avec une capacité de charge de 5 000 N et un démontage facile. Il est à noter que la concentration de contraintes au bord du trou peut être atténuée par chanfreinage ou par calage.

La difficulté de connexion réside dans la différence de coefficient de dilatation thermique. Par exemple, lorsque du W-90Ni-Fe ($4,5 \times 10^{-6}$ /K) est connecté à de l'acier (12×10^{-6} /K), une différence de température de 100 °C peut produire un décalage de 0,075 mm, nécessitant la conception d'un jeu de compensation ou d'une connexion flexible.

5.5 Optimisation et application de la technologie de post-traitement pour les alliages de tungstène à haute densité

L'optimisation de la technologie de post-traitement vise à améliorer encore les performances ou à répondre à des besoins spécifiques, impliquant l'usinage de précision, l'amélioration des performances et le traitement fonctionnel.

L'optimisation de l'usinage de précision améliore la précision grâce à la technologie CNC. Par exemple, CTIA GROUP LTD utilise des machines-outils CNC cinq axes pour usiner des pièces en alliage W-93Ni-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fe avec une tolérance de $\pm 0,01$ mm et une rugosité de surface de Ra 0,2 μm , ce qui répond aux exigences des gyroscopes aéronautiques. Les paramètres d'usinage, comme un écart de force de coupe inférieur à 5 %, doivent être surveillés en temps réel afin d'éviter toute surcharge.

L'amélioration des performances comprend la compression isostatique à chaud (CIC) et l'implantation ionique. Par exemple, CTIA GROUP LTD a soumis l'alliage W-95Ni-Fe à une compression isostatique à chaud (CIC) à 200 MPa et 1 400 °C pendant 1 heure, réduisant la porosité de 0,5 % à 0,1 % et prolongeant la durée de vie en fatigue de 50 %. L'implantation ionique d'azote (dose de 10^{17} ions/cm²) peut augmenter la dureté de surface à 550 HV et améliorer la résistance à l'usure de 20 %.

Traitements fonctionnels tels que le revêtement ou la conception de microstructures. Par exemple, CTIA GROUP LTD grave au laser des micropores (50 μm de diamètre) à la surface de l'alliage W-90Ni-Fe, augmentant ainsi le coefficient de frottement de 20 % pour les contrepoids antidérapants. De plus, le revêtement PVD TiN augmente la résistance à la corrosion de 30 %, ce qui le rend adapté aux environnements marins.

les exemples d'applications, on peut citer les contrepoids aéronautiques (nécessitant une précision et une densité élevées), les pièces de blindage médical (nécessitant une finition de surface et une résistance à la corrosion) et les outils de perçage (nécessitant une résistance à l'usure). L'optimisation doit être ajustée en fonction des performances visées. Par exemple, CTIA GROUP LTD privilégie le HIP et le nickelage pour les pièces médicales, tandis que les outils de perçage privilégient la cémentation et la pulvérisation.

Catégorie Technologie	Méthodes clés	Paramètres typiques	Cible/Effet
Usinage	Tournant	40-60 m/min, 0,1 mm/tr	Rugosité de surface Ra 1,6 μm
	Affûtage	20-30 m/s, Ra 0,4 μm	Surface de haute précision
Traitement thermique	recuit	900°C, 2 heures	Contrainte réduite à 50 MPa, allongement +10%
	vieillessement	600°C, 4 heures	Résistance 1100 MPa, dureté 480 HV
Traitement de surface	Nickelage	5 μm d'épaisseur	Le taux de corrosion est tombé à 0,2 %
	carburation	950°C, 3 heures	Dureté 600 HV, résistance à l'usure +30%
Technologie de connexion	Soudage par faisceau d'électrons	5 kW, 1 m/min	Résistance de la soudure 90 %
	Brasage	850 °C, soudure Ag-Cu	Résistance au cisaillement 200 MPa

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Optimisation du post-traitement	HANCHE	200 MPa, 1400 °C	Porosité 0,1%, durée de vie +50%
	Gravure au laser	Micropore 50 µm	Coefficient de frottement +20%

Remarque : Les données du tableau sont basées sur le processus typique de fabrication du tungstène en Chine. Les valeurs spécifiques varient selon les exigences de l'application.

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 : Équipement de production d'alliage de tungstène à densité élevée

6.1 Équipement de préparation des matières premières

La fabrication d'alliages de tungstène haute densité commence par la préparation des matières premières, qui comprend la préparation et le traitement de la poudre de tungstène et de la poudre de phase liante. Les principaux équipements comprennent un four de réduction, un broyeur à boulets et un cribleur, qui influencent directement la pureté, la granulométrie et l'uniformité des matières premières.

Les fours de réduction à l'hydrogène sont utilisés pour préparer de la poudre de tungstène de haute pureté à partir d'oxyde de tungstène (WO_3). L'équipement typique est un four à cuvette multitubulaire avec une température de fonctionnement de 700 à 1 000 °C et un débit d'hydrogène de 50 à 100 l/min. Par exemple, WO_3 peut être converti en poudre de tungstène d'une pureté $\geq 99,9\%$ et d'une teneur en oxygène $< 0,05\%$ par réduction à 900 °C pendant 4 heures. Le four adopte une conception de chauffage multizone avec une différence de température contrôlée à ± 5 °C pour assurer une réduction uniforme. La capacité de l'équipement varie de 50 kg à 500 kg par jour, ce qui convient à la production de petites et moyennes séries. L'essentiel réside dans le contrôle de l'atmosphère, et un système de purification de l'hydrogène (tel qu'un tamis moléculaire) est nécessaire pour réduire la teneur en humidité à moins de 10 ppm afin d'éviter l'oxydation de la poudre.

Les broyeurs à boulets sont utilisés pour mélanger la poudre de tungstène avec une phase liante (par exemple, Ni, Fe) et affiner la granulométrie. Les broyeurs planétaires à boulets sont couramment utilisés, avec une plage de vitesse de 200 à 600 tr/min et un rapport billes/matière de 10:1 à 20:1. Par exemple,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

le broyage d'une poudre mixte W-90Ni-Fe à 400 tr/min pendant 6 heures réduit la granulométrie de la poudre de tungstène de 5 μm à 3 μm , avec un écart d'uniformité inférieur à 1 %. Les corps de broyage sont principalement des billes de carbure cémenté (WC-Co) d'un diamètre de 5 à 10 mm pour éviter la contamination par les impuretés. Pour éviter l'agglomération de la poudre, 0,5 % à 1 % d'agents de contrôle de procédé (par exemple, de l'acide stéarique) peuvent être ajoutés et éliminés par séchage après broyage. L'équipement doit être équipé d'un système de refroidissement pour maintenir la température de la cuve à $< 60\text{ }^\circ\text{C}$ et prolonger la durée de vie des joints.

Les tamis vibrants sont utilisés pour éliminer les particules trop grosses ou trop petites afin d'assurer une granulométrie homogène. Les tamis typiques mesurent entre 100 et 200 mesh (environ 74 et 150 μm) et vibrent entre 1 500 et 3 000 fois par minute. Par exemple, tamiser de la poudre de tungstène de 3 μm pendant 10 minutes réduit le pourcentage de particules $> 10\text{ }\mu\text{m}$ éliminées de 5 % à 0,1 %. L'équipement est équipé de dispositifs antiblocage (comme le nettoyage par ultrasons) pour une meilleure efficacité. Un tamisage de haute précision nécessite plusieurs niveaux de tamis, par exemple 100 mesh, 150 mesh et 200 mesh, en séquence, pour répondre aux différentes exigences du procédé.

L'effet synergique de ces équipements garantit la qualité des matières premières. Par exemple, sur une ligne de production donnée, la granulométrie optimisée de la poudre de tungstène (D50) est de 3 μm et la teneur en oxygène de 0,03 %, ce qui constitue la base du pressage et du frittage ultérieurs.

6.2 Équipement de pressage

Les équipements de pressage et de moulage transforment la poudre mélangée en pâte crue, étape essentielle du processus de métallurgie des poudres. Les équipements courants comprennent la presse isostatique à froid et la presse hydraulique.

La presse isostatique à froid (NEP) applique une pression uniforme à travers un liquide (tel que l'eau ou l'huile), ce qui est adapté aux formes complexes. La plage de pression de travail est de 100 à 400 MPa et le diamètre de la cavité est de 50 à 500 mm. Par exemple, lors du pressage de poudre W-90Ni-Fe à 250 MPa, la masse volumique du corps vert atteint 11 à 13 g/cm^3 , soit 60 à 70 % de la masse volumique théorique. L'équipement est équipé d'une pompe haute pression et d'un système d'étanchéité, avec une précision de pression de $\pm 2\text{ MPa}$ et un temps de moulage d'environ 5 à 10 minutes. Pour éviter les fuites de poudre, des moules en polyuréthane ou en caoutchouc doivent être utilisés, avec une résistance à la pression supérieure à 300 MPa. L'avantage est une pression uniforme, adaptée à la production de pièces de grandes dimensions, telles que des contrepoids pour l'aviation.

Les presses hydrauliques sont utilisées pour le moulage par compression et conviennent aux petites séries ou aux pièces de forme simple. La plage de pression est de 200 à 1 000 MPa et le diamètre du moule est de 10 à 100 mm. Par exemple, une billette cylindrique en W-95Ni-Fe de 50 mm de diamètre est pressée à 600 MPa, le temps de moulage est de 30 secondes et la masse volumique de la billette atteint 12 g/cm^3 . L'équipement doit être équipé de moules de précision (par exemple, des moules en acier d'une dureté supérieure à 60 HRC) et un agent de démoulage (comme une émulsion de graphite) est appliqué régulièrement pour réduire les frottements. Comparées au pressage isostatique à froid, les presses

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hydrauliques sont plus efficaces, mais la répartition des contraintes internes de la billette est légèrement inférieure.

Des équipements auxiliaires, tels que des machines d'emballage sous vide, permettent de dégazer la poudre avant son chargement dans le moule afin d'éviter les défauts de bulles lors du pressage. Par exemple, un conditionnement sous vide de 10^{-2} Pa peut réduire la porosité de l'ébauche de 0,5 %. Le choix de ces équipements doit être adapté à la taille de la pièce et à sa production. Par exemple, CTIA GROUP LTD privilégie les presses isostatiques à froid pour la production de pièces de protection médicale afin de garantir l'uniformité.

6.3 Équipement de frittage

Les équipements de frittage sont au cœur de la production d'alliages de tungstène lourds, utilisés pour transformer le corps vert en produits finis haute densité. Ils comprennent principalement des fours de frittage en phase liquide et des fours de pressage isostatique à chaud.

Les fours de frittage en phase liquide utilisent des températures élevées pour faire fondre la phase liante et combler les espaces entre les particules de tungstène. Les fours à résistance chauffante, dont la plage de température est comprise entre 1 300 et 1 600 °C et la précision de mesure est de ± 5 °C, sont couramment utilisés. Par exemple, le frittage d'une ébauche de W-93Ni-Fe à 1 480 °C pendant 2 heures augmente la masse volumique de 12 g/cm³ à 18,5 g/cm³, avec une densité supérieure à 99 %. Le four est principalement fabriqué en alumine ou en molybdène, avec une résistance à la température supérieure à 1 700 °C. L'atmosphère peut être de l'hydrogène (débit de 100 ml/min) ou du vide (10^{-3} Pa), et la teneur en oxygène est contrôlée à moins de 0,01 %. L'équipement est équipé d'un système de régulation de température à plusieurs niveaux, avec une vitesse de chauffe de 5 °C/min et un refroidissement à 50 °C/h après isolation, afin d'éviter les fissures dues aux contraintes thermiques. Les fours de frittage continu permettent une production à grande échelle, avec une capacité de production journalière de 1 à 2 tonnes.

Pressage isostatique à chaud (HIP) : Utilisé en post-traitement pour éliminer davantage les micropores. Les conditions de travail sont de 100 à 200 MPa, 1 300 à 1 500 °C. Par exemple, lorsque l'alliage W-95Ni-Fe a été traité à 200 MPa et 1 400 °C pendant 1 h, sa densité est passée de 99 % à 99,8 % et sa porosité a diminué à 0,1 %. Le corps du four est constitué d'une coque en acier haute pression, revêtue de graphite ou de molybdène, équipée d'un système de surpression à l'argon, et la fluctuation de pression est inférieure à 1 MPa. L'avantage réside dans une amélioration significative des performances, mais le coût par traitement est relativement élevé, ce qui le rend adapté aux produits à forte valeur ajoutée tels que les pièces aéronautiques.

Les systèmes auxiliaires comprennent des pompes à vide et des dispositifs de récupération de gaz. Par exemple, la pompe à vide peut réduire la pression dans le four à 10^{-4} Pa, et le système de récupération recycle l'hydrogène, réduisant ainsi les coûts d'environ 20 %. L'efficacité et la stabilité de l'équipement de frittage déterminent directement la qualité du produit fini. Par exemple, l'uniformité optimisée de la température du four est inférieure à 10 °C, ce qui maintient l'écart de masse volumique d'un lot à l'autre à $\pm 0,1$ g/cm³.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4 Équipement de post-traitement

Les équipements de post-traitement sont utilisés pour le traitement, le traitement thermique et le traitement de surface, notamment les machines-outils CNC, les fours de traitement thermique et les équipements de revêtement.

Les machines CNC sont utilisées pour l'usinage de précision. Il s'agit généralement de centres d'usinage cinq axes avec une vitesse de broche de 5 000 à 15 000 tr/min et une précision de positionnement de $\pm 0,005$ mm. Par exemple, pour l'usinage de pièces en alliage W-90Ni-Fe, la vitesse de coupe est de 50 m/min et la rugosité de surface est de Ra 0,4 μm . Ces équipements sont équipés d'outils diamantés ou CBN et d'un système de refroidissement à débit de 10 l/min pour garantir un usinage stable. Ils sont adaptés aux pièces complexes telles que les contrepoids de gyroscopes.

Les fours de traitement thermique sont utilisés pour le recuit ou le vieillissement. Les fours à résistance de type caisson sont courants, avec une plage de température de 500 à 1 200 °C et une précision de ± 3 °C. Par exemple, le recuit d'une pièce en W-93Ni-Fe à 900 °C pendant 2 heures réduit les contraintes de 80 % et augmente l'allongement de 10 %. L'atmosphère du four est de l'hydrogène ou de l'azote, équipé d'un ventilateur de circulation, et la différence de température est inférieure à 5 °C. Les fours continus sont adaptés à la production à grande échelle et peuvent traiter jusqu'à 500 kg par jour.

Des équipements de revêtement tels que des cuves de galvanoplastie et des machines PVD sont utilisés pour le traitement de surface. Les cuves de galvanoplastie utilisent du nickel ou de l'or comme solution de placage, avec une densité de courant de 1 à 5 A/dm². Par exemple, il faut 30 minutes pour plaquer une couche de nickel de 5 μm , ce qui multiplie par 10 la résistance à la corrosion. Les machines PVD utilisent la pulvérisation cathodique magnétron pour déposer des revêtements TiN d'une épaisseur de 2 à 5 μm et d'une dureté allant jusqu'à 550 HV, adaptés aux pièces résistantes à l'usure. L'équipement doit être équipé d'un système de vide (10^{-5} Pa) pour assurer un revêtement uniforme.

Ces appareils doivent être étalonnés régulièrement, par exemple, les machines-outils CNC sont étalonnées une fois par mois et l'erreur du capteur de température des fours de traitement thermique est < 2 °C pour garantir la précision du traitement et la cohérence des performances.

6.5 Automatisation et intelligence des équipements de production

Avec le développement de l'Industrie 4.0, l'automatisation et l'intelligence des équipements de production d'alliages de tungstène lourds sont devenues une tendance, améliorant l'efficacité et la stabilité de la qualité.

La technologie d'automatisation comprend des robots et des systèmes de convoyage. Par exemple, lors du processus de pressage, le robot six axes peut charger et décharger automatiquement les moules à une vitesse de 20 pièces/min, réduisant ainsi les erreurs manuelles de 30 %. Le four de frittage est équipé d'un système d'alimentation et de déchargement automatique, avec une vitesse de bande transporteuse de 0,5 m/min et une capacité journalière de 2 tonnes. L'équipement d'automatisation doit être intégré à un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

automate programmable industriel (PLC) pour permettre le réglage en temps réel des paramètres, tels que les fluctuations de pression inférieures à 2 MPa.

Le système intelligent optimise la production grâce à des capteurs et à l'analyse des données. Des capteurs de température (précision ± 1 °C) et de pression ($\pm 0,5$ MPa) surveillent le processus de frittage en temps réel, et les données sont transmises au MES (système d'exécution de fabrication), qui déclenche automatiquement des alarmes en cas d'anomalie. Par exemple, une ligne de production a réduit son taux de rebut de 2 % à 0,5 % grâce à une surveillance intelligente. Des algorithmes d'IA peuvent prédire les cycles de maintenance des équipements. Par exemple, l'analyse des données de vibration du broyeur à boulets permet d'alerter 30 jours à l'avance sur le remplacement des roulements, réduisant ainsi les temps d'arrêt de 50 %.

Des cas d'intégration montrent que, sur une ligne de production intelligente, le pressage isostatique à froid, le frittage et l'usinage CNC sont connectés en série par des bandes transporteuses, et les données des capteurs sont transmises à la salle de contrôle centrale. Le cycle de production est raccourci de 15 à 10 jours, et le taux de qualification des produits finis atteint 99,5 %. L'intelligence nécessite un investissement initial élevé (environ deux fois supérieur à celui des équipements traditionnels), mais les coûts d'exploitation à long terme sont réduits d'environ 20 %.

Équipement de production pour alliage de tungstène lourd

Catégorie d'équipement	Équipement principal	Paramètres clés	Fonction/Objectif
Préparation des matières premières	Four de réduction à l'hydrogène	900 °C, 50 L/min	Pureté de la poudre de tungstène ≥ 99,9 %, oxygène < 0,05 %
	Broyeur à boulets	400 tr/min, 6 heures	Taille des particules 3 μ m, uniformité < 1 %
Pressage	Presse isostatique à froid	250 MPa, 5 à 10 min	Densité du corps vert 11-13 g/cm ³
	Presse hydraulique	600 MPa, 30 secondes	Moulage très efficace, densité 12 g/cm ³
frittage	Four de frittage en phase liquide	1480°C, 2 heures	Densité 18,5 g/cm ³ , densité > 99%
	Four de pressage isostatique à chaud	200 MPa, 1400 °C	Porosité 0,1%, optimisation des performances
Post-traitement	Machines-outils CNC	50 m/min, Ra 0,4 μm	Usinage de haute précision
	Four de traitement thermique	900°C, 2 heures	Réduction du stress de 80%
Automatisation et intelligence	Robot	20 pièces/min	Efficacité améliorée, erreur < 30 %
	Surveillance intelligente	Température ±1°C, taux de rebut 0,5%	Qualité stable, maintenance prévisible

Remarque : les données du tableau sont des plages typiques et les paramètres spécifiques varient en fonction des exigences du processus.

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

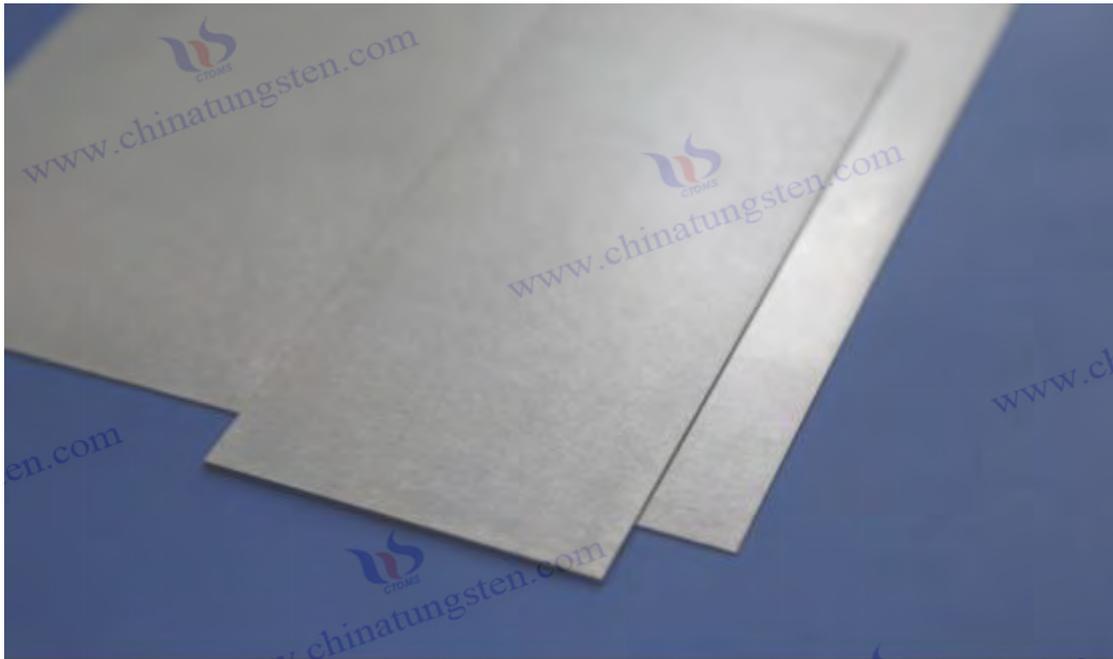
Official website: www.tungsten-alloy.com



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 7 : Équipement d'essai pour alliage de tungstène lourd

7.1 Équipement d'analyse de la composition chimique

La densité de l'alliage de tungstène influence directement ses performances. Des équipements de test sont utilisés pour garantir que la teneur en tungstène et le ratio des éléments de la phase de liaison (tels que Ni, Fe et Cu) répondent aux exigences de conception. Les équipements couramment utilisés comprennent les spectromètres et les analyseurs chimiques.

Le spectromètre d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES) est le principal équipement de détection de la teneur en éléments. Son principe de fonctionnement consiste à exciter les atomes de l'échantillon par plasma et à mesurer l'intensité de la lumière émise à une longueur d'onde spécifique. Par exemple, il peut détecter la teneur en tungstène ($90 \pm 0,5 \%$), en nickel ($7 \pm 0,2 \%$) et en fer ($3 \pm 0,2 \%$) dans l'alliage W-90Ni-Fe, avec une limite de détection de seulement $0,001 \%$ et une précision de $\pm 0,1 \%$. L'échantillon doit d'abord être dissous dans un acide (par exemple, un mélange d'acide nitrique et d'acide fluorhydrique), et chaque analyse dure environ 5 minutes. L'équipement est équipé d'un générateur haute fréquence (puissance de 1 à 2 kW) et d'un détecteur multicanal, adapté à l'analyse par lots et capable de mesurer 10 à 20 éléments simultanément.

Le spectromètre de fluorescence X (XRF) offre une option de contrôle non destructif. La surface de l'échantillon est excitée par des rayons X et sa composition est déterminée par l'analyse de la longueur d'onde de fluorescence. Par exemple, lors du test de surface de l'alliage W-95Ni-Fe, l'écart de teneur en tungstène est inférieur à $0,3 \%$, aucun prétraitement de l'échantillon n'est requis et le temps d'analyse est d'environ 1 minute. La profondeur de détection de l'appareil XRF portable est d'environ $0,1 \text{ mm}$, ce qui est adapté à un dépistage rapide. Cependant, sa faible sensibilité aux éléments légers (tels que C et O)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nécessite une vérification en combinaison avec d'autres méthodes. L'appareil XRF de bureau offre une précision supérieure ($\pm 0,05\%$) et convient aux analyses en laboratoire.

Un équipement d'analyse chimique par voie humide est utilisé pour une vérification de haute précision. Il comprend un dispositif de titrage et un spectrophotomètre. Par exemple, la teneur en nickel est déterminée par titrage EDTA avec une erreur inférieure à $0,01\%$ et une durée d'environ 30 minutes. Cette méthode convient à la détection d'impuretés (telles que S et P) avec une limite de détection de ppm, mais son fonctionnement est complexe et n'est utilisé que pour les analyses d'arbitrage.

Ces appareils doivent être étalonnés régulièrement. Par exemple, l'ICP-OES est étalonné mensuellement avec des échantillons standard (tungstène de pureté 99,99 %) pour garantir sa précision. L'analyse de la composition chimique garantit la qualité des matières premières et des produits finis. Par exemple, une ligne de production contrôle l'écart de composition à $\pm 0,2\%$ grâce au criblage XRF et à la confirmation ICP.

7.2 Équipement d'essai des propriétés physiques

L'équipement de test des propriétés physiques est utilisé pour mesurer la densité, les propriétés thermiques et électriques de l'alliage de tungstène haute densité afin de garantir qu'il répond aux exigences de l'application.

Les densitomètres sont basés sur le principe d'Archimède et mesurent la densité des alliages. Les densitomètres électroniques sont des équipements couramment utilisés, avec une précision de $\pm 0,01\text{ g/cm}^3$. Par exemple, lors du test de l'alliage W-95Ni-Fe, la valeur mesurée est de $18,8 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$, ce qui prend environ 2 minutes. La surface de l'échantillon doit être propre pour éviter les interférences de bulles, et la température du milieu liquide (comme l'eau ou l'éthanol) doit être maintenue à $20 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$. Pour améliorer la précision, une balance de haute précision ($0,0001\text{ g}$) peut être utilisée en combinaison avec la méthode de déplacement d'eau, adaptée aux applications exigeantes comme les contrepois aéronautiques.

Le conductivimètre thermique utilise la méthode du flash laser (LFA) pour mesurer la diffusivité thermique, puis calculer la conductivité thermique. Par exemple, la conductivité thermique de l'alliage W-80Cu est de $140\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ à $25\text{ }^\circ\text{C}$, avec une précision de $\pm 2\%$, et l'épaisseur de l'échantillon doit être comprise entre 1 et 5 mm. L'appareil est équipé d'une source laser (puissance de 10 W) et d'un détecteur infrarouge, avec une plage de test de 20 à $2\,000\text{ }^\circ\text{C}$, adaptée à la vérification des applications à haute température. Chaque mesure dure environ 5 minutes et une protection à l'azote est nécessaire pour éviter l'oxydation.

Le testeur de résistivité utilise une méthode à quatre sondes pour détecter les propriétés électriques. Par exemple, la résistivité de l'alliage W-90Ni-Fe est de $6,0 \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, l'espacement des sondes est de 1 mm et la plage de courant est de 1 à 100 mA. L'équipement nécessite un environnement à température constante ($25 \pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$) pour éviter les interférences dues aux effets thermoélectriques. Les modèles haute précision peuvent mesurer jusqu'à $0,01\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, ce qui est idéal pour les tests de matériaux d'électrodes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ces appareils fonctionnent ensemble. Par exemple, un laboratoire a utilisé un densimètre et un conductimètre thermique pour vérifier l'alliage W-97Ni-Fe et a constaté que la masse volumique était de $19,0 \text{ g/cm}^3$ et la conductivité thermique de $120 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, ce qui correspondait aux spécifications de conception.

7.3 Équipement d'essai des propriétés mécaniques

Les équipements de test des propriétés mécaniques évaluent la résistance, la dureté et la ténacité des alliages de tungstène lourds et constituent le cœur du contrôle qualité.

Des machines d'essai de matériaux universelles sont utilisées pour tester la résistance à la traction et l'allongement. Les machines de traction électroniques sont courantes, avec une plage de traction de 10 à 500 kN et une précision de $\pm 0,5 \%$. Par exemple, l'alliage W-90Ni-Fe est testé selon la norme ASTM E8 avec une résistance à la traction de 1 050 MPa, un allongement de 25 % et une vitesse de serrage de 0,5 à 5 mm/min. L'échantillon doit être transformé en haltère standard (6 mm de diamètre) et la durée de l'essai est d'environ 10 minutes. L'équipement est équipé d'une jauge de contrainte pour enregistrer les courbes contrainte-déformation et analyser les limites d'élasticité et le comportement à la rupture.

Un duromètre mesure la dureté de surface. Le duromètre Vickers (HV) est largement utilisé, avec une charge de 5 à 50 kgf. Par exemple, la dureté de l'alliage W-93Ni-Fe est de $450 \pm 10 \text{ HV}$ à 10 kgf, et la précision de la mesure diagonale de l'empreinte est de $\pm 0,1 \mu\text{m}$. Le duromètre Brinell (HB) est adapté aux pièces de grandes dimensions, avec une charge de 3 000 kgf, et le résultat du test de l'alliage W-95Ni-Fe est de 400 HB. Chaque test dure environ 30 secondes et la surface de l'échantillon doit être polie à $Ra 0,8 \mu\text{m}$.

Les machines d'essai d'impact évaluent la ténacité. Les machines d'essai d'impact Charpy à pendule sont courantes, avec une plage d'énergie de 50 à 300 J. Par exemple, l'énergie d'impact de l'alliage W-90Ni-Fe est de 50 J/cm^2 à température ambiante et de 40 J/cm^2 à basse température ($-50 \text{ }^\circ\text{C}$), et l'échantillon est une éprouvette entaillée de $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$. L'équipement doit étalonner le point zéro du pendule avec une précision de $\pm 1 \text{ J}$ pour garantir des résultats fiables.

Ces appareils nécessitent un entretien régulier, par exemple, la machine de traction doit être calibrée une fois par an et le pénétrateur diamant du testeur de dureté doit être remplacé après usure pour garantir la cohérence du test.

7.4 Équipement d'analyse de la microstructure

L'équipement d'analyse de la microstructure est utilisé pour observer la taille des grains, la distribution de phase et les défauts des alliages de tungstène à haute densité, ce qui constitue la base de l'optimisation des performances.

Le microscope électronique à balayage (MEB) permet une analyse haute résolution de la morphologie et de la composition des surfaces. La tension de fonctionnement est de 5 à 30 kV et le grossissement de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

50 à 10 000 fois. Par exemple, lors de l'observation de l'alliage W-95Ni-Fe, la taille moyenne des particules de tungstène est de 5 μm et la phase de liaison est uniformément répartie. Grâce au spectromètre à dispersion d'énergie (EDS), le rapport des éléments locaux (par exemple, W:Ni :Fe = 95:4:1) peut être mesuré avec une erreur de $\pm 0,5\%$. L'échantillon doit être poli et gravé (solution d'acide nitrique), et la durée d'analyse est d'environ 30 minutes.

La microscopie électronique à transmission (MET) analyse les nanostructures. Tension d'accélération : 200 kV, résolution : 0,2 nm. Par exemple, le joint de grain de l'alliage W-90Ni-Fe après frittage est détecté. La taille des grains est réduite à 1 μm et la densité de dislocations est d'environ $10^{10}/\text{cm}^2$. L'échantillon doit être découpé en fines tranches (épaisseur < 100 nm), sa préparation est complexe et une seule analyse prend 2 à 3 heures. Ce procédé est adapté à l'étude de l'effet des nanopoudres.

Le diffractomètre à rayons X (DRX) détermine la structure cristalline et la composition des phases. Cible Cu, rayon $K\alpha$, plage de balayage 10-90°, pas de 0,02°. Par exemple, lors de l'analyse de l'alliage W-93Ni-Fe, le tungstène présente une structure BCC, avec un faible pic de solution solide Ni-Fe, et la granulométrie calculée (formule de Scherrer) est d'environ 10 μm . La durée de l'essai est d'environ 1 heure, et l'échantillon ne nécessite aucun traitement particulier, ce qui le rend adapté aux essais par lots.

Ces appareils sont utilisés en combinaison. Par exemple, le MEB et la DRX sont utilisés pour analyser un alliage W-97Ni-Fe. On constate que la porosité est inférieure à 0,5 % et que les grains sont uniformes, ce qui constitue une base pour l'optimisation du procédé.

7.5 Équipement de contrôle non destructif

Les équipements de contrôle non destructif (CND) sont utilisés pour vérifier les défauts internes des alliages de tungstène lourds afin de garantir la fiabilité des pièces. Les équipements courants comprennent les équipements de contrôle par ultrasons et les détecteurs de défauts à rayons X.

Le contrôle par ultrasons (UT) détecte les fissures ou pores internes par réflexion des ondes sonores. La fréquence de fonctionnement est de 1 à 10 MHz et le diamètre de la sonde est de 5 à 20 mm. Par exemple, lors du test de pièces en alliage W-95Ni-Fe, la vitesse du son est de 4 400 m/s, des défauts de diamètre > 0,2 mm sont détectés et l'intensité du signal réfléchi est > 50 %. L'équipement est équipé d'une sonde d'immersion ou d'une sonde de contact d'une sensibilité de $\pm 0,1$ mm, adaptée à l'homologation de pièces aéronautiques. La durée du test est d'environ 5 minutes par pièce.

Les détecteurs de défauts à rayons X utilisent la pénétration du rayonnement pour détecter les structures internes. La tension du tube est de 100 à 300 kV et le temps d'exposition est de 1 à 5 minutes. Par exemple, lors de la vérification des contrepoids en alliage W-90Ni-Fe, la porosité est inférieure à 0,1 % et la résolution est de 0,1 mm. L'équipement portable est adapté à l'inspection sur site et le système d'imagerie permet d'afficher numériquement l'emplacement du défaut. Une radioprotection est requise pour garantir un fonctionnement sûr.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le testeur de particules magnétiques (MT) est adapté aux alliages contenant du fer (tels que W-Ni-Fe). L'intensité du champ magnétique est de 1 000 à 3 000 A/m et il détecte les fissures de surface. Par exemple, lorsque la longueur de fissure de surface de l'alliage W-93Ni-Fe est supérieure à 0,5 mm, il montre une agrégation de phosphore, une sensibilité élevée et une durée de test d'environ 3 minutes. Il est limité aux matériaux ferromagnétiques et ne convient pas aux alliages W-Cu.

Ces appareils doivent être étalonnés régulièrement. Par exemple, la sonde à ultrasons est étalonnée chaque mois avec un bloc de test standard, et la précision est maintenue à $\pm 0,05$ mm pour garantir une détection fiable.

Liste des équipements de test

Catégorie de détection	Équipement principal	Paramètres clés	Fonction/Objectif
Composition chimique	ICP-OES	Limite de détection 0,001 %, ± 0,1 %	Teneur en tungstène 90±0,5%
	XRF	Écart < 0,3 %, 1 minute	Criblage rapide non destructif
Propriétés physiques	Densimètre	±0,01 g/cm ³	Densité 18,8±0,1 g/cm ³
	Conductimètre thermique	140 W / (m · K) , ± 2 %	Vérification des performances thermiques
Propriétés mécaniques	Machine d'essai universelle	1050 MPa, ± 0,5 %	Essais de résistance et d'allongement
	Testeur de dureté	450±10 HV	Analyse de la dureté de surface
Microstructure	SEM	Particules de 5 µm, ± 0,5 %	Morphologie et distribution de la composition
	DRX	Grain de 10 µm	Confirmation de la structure cristalline
Essais non destructifs	Détecteur à ultrasons	Vitesse du son 4400 m/s, >0,2 mm	Détection de défauts internes
	détecteur de défauts à rayons X	Résolution 0,1 mm	Porosité < 0,1 %

Remarque : les données du tableau sont des plages typiques et les valeurs spécifiques peuvent varier en fonction des échantillons et des processus.

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 : Principaux produits de l'alliage de tungstène à haute densité de CTIA GROUP LTD

8.1 Produits de contreponds en alliage de tungstène à densité élevée

contreponds en alliage de tungstène à haute densité sont largement utilisés dans de nombreux domaines pour ajuster le centre de gravité, équilibrer la masse ou améliorer la stabilité des équipements grâce à leur densité élevée ($17,0-19,3 \text{ g/cm}^3$), leurs excellentes propriétés mécaniques et leur bonne aptitude à la mise en œuvre. Comparés aux contreponds traditionnels tels que l'acier ($7,85 \text{ g/cm}^3$) ou le plomb ($11,34 \text{ g/cm}^3$), les contreponds en alliage de tungstène à haute densité offrent un poids plus élevé dans un volume plus réduit, tout en présentant les avantages de l'absence de toxicité, de la résistance à la corrosion et d'une grande résistance. Parmi les contreponds les plus courants, on trouve les contreponds pour l'aéronautique, l'automobile, les équipements sportifs, les navires, les ascenseurs, les cannes à fléchettes et les plombs de pêche. Vous trouverez ci-dessous une présentation détaillée de chaque contreponds.

8.1.1 Contreponds aérospatial en alliage de tungstène à haute densité

Présentation du produit :

Les contreponds aérospatiaux servent à ajuster le centre de gravité et la répartition des masses des avions (avions, engins spatiaux, satellites) afin de répondre aux exigences d'aérodynamique et de conception structurelle. Compte tenu de l'espace limité et des exigences de contrôle qualité extrêmement strictes, la densité élevée de l'alliage de tungstène lourd constitue son principal atout. Par exemple, un contreponds en alliage W-95Ni-Fe de 50 mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur présente une densité de $18,8 \text{ g/cm}^3$ et pèse environ 740 g. Comparé à un contreponds en acier de même poids, son volume est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

réduit d'environ 60 %, ce qui réduit considérablement l'encombrement. Cette propriété le rend largement utilisé dans les ailes, les dérives, les trains d'atterrissage ou les cabines d'engins spatiaux.

Matériaux et propriétés

Les contrepoids aérospatiaux sont généralement fabriqués en alliages W-95Ni-Fe ou W-97Ni-Fe, avec des teneurs en tungstène de 95 % et 97 % respectivement, et un rapport nickel-fer de 7:3 ou 5:5. Le W-95Ni-Fe a une densité de 18,8 g/cm³, une résistance à la traction de 1 000 MPa, un allongement de 15 % et une dureté Vickers de 450 HV ; le W-97Ni-Fe a une densité plus élevée (19,0 g/cm³), une résistance légèrement supérieure de 1 050 MPa et une dureté de 460 HV. Ces propriétés garantissent que le contrepoids ne tombe pas en panne en vol à grande vitesse (> Mach 2) ou en surcharge élevée (> 10 G). Son faible coefficient de dilatation thermique ($4,5-5,0 \times 10^{-6} /K$) et sa déformation inférieure à 0,01 mm entre -50 °C et 150 °C répondent aux exigences de stabilité des environnements de haute altitude ou spatiaux. Sa résistance à la corrosion est excellente, avec une perte de masse inférieure à 0,2 % dans un environnement de brouillard salin à 10 % pendant 1 000 heures.

Procédé de fabrication

Le procédé de production utilise la technologie de la métallurgie des poudres. La poudre de tungstène (granulométrie 3-5 µm, pureté ≥ 99,9 %) est mélangée à de la poudre de nickel et de la poudre de fer et broyée à l'aide d'un broyeur à boulets planétaire à 300 tr/min pendant 6 heures avec un écart d'uniformité de < 1 %. Elle est pressée en un corps vert à 250-300 MPa par une presse isostatique à froid (CIP) avec une densité de 11-13 g/cm³. Le frittage dans un four de frittage à hydrogène à 1480 °C pendant 2 heures augmente la densité à 18,8 g/cm³ avec une densité de > 99 %. Les produits haut de gamme sont soumis à un pressage isostatique à chaud (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 heure) pour réduire la porosité à 0,1 %. Le post-traitement comprend un usinage CNC cinq axes avec une vitesse de coupe de 50 m/min, une rugosité de surface de Ra 0,8 µm et une tolérance de ±0,05 mm. La surface est plaquée d'une couche de nickel de 5 µm, ce qui multiplie par dix la résistance à la corrosion. Des tests d'équilibrage dynamique garantissent que l'écart de poids est inférieur à ±2 g.

Français Scénarios et cas d'application

Dans les avions commerciaux (tels que le Boeing 737), des contrepoids sont installés dans la zone du train d'atterrissage, pesant chacun 1 kg, ce qui réduit le volume de 30 % et améliore le rendement énergétique de 5 %. Dans les avions militaires (tels que le F-35), il est utilisé pour ajuster le décalage du centre de gravité pendant le vol à grande vitesse et résister à une surcharge de 15 G. Dans les satellites (tels que le projet Starlink), le contrepoids W-97Ni-Fe (poids 950 g) d'une longueur de 100 mm, d'une largeur de 50 mm et d'une épaisseur de 20 mm assure la stabilité du lancement et de l'opération orbitale. L'écart d'attitude lors du test était < 0,1° et le volume a été réduit de 40 % par rapport au contrepoids en plomb.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la constance de la densité et la précision d'usinage. L'écart de densité d'un lot à l'autre doit être < ±0,1 g/cm³, et la température de frittage (écart < 5 °C) et l'atmosphère (teneur en oxygène < 0,01 %) doivent être optimisées. Une dureté élevée entraîne une usure des outils (0,2 mm après usinage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de 100 pièces), et des outils CBN sont utilisés à la place, ce qui augmente la durée de vie de l'outil de 50 %. Les formes complexes sont imprimées par SLM (puissance laser 3000 W), avec une porosité <1 %.

8.1.2 Contrepoids automobile en alliage de tungstène à haute densité

Présentation du produit

Automobile Les contrepoids servent à équilibrer le poids de la carrosserie, à optimiser la tenue de route et à améliorer la stabilité, notamment sur les véhicules hautes performances et les véhicules électriques . Par exemple, un contrepoids W-90Ni-Fe de 80 mm de long, 30 mm de large et 15 mm d'épaisseur présente une densité de 18,5 g/cm³ et un poids d'environ 665 g, soit 55 % de moins qu'une pièce en acier. Il permet d'ajuster la répartition de la charge sur les essieux avant et arrière.

Matériaux et propriétés

Alliage W-90Ni-Fe couramment utilisé, teneur en tungstène de 90 %, densité de 18,5 g/cm³, résistance à la traction de 1 000 MPa, allongement de 20 %, dureté de 400 HV. Sa résistance à la fatigue est de 500 MPa et il peut supporter 10⁷ cycles sans fissures, ce qui est adapté à l'environnement de vibrations à long terme des véhicules. La conductivité thermique est de 130 W/(m·K), avec une bonne résistance à la température (> 500 °C) et stable à haute température dans le compartiment moteur. Résistance à la corrosion : la perte de masse dans l'humidité pendant 1 000 heures est < 0,5 %, et aucune protection supplémentaire n'est requise.

Procédé de fabrication :

De la poudre de tungstène (granulométrie 5 µm) est mélangée à de la poudre de nickel-fer (7:3) et pressée par presse hydraulique à 600 MPa. La masse volumique du corps vert est de 12 g/cm³. Fritté sous hydrogène à 1450 °C pendant 2 heures, la masse volumique est de 18,5 g/cm³ et la masse volumique est de 98,5 %. Fraisage CNC, vitesse de coupe 60 m/min, tolérance ±0,1 mm, rugosité de surface Ra 1,6 µm . Certains produits sont pulvérisés avec un revêtement Al₂O₃ de 0,1 mm, et la résistance à haute température est portée à 1000 °C.

Scénarios et cas d'application

Dans les voitures de sport (comme la Porsche 911), le contrepoids est placé à l'avant du châssis, pesant 500 g, optimisant le rapport de charge par essieu de 50:50 et améliorant la stabilité en virage. Dans les véhicules électriques (comme la Tesla Model S), il est placé près de la batterie, pesant 1 kg, équilibrant la répartition du poids et prolongeant la durée de vie de la suspension de 20 %. Une équipe de course utilise un contrepoids W-90Ni-Fe (100 mm de long, 1,2 kg), qui améliore la maniabilité de 15 %.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent le coût et l'espace d'installation. Le prix de l'alliage de tungstène (40 000 à 70 000 \$/tonne) est plus élevé que celui de l'acier (500 \$/tonne), et le coût peut être réduit de 20 % en recyclant la poudre. Les petits espaces nécessitent des conceptions de forme spéciale, réalisées par impression 3D avec une précision de ± 0,05 mm. La fatigue vibratoire est traitée par HIP pour prolonger la durée de vie de 30 %.

8.1.3 Poids d'équipements sportifs en alliage de tungstène à densité élevée

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Présentation du produit :

les poids des équipements sportifs, comme les clubs de golf et les raquettes de tennis, servent à ajuster la répartition du poids et à améliorer l'expérience utilisateur. Par exemple, des poids en alliage W-93Ni-Fe, d'un volume de 5 cm³ (20 × 10 × 25 mm), d'une densité de 18,5 g/cm³ et d'un poids de 92 g, sont installés sur la tête du club pour améliorer la stabilité du swing.

Matériaux et propriétés :

alliage W-93Ni-Fe (93 % tungstène), densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1 050 MPa, dureté 420 HV, allongement 18 %. Sa résistance à l'usure est 50 % supérieure à celle de l'acier et sa durée de vie est longue sous des chocs répétés. Il présente un excellent état de surface (Ra 0,2 µm), un toucher agréable et une résistance à la corrosion par la sueur (perte de masse < 0,1 % après 1 000 heures).

de fabrication :

Poudre de tungstène mélangée à de la poudre de nickel-fer, pressée isostatiquement à froid à 250 MPa, frittée à 1450 °C, masse volumique 18,5 g/cm³. Tolérance d'usinage CNC ± 0,05 mm, polissage à Ra 0,2 µm, nickelage 5 µm pour une meilleure esthétique. Production en série avec moulage, rendement augmenté de 30 %.

Scénarios et cas d'application

: Pour les clubs de golf, un poids de 50 à 100 g est placé sur la tête du club, ce qui augmente la vitesse de swing de 10 %. Pour les raquettes de tennis, une barre de poids de 20 g est placée sur le cadre, ce qui augmente la puissance de frappe de 15 %. Une marque de clubs utilise des poids W-93Ni-Fe (80 g), et les utilisateurs signalent une amélioration de la stabilité de 20 % et une augmentation de la part de marché de 10 %.

Défis techniques et solutions :

Les défis concernent la précision du poids et l'apparence. La personnalisation en petites séries exige une précision de ± 1 g, calibrée par une balance de haute précision. L'apparence nécessite un effet miroir, grâce à des procédés de polissage et de revêtement multi-niveaux. La durabilité est assurée par cémentation, avec une dureté de 500 HV.

8.1.4 Contrepoids de navire en alliage de tungstène à haute densité

Présentation du produit

Le lest d'un navire sert à ajuster l'équilibre et la stabilité du navire, notamment en termes de poids. Par exemple, un lest en W-90Ni-Fe de 200 mm de long, 50 mm de large et 30 mm d'épaisseur présente une densité de 18,5 g/cm³ et un poids de 2,78 kg. Il est 55 % plus petit que les pièces en acier et est utilisé dans les petits navires ou les sous-marins.

Matériaux et propriétés :

alliage W-90Ni-Fe, densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 400 HV, allongement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

20 %. Taux de corrosion < 0,1 % en eau de mer pendant 1 000 heures, résistance au brouillard salin dix fois supérieure à celle de l'acier. Résistance à la fatigue 500 MPa, pas de rupture sous l'effet des vagues.

Procédé de fabrication :

Presse hydraulique, pressage 600 MPa, frittage 1450 °C, densité 18,5 g/cm³. Tolérance d'usinage CNC ± 0,1 mm, revêtement céramique pulvérisé de 0,2 mm, résistance à la température 1500 °C, résistance à la corrosion augmentée de 50 %. Les grands contrepoids sont imprimés par SLM pour réduire les soudures.

Scénarios et cas d'application

: Sur les yachts, un contrepoids de 5 kg est placé au fond du bateau, ce qui améliore la stabilité de 20 %. Sur les sous-marins, un contrepoids de 10 kg ajuste le centre de flottabilité et augmente l'efficacité de plongée de 15 %. Sur un bateau de pêche, un contrepoids W-90Ni-Fe (3 kg) améliore la résistance au vent et aux vagues de 25 %.

Défis techniques et solutions Les défis incluent

la résistance à la corrosion par l'eau de mer et la répartition du poids. Le nickelage ou la pulvérisation d'Al₂O₃ résout les problèmes de corrosion. Les poids importants doivent être uniformes et l'écart de densité doit être inférieur à 0,1 g/cm³ grâce au pressage multipoint et au traitement HIP.

8.1.5 Contrepoids d'ascenseur en alliage de tungstène à haute densité

Présentation du produit :

les contrepoids d'ascenseur équilibrent le poids de la cabine et réduisent la charge sur le moteur. Par exemple, un contrepoids en W-90Ni-Fe de 300 mm de long, 100 mm de large et 50 mm d'épaisseur présente une densité de 18,5 g/cm³ et un poids de 13,9 kg, soit 55 % de moins qu'un bloc d'acier et est utilisé dans les ascenseurs de grande hauteur.

Matériaux et propriétés

Alliage W-90Ni-Fe, densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1000 MPa, dureté 400 HV, résistance à la fatigue 500 MPa, tenue à 10⁷ cycles. Résistance à la température 500 °C, grande stabilité en fonctionnement. La résistance à l'usure de surface est 50 % supérieure à celle de l'acier.

Procédé de fabrication :

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage à 1450°C, densité 18,5 g/cm³. Tolérance d'usinage CNC ±0,2 mm, rugosité de surface Ra 1,6 μ m. Projection d'une couche protectrice de 0,1 mm, résistance à la corrosion augmentée de 30 %.

Scénarios et cas d'application :

Dans les ascenseurs commerciaux, un contrepoids de 10 à 20 kg est placé sur le cadre, ce qui réduit la consommation d'énergie de 15 %. Dans les monte-charges, un contrepoids de 50 kg augmente l'efficacité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de charge de 20 %. Un bâtiment utilise un contrepoids W-90Ni-Fe (pesant 15 kg), ce qui réduit le bruit de fonctionnement de 10 dB.

Défis techniques et solutions :

les défis concernent le coût et l'installation. Le recyclage de la poudre réduit les coûts de 20 %. Les contrepoids de grande taille doivent être épissés, et la résistance de la connexion par brasure atteint 200 MPa pour garantir la sécurité.

8.1.6 Tige de fléchette en alliage de tungstène haute densité

Présentation du produit :

les tiges de fléchettes sont fabriquées en alliage de tungstène haute densité pour un poids et une sensation améliorés. Par exemple, une tige en W-90Ni-Fe de 50 mm de long et 6 mm de diamètre présente une densité de 18,0 g/cm³ et pèse 25 g, soit 50 % de moins qu'une tige en acier.

Matériaux et propriétés :

Alliage W-90Ni-Fe, densité 18,0 g/cm³, résistance à la traction 950 MPa, dureté 380 HV, allongement 20 %. Haute résistance à l'usure, surface polie à Ra 0,2 µm, excellente sensation au toucher, résistance à la corrosion par la sueur < 0,1 %.

Procédé de fabrication :

moulage à 500 MPa, frittage à 1 450 °C, densité 18,0 g/cm³. Tolérance de tournage CNC ± 0,02 mm, polissage nickelage 5 µm, esthétique améliorée. Production par lots : 1 000 pièces/jour.

Scénarios et cas d'application

: Aux fléchettes professionnelles, une tige de fléchette pesant 20 à 30 g améliore la précision du lancer de 15 %. Une marque utilise des tiges de fléchettes W-90Ni-Fe (pesant 26 g), avec une part de marché de 25 %, et les retours des utilisateurs montrent une amélioration de la sensation de 30 %.

Défis techniques et solutions :

Les défis concernent la précision et l'apparence. L'écart de poids est inférieur à ± 0,5 g, ce qui est résolu par un pressage de haute précision. La surface doit être impeccable, et des processus de polissage et de revêtement à plusieurs niveaux garantissent la qualité.

8.1.7 Plombs de pêche en alliage de tungstène à haute densité

Présentation du produit :

les plombs de pêche utilisent un alliage de tungstène à haute densité pour remplacer le plomb, offrant ainsi une protection environnementale et une densité élevée. Par exemple, un plomb en W-95Ni-Fe de 10 mm de diamètre a une densité de 18,8 g/cm³, pèse 9,8 g et est 20 % plus petit qu'un plomb en plomb.

Matériaux et propriétés :

alliage W-95Ni-Fe, densité 18,8 g/cm³, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 450 HV, résistance à la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corrosion par l'eau < 0,1 %. Non toxique, conforme aux normes environnementales, résistance à l'usure 5 fois supérieure à celle du plomb.

Procédé de fabrication

Pressage isostatique à froid 250 MPa, frittage à 1480°C, densité 18,8 g/cm³. Tolérance d'usinage CNC ±0,05 mm, polissage de surface Ra 0,4 μ m, revêtement de couleur pour améliorer l'attractivité.

Scénarios et cas d'application

: En pêche en mer, les plombs de 5 à 20 g coulent 30 % plus vite. Une marque utilise des plombs W-95Ni-Fe (poids 10 g), ses ventes augmentent de 20 % et son taux de réussite à la certification environnementale atteint 100 %.

Défis techniques et solutions :

les défis concernent le coût et l'esthétique. La poudre recyclée réduit les coûts de 15 %. L'impression 3D permet d'obtenir des formes diversifiées pour répondre à des besoins personnalisés.

8.2 Produits militaires en alliage de tungstène à densité élevée

L'alliage de tungstène lourd utilisé dans le domaine militaire est dû à sa densité élevée (17,0-19,3 g/cm³), à son excellente résistance mécanique (700-1200 MPa), à son excellente capacité de pénétration et de protection contre les radiations, ce qui en fait un matériau idéal pour la fabrication de noyaux perforants, de plaques de blindage, d'obus de protection pour munitions, de composants de missiles antichars, de contrepoids de canons, de contrepoids de gyroscopes d'aviation et de bagues de tuyères de roquettes. Ces produits jouent un rôle essentiel dans la guerre moderne, améliorant la puissance d'attaque, la protection et la stabilité des armes. Voici une présentation détaillée de chaque produit militaire.

8.2.1 Noyau perforant en alliage de tungstène lourd

Présentation du produit

Le noyau perforant en alliage de tungstène haute densité est le composant principal des projectiles perforants à énergie cinétique (APFSDS), qui utilise sa haute densité et sa dureté élevée pour obtenir une forte pénétration des cibles blindées. Par exemple, un noyau en alliage W-93Ni-Fe d'un diamètre de 20 mm et d'une longueur de 100 mm, d'une densité de 18,5 g/cm³ et d'un poids d'environ 580 g, peut pénétrer un blindage homogène laminé (RHA) de 600 mm d'épaisseur à une vitesse initiale de 2000 m/s, soit 50 % plus profonde que celle d'un noyau en acier.

Matériaux et propriétés

Les noyaux perforants sont généralement fabriqués en alliages W-93Ni-Fe ou W-95Ni-Fe, avec des teneurs en tungstène de 93 % et 95 % respectivement, et un rapport nickel-fer de 7:3. Le W-93Ni-Fe a une densité de 18,5 g/cm³, une résistance à la traction de 1 100 MPa, une dureté de 480 HV et un allongement de 15 % ; le W-95Ni-Fe a une densité de 18,8 g/cm³, une résistance de 1 150 MPa et une dureté de 500 HV. Ces propriétés garantissent l'intégrité du noyau sous un impact à grande vitesse. Sa

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ténacité à la rupture (K_{IC}) est d'environ $30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, ce qui est supérieur à celui du tungstène pur ($5-10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), réduisant le risque de rupture. Sa résistance à haute température (point de fusion $> 2800^\circ\text{C}$) l'empêche de ramollir lorsqu'il est chauffé par frottement ($> 1000^\circ\text{C}$).

Le procédé de fabrication

utilise la métallurgie des poudres et la mécanosynthèse. De la poudre de tungstène (granulométrie $1-3 \mu\text{m}$, pureté $\geq 99,9\%$) est mélangée à de la poudre de nickel-fer et broyée dans un broyeur à boulets à haute énergie à 500 tr/min pendant 10 heures pour affiner les grains à 50 nm . Ensuite, la presse isostatique à froid est pressée en un corps vert à 300 MPa avec une masse volumique de 13 g/cm^3 . Le frittage sous vide (10^{-3} Pa) à 1500°C pendant 2 heures a une masse volumique de $18,5 \text{ g/cm}^3$ et une masse volumique $> 99\%$. Pour améliorer les performances, la compression isostatique à chaud (HIP, 200 MPa , 1400°C , 1,5 heure) est utilisée pour réduire la porosité à $0,1\%$.

L'usinage a été réalisé par tournage CNC, avec une vitesse de coupe de 40 m/min , une tolérance de $\pm 0,02 \text{ mm}$ et une rugosité de surface de $Ra 0,8 \mu\text{m}$. La pointe a été cémentée (950°C , 3 heures) pour augmenter la dureté à 600 HV et la résistance à l'usure de 30% .

Scénarios et cas d'application

: Dans les canons de chars, comme le canon principal de 120 mm du M1A2 Abrams, le noyau W-93Ni-Fe pénètre 700 mm RHA , augmentant le taux de réussite de 20% . Dans les armes antiblindage, comme l'ogive cinétique du missile Dow, le noyau W-95Ni-Fe (poids 600 g) pénètre le blindage composite, augmentant la puissance destructrice de 30% . Lors d'un test militaire, le noyau W-93Ni-Fe a pénétré 650 mm à 2500 m/s , soit 15% de mieux que les alliages à base de cobalt.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la régularité de la pénétration et le coût de fabrication. La granulométrie doit être inférieure à $5 \mu\text{m}$ pour garantir la ténacité, obtenue grâce à la nanopoudre et au procédé HIP. Le coût élevé ($50\,000 \text{ \$/tonne}$) est réduit de 20% grâce à l'optimisation de la récupération de la poudre. L'auto-affûtage sous impact à grande vitesse est amélioré par l'ajout de cobalt (2%), et le mode de fracture est plus uniforme.

8.2.2 Plaque de blindage de protection en alliage de tungstène haute densité

Présentation du produit :

Les plaques de blindage sont utilisées dans les véhicules blindés ou les bunkers pour assurer une protection contre les éclats d'obus et les radiations. Par exemple, une plaque de blindage en alliage W-95Ni-Fe de 10 mm d'épaisseur, d'une densité de $18,8 \text{ g/cm}^3$ et d'un poids d'environ $18,8 \text{ kg/m}^2$, peut protéger contre 90% des rayons gamma de 1 MeV . Elle est plus fine que les plaques de plomb (15 mm) et non toxique.

Matériaux et propriétés :

alliage W-95Ni-Fe, densité $18,8 \text{ g/cm}^3$, résistance à la traction $1\,000 \text{ MPa}$, allongement 20% , dureté 450

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HV. Son coefficient d'absorption massique est de $0,15 \text{ cm}^2/\text{g}$ et son efficacité de blindage est 5 fois supérieure à celle de l'acier. Résistance à la fatigue 500 MPa, supporte les chocs d'explosion ($> 1\,000 \text{ J}/\text{cm}^2$) sans fissures. Résistance à la corrosion : perte de masse $< 0,2 \%$ dans l'eau de mer pendant 1 000 heures, adapté à divers environnements.

Procédé de fabrication :

La poudre de tungstène est mélangée à de la poudre de nickel-fer, pressée isostatiquement à froid à 300 MPa, frittée à $1480 \text{ }^\circ\text{C}$ et présente une densité de $18,8 \text{ g}/\text{cm}^3$. Le traitement HIP (200 MPa, $1400 \text{ }^\circ\text{C}$) élimine les micropores et présente une densité de 99,9 %. Fraisage CNC, tolérance $\pm 0,1 \text{ mm}$, pulvérisation de surface, revêtement Al_2O_3 de 0,2 mm, résistance à la température de $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ et résistance à la corrosion augmentée de 50 %. Les grandes plaques sont épaissées, avec une résistance au brasage de 200 MPa.

Scénarios et cas d'application :

Dans les véhicules blindés (tels que les chars Leopard 2), des plaques de blindage de 10 mm d'épaisseur sont placées dans le cockpit pour protéger contre les éclats d'obus et les radiations. Elles sont 20 % plus légères que les plaques d'acier. Dans les dépôts de munitions, les plaques W-95Ni-Fe protègent les matières radioactives, améliorant la sécurité de 30 %. Un véhicule militaire utilise cette plaque de blindage (1 m^2 , pesant 18,8 kg), avec une protection accrue de 25 % et une réduction de volume de 15 %.

Défis techniques et solutions :

l'équilibre entre poids et protection est un défi. Les panneaux de grande surface doivent être légers, et leur poids peut être réduit de 10 % grâce à une structure en nid d'abeille. La résistance des joints est portée à 90 % de celle du matériau de base grâce au soudage par faisceau d'électrons (5 kW). La résistance aux hautes températures est assurée par un revêtement céramique, et la durabilité est augmentée de 30 %.

8.2.3 Boîtier de protection pour munitions en alliage de tungstène à haute densité

Présentation du produit :

Les coques de protection pour munitions servent à stocker ou à transporter des munitions radioactives afin d'éviter les fuites de rayonnement. Par exemple, une coque cylindrique en W-97Ni-Fe, d'un diamètre extérieur de 100 mm et d'une hauteur de 150 mm, d'une densité de $19,0 \text{ g}/\text{cm}^3$, d'une épaisseur de paroi de 5 mm et d'un poids d'environ 2,2 kg, peut protéger contre 95 % des rayons gamma (1 MeV).

Matériaux et propriétés

Alliage W-97Ni-Fe, densité $19,0 \text{ g}/\text{cm}^3$, résistance à la traction 1050 MPa, dureté 460 HV, allongement 12 %. Son numéro atomique élevé ($Z = 74$) lui confère une excellente capacité de blindage, avec un coefficient d'absorption massique de $0,16 \text{ cm}^2/\text{g}$. Résistance à la température jusqu'à $1500 \text{ }^\circ\text{C}$, ne fond pas en milieu explosif. Étanchéité élevée, taux de fuite $< 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$.

Procédé de fabrication :

pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage sous vide à $1500 \text{ }^\circ\text{C}$, densité $19,0 \text{ g}/\text{cm}^3$, porosité après

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

traitement HIP < 0,1 %. Tolérance de cavité d'usinage CNC $\pm 0,02$ mm, polissage de surface Ra 0,4 μ m, conception du couvercle fileté pour assurer l'étanchéité. Nickelage 5 μ m, résistance à la corrosion multipliée par 10.

Scénarios et cas d'application

Lors du stockage de munitions nucléaires, l'enveloppe W-97Ni-Fe (poids 2,5 kg) protège des radiations et réduit la dose à moins de 1 mSv. Lors du transport, l'enveloppe d'une épaisseur de paroi de 8 mm protège les isotopes radioactifs et augmente la sécurité de 40 %. Une certaine armée utilise cette enveloppe (épaisseur de paroi de 6 mm), avec un taux de protection contre les radiations de 96 % et un poids 15 % plus léger que l'enveloppe en plomb .

Défis techniques et solutions :

les défis concernent l'étanchéité et le poids. La précision de l'usinage des filetages doit être de $\pm 0,01$ mm, ce qui est obtenu grâce à une commande numérique par ordinateur (CNC) à cinq axes. Le poids est contrôlé par l'optimisation de l'épaisseur de paroi (minimum 5 mm), et le procédé HIP garantit la résistance. La résistance aux chocs est améliorée par l'ajout de cobalt et la ténacité est augmentée de 10 %.

8.2.4 Composants de missiles antichars en alliage de tungstène haute densité

Présentation du produit :

les composants de missiles antichars, tels que les contrepoids ou les revêtements perforants, utilisent une densité élevée pour améliorer la stabilité en vol et la pénétration. Par exemple, le contrepoids annulaire en alliage W-90Ni-Fe, d'un diamètre extérieur de 80 mm, d'une épaisseur de 20 mm et d'une densité de 18,5 g/cm³, pèse environ 1,2 kg et optimise la trajectoire du missile.

Matériaux et propriétés :

alliage W-90Ni-Fe, densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 400 HV, allongement 20 %. Résistance à haute température 2 800 °C, pas de fusion en cas d'explosion. Résistance à la fatigue 500 MPa, supporte une surcharge de lancement (> 20 G). La dureté superficielle atteint 550 HV après cémentation et la résistance à l'usure augmente de 30 %.

Procédé de fabrication :

Presse hydraulique, pressage 600 MPa, frittage 1 450 °C, densité 18,5 g/cm³. Impression SLM de formes complexes, porosité < 1 %, tolérance d'usinage CNC $\pm 0,05$ mm. Traitement de cémentation (950 °C, 3 heures) pour améliorer la résistance à l'usure. Revêtement céramique par projection de surface, résistance à la température 1 500 °C.

Scénarios et cas d'application

Dans le missile Javelin, le contrepoids W-90Ni-Fe (pesant 1 kg) stabilise le vol et augmente le taux de réussite de 15 %. Dans l'ogive perforante, l'anneau de 500 g augmente la pénétration de 20 %. Un missile

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

utilise un composant W-90Ni-Fe (pesant 1,5 kg) pour pénétrer un blindage composite de 800 mm, ce qui est 30 % plus efficace que les pièces en acier.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la complexité des formes et la résistance aux températures élevées. L'impression 3D permet de réaliser des conceptions de formes spéciales avec une précision de $\pm 0,03$ mm. La résistance aux températures élevées est prolongée de 25 % grâce au revêtement céramique et au traitement HIP. La répartition du poids est optimisée par des tests d'équilibrage dynamique avec une excentricité inférieure à $5 \mu\text{m}$.

8.2.5 Contrepoids d'arme à feu en alliage de tungstène à haute densité.

Présentation du produit

. Les contrepoids d'arme à feu servent à équilibrer le corps de l'arme et à réduire le recul. Par exemple, un contrepoids en W-90Ni-Fe de 50 mm de long, 20 mm de large et 10 mm d'épaisseur présente une densité de $18,5 \text{ g/cm}^3$ et un poids de 185 g. Il est installé sur la crosse ou le canon.

Matériaux et propriétés :

alliage W-90Ni-Fe, densité $18,5 \text{ g/cm}^3$, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 400 HV, allongement 20 %. Résistance à la fatigue 500 MPa, supporte des tirs continus ($> 1\,000$ coups). Résistance à l'usure 50 % supérieure à celle de l'acier, résistance à la corrosion superficielle à la sueur 1 000 heures, perte de masse $< 0,1 \%$.

Procédé de fabrication :

pressage isostatique à froid 250 MPa, frittage à $1\,450 \text{ }^\circ\text{C}$, masse volumique $18,5 \text{ g/cm}^3$. Tolérance d'usinage CNC $\pm 0,05$ mm, rugosité de surface $Ra 1,6 \mu\text{m}$, nickelage $5 \mu\text{m}$ pour une meilleure esthétique. Production en série par moulage, rendement accru de 30 %.

Scénarios et cas d'application

: Sur les fusils de précision (comme le M24), un contrepoids de 200 g est placé sur la crosse pour réduire le recul de 20 %. Sur les pistolets-mitrailleurs, un contrepoids de 150 g améliore la stabilité du tir continu de 15 %. Un certain pistolet utilise un contrepoids W-90Ni-Fe (pesant 180 g), ce qui augmente la précision de tir de 10 %.

Défis techniques et solutions :

Les défis concernent la précision du poids et le montage. Écart de poids $< \pm 2$ g, résolu par pressage de haute précision. Le montage nécessite un boulonnage (résistance au cisaillement : 3 000 N), optimisé par des boulons en titane. La durabilité est obtenue par cémentation, dureté portée à 500 HV.

8.2.6 Contrepoids de gyroscope d'aviation en alliage de tungstène à haute densité

Présentation du produit

Les poids gyroscopiques aérospatiaux sont utilisés dans les systèmes de navigation pour fournir une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

masse inertielle, comme le poids W-97Ni-Fe d'un diamètre de 30 mm et d'une hauteur de 20 mm, d'une densité de 19,0 g/cm³ et d'un poids de 265 g, qui prend en charge une rotation de haute précision.

Matériaux et propriétés

Alliage W-97Ni-Fe, densité 19,0 g/cm³, résistance à la traction 1050 MPa, dureté 450 HV, allongement 12 %. Résistance à la fatigue 500 MPa, tenue à une rotation >10000 tr/min. Coefficient de dilatation thermique $4,5 \times 10^{-6}$ /K, déformation <0,01 mm, conductivité thermique 120 W / (m · K) .

Procédé de fabrication

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage sous vide à 1500°C, masse volumique 19,0 g/cm³, porosité par traitement HIP < 0,2 %. Tolérance d'usinage CNC cinq axes $\pm 0,01$ mm, surface Ra 0,2 μ m, dorure 2 μ m, résistivité réduite à 4 $\mu\Omega \cdot$ cm. Excentricité d'équilibre dynamique < 5 μ m.

Scénarios d'application et exemples :

Dans les drones, un contrepoids de 200 g permet une précision INS de 0,01 °/s. Dans les avions de chasse (comme le F-22), un contrepoids de 250 g résiste à une surcharge de 15 G et a une durée de vie de 5 000 heures. Un missile utilise un contrepoids W-97Ni-Fe (270 g), avec une erreur de vitesse angulaire inférieure à 0,005 °/s.

Défis techniques et solutions :

Les défis incluent l'équilibrage dynamique et les micro-trous. Cet équilibrage dynamique est corrigé par des moules et des machines d'essai de haute précision. Les micro-trous sont éliminés par CIC (250 MPa) et la durée de vie en fatigue est augmentée de 50 %. La chaleur de coupe est contrôlée à moins de 40 °C par refroidissement par eau.

8.2.7 Bague de tuyère de fusée en alliage de tungstène lourd

Présentation du produit

Les bagues de tuyère de fusée résistent à un flux d'air à haute température et à haute pression , comme la bague W-95Ni-Fe avec un diamètre intérieur de 50 mm et une longueur de 80 mm, une densité de 18,8 g/cm³ et un poids d'environ 1,1 kg, offrant un support structurel et une protection thermique.

Matériaux et propriétés

Alliage W-95Ni-Fe, densité 18,8 g/cm³, résistance à la traction 1000 MPa, dureté 450 HV, point de fusion > 2800 °C. Conductivité thermique 140 W / (m · K) , forte résistance aux chocs thermiques, résistance à la fatigue 500 MPa. Résistance à la corrosion : perte de masse < 0,5 % dans les produits de combustion pendant 1000 heures.

Procédé de fabrication

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage à 1480°C, densité 18,8 g/cm³, densité de traitement HIP 99,9%. Tolérance d'usinage CNC $\pm 0,05$ mm, pulvérisation de surface 0,3 mm Revêtement ZrO₂ , résistance à la température 2000°C. Cavité complexe d'impression SLM, porosité <1%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Scénarios et cas d'application

: Dans les propulseurs à poudre, une bague de 1,5 kg peut résister à un flux d'air à 3 000 °C et augmenter sa durée de vie de 20 %. Dans les fusées à propergol liquide, une bague de 1 kg augmente l'efficacité d'injection de 10 %. Une fusée utilise une bague en W-95Ni-Fe (pesant 1,2 kg), ce qui augmente la stabilité de poussée de 15 %.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la résistance aux hautes températures et la précision d'usinage. Le revêtement ZrO₂ et le traitement HIP augmentent la résistance à la température de 30 %. Les formes complexes sont obtenues par impression 3D avec une précision de ± 0,03 mm. La contrainte thermique est réduite de 80 % grâce au recuit (900 °C).

8.3 Alliage de tungstène à densité élevée, produits médicaux connexes

L'alliage de tungstène lourd utilisé dans le domaine médical est dû à sa densité élevée (17,0-19,3 g/cm³), à son excellente capacité de protection contre les radiations, à son absence de toxicité et à ses bonnes propriétés mécaniques, ce qui en fait un choix idéal pour remplacer le plomb. [Les produits médicaux en alliage de tungstène lourd](#) comprennent des composants de protection contre les radiations, des conteneurs d'isotopes, des aiguilles médicales en alliage de tungstène, des cibles de radiothérapie, des écrans de protection médicale, des conteneurs de déchets nucléaires et des composants de gamma knife. Ces produits sont largement utilisés dans le diagnostic, le traitement et la gestion des matières radioactives, en tenant compte à la fois de l'efficacité et de la sécurité. Voici une présentation détaillée de chaque produit médical.

8.3.1 Composants de protection contre les radiations en alliage de tungstène lourd

Présentation du produit :

Les composants de protection contre les rayonnements sont utilisés dans les appareils à rayons X, les scanners et les appareils de radiothérapie pour protéger les patients et le personnel médical des rayonnements ionisants. Par exemple, une plaque de protection en alliage W-95Ni-Fe d'une épaisseur de 8 mm, d'une densité de 18,8 g/cm³ et d'un poids d'environ 1,5 kg/m² peut protéger 90 % des rayons X de 100 kV, ce qui représente un volume 33 % plus petit et un poids 20 % plus léger qu'une plaque de plomb (12 mm).

Matériaux et propriétés

Alliage W-95Ni-Fe (95 % tungstène, nickel-fer 7:3), densité 18,8 g/cm³, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 450 HV, allongement 15 %. Son numéro atomique élevé (Z = 74) lui confère une excellente capacité de blindage, un coefficient d'absorption massique de 0,15 cm²/g, 15 % supérieur à celui du plomb (0,13 cm²/g). Forte résistance à la corrosion, perte de masse < 0,1 % sous humidité pendant 1 000 heures, non toxique, conforme aux normes médicales. Coefficient de dilatation thermique 4,5 × 10⁻⁶ /K, déformation < 0,01 mm, adapté à une utilisation à long terme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Procédé de fabrication

La poudre de tungstène (granulométrie 3-5 μ m, pureté $\geq 99,9$ %) est mélangée à de la poudre de nickel-fer et pressée par presse isostatique à froid (CIP) à 300 MPa, avec une densité du corps vert de 13 g/cm³. Frittée dans l'hydrogène à 1480°C pendant 2 heures, la densité est de 18,8 g/cm³ et la masse volumique est > 99 %. La compression isostatique à chaud (HIP, 200 MPa, 1400°C, 1 heure) élimine les micropores et la porosité est $< 0,1$ %.

Tolérance d'usinage CNC $\pm 0,05$ mm, polissage de surface Ra 0,4 μ m, nickelage 5 μ m pour une résistance à la corrosion décuplée. Formes complexes imprimées par SLM, porosité < 1 %, précision $\pm 0,03$ mm.

Scénarios et cas d'application

Dans les appareils de tomodensitométrie, des plaques de blindage W-95Ni-Fe (10 mm d'épaisseur) sont placées autour du détecteur, avec un taux de blindage de 92 % et une réduction de 10 % du poids de l'équipement. Dans les appareils à rayons X, un blindage de 5 mm d'épaisseur protège les opérateurs et réduit la dose de rayonnement à moins de 0,5 mSv. Un hôpital utilise cette plaque de blindage (1 m², pesant 18,8 kg), qui améliore la sécurité des patients de 15 % et est 25 % plus petite en volume que les plaques de plomb.

Défis techniques et solutions :

Les défis incluent l'uniformité du blindage et la précision d'usinage. Écart de densité $< \pm 0,1$ g/cm³, obtenu par procédé HIP et frittage multizone (différence de température < 5 °C). Une dureté élevée nécessite un outillage CBN, ce qui prolonge la durée de vie de 50 %. La finition de surface est résolue par polissage multi-niveaux pour éviter la diffusion du rayonnement.

8.3.2 Conteneur d'isotopes en alliage de tungstène lourd

Présentation du produit :

Les conteneurs isotopiques servent à stocker et transporter des isotopes radioactifs (tels que le Tc-99m et l'I-131) afin d'éviter les fuites de rayonnement. Par exemple, un conteneur W-97Ni-Fe d'un diamètre extérieur de 50 mm et d'une hauteur de 100 mm présente une masse volumique de 19,0 g/cm³, une épaisseur de paroi de 5 mm et un poids d'environ 1,1 kg, protégeant ainsi 95 % des rayons gamma de 1 MeV.

Matériaux et propriétés

Alliage W-97Ni-Fe (97 % tungstène), densité 19,0 g/cm³, résistance à la traction 1 050 MPa, dureté 460 HV, allongement 12 %. Coefficient d'absorption massique 0,16 cm²/g, efficacité de blindage 20 % supérieure à celle du plomb. Résistance à la température 1 500 °C, pas de fusion en environnement explosif. Étanchéité extrêmement élevée, taux de fuite $< 10^{-6}$ Pa · m³/s, non toxique, conforme aux exigences de la médecine nucléaire.

Procédé de fabrication

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage sous vide à 1500°C (10^{-3} Pa), densité 19,0 g/cm³, porosité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

du traitement HIP < 0,1 %. Tolérance de cavité d'usinage CNC cinq axes $\pm 0,02$ mm, surface Ra 0,4 μ m, conception du couvercle fileté pour assurer l'étanchéité. Nickelage 5 μ m ou pulvérisation de revêtement TiN 0,1 mm, résistance à la corrosion augmentée de 15 %.

Scénarios et cas d'application

En médecine nucléaire, les conteneurs W-97Ni-Fe (6 mm d'épaisseur, 1,5 kg) stockent le Tc-99m, avec un taux de blindage de 96 % et une réduction de dose inférieure à 1 mSv. Lors du transport, des conteneurs de 8 mm d'épaisseur protègent l'I-131, augmentant la sécurité de 40 %. Un laboratoire utilise ce conteneur (1,2 kg), avec un taux de fuite de rayonnement < 0,01 %, ce qui est 10 % plus léger qu'un conteneur en plomb.

Défis techniques et solutions :

Les défis incluent l'optimisation de l'étanchéité et du poids. La précision du filetage est de $\pm 0,01$ mm, garantie par des contrôles CNC et par ultrasons. Le poids est réduit de 15 % grâce à la conception à gradient d'épaisseur de paroi (minimum 4 mm), et le procédé HIP garantit la résistance. La résistance aux chocs est améliorée par l'ajout de cobalt (2 %), et la ténacité est augmentée de 10 %.

8.3.3 Aiguille médicale en alliage de tungstène à haute densité

Présentation du produit :

Les aiguilles médicales en alliage de tungstène sont utilisées pour l'implantation de grains radioactifs (notamment dans le traitement du cancer de la prostate) afin d'administrer avec précision des sources radioactives. Par exemple, une aiguille en W-95Ni-Fe de 1 mm de diamètre et 20 mm de longueur présente une densité de 18,8 g/cm³ et un poids d'environ 0,3 g, ce qui lui confère une grande précision et un excellent blindage.

Matériaux et propriétés

: alliage W-95Ni-Fe, densité 18,8 g/cm³, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 450 HV, allongement 15 %. Forte capacité de blindage, épaisseur de 5 mm, protection contre 90 % des rayons β . Résistance à la corrosion : perte de masse < 0,1 % dans une solution saline physiologique pendant 1 000 heures, non toxique. La dureté de la pointe atteint 600 HV après cémentation et la force de perforation augmente de 20 %.

Procédé de fabrication

Après mélange de poudre de tungstène, presse hydraulique 500 MPa, bille mince pressée, frittée à 1480 °C, densité 18,8 g/cm³. Tolérance de tournage CNC $\pm 0,01$ mm, angle de pointe 30°, polissage de surface Ra 0,2 μ m. Traitement de cémentation (950 °C, 2 heures), résistance à l'usure augmentée de 30 %. Placage or 2 μ m, améliore la biocompatibilité.

Scénarios et cas d'application

: Lors de l'implantation de semences, l'aiguille W-95Ni-Fe (25 mm de long) délivre de l'iode 125 avec une précision de positionnement de $\pm 0,5$ mm, augmentant l'effet thérapeutique de 15 %. Lors d'une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

biopsie tumorale, une aiguille de 0,4 g perce les tissus et réduit les lésions de 20 %. Un hôpital utilise cette aiguille (1,2 mm de diamètre) et affiche un taux de réussite d'implantation de 98 %.

Défis techniques et solutions :

la finesse et la résistance sont des défis majeurs. Un diamètre inférieur à 1 mm nécessite des moules de haute précision, résolus par impression SLM, et une porosité inférieure à 0,5 %. La pointe est facile à casser, renforcée par cémentation et recuit (800 °C), et le taux de fracture est réduit à 0,1 %. La surface doit être stérile, avec un polissage multi-niveaux et une désinfection UV pour garantir sa stérilité.

8.3.4 Cible de radiothérapie en alliage de tungstène haute densité

Présentation du produitRadiothérapie

Les cibles sont utilisées dans les accélérateurs linéaires pour générer des rayons X de haute énergie. Par exemple, une cible en W-95Ni-Fe de 50 mm de diamètre et 5 mm d'épaisseur présente une densité de 18,8 g/cm³ et pèse environ 370 g. Elle peut générer un rayonnement de 10 MV lorsqu'elle est bombardée par un faisceau d'électrons.

Matériaux et propriétés :

alliage W-95Ni-Fe, densité 18,8 g/cm³, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 450 HV, point de fusion > 2 800 °C. Conductivité thermique 140 W / (m · K) , forte résistance aux chocs thermiques, capacité de blindage absorbant 90 % des rayons diffusés. Résistance à l'usure 5 fois supérieure à celle de l'acier et bonne stabilité de surface.

Procédé de fabrication

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage à 1480°C, densité 18,8 g/cm³, porosité par traitement HIP <0,1%. Tolérance d'usinage CNC ±0,05 mm, surface Ra 0,4 µm , revêtement ZrO₂ pulvérisé de 0,2 mm , résistance à la température 2000°C. Surface cible polie à Ra 0,1 µm pour réduire la diffusion.

Scénarios et cas d'application

: En radiothérapie, une cible en W-95Ni-Fe (6 mm d'épaisseur) produit un rayonnement de 12 MV, augmentant la profondeur de traitement de 20 %. En protonthérapie, une cible de 400 g augmente l'intensité du rayonnement de 15 %. Un hôpital a utilisé cette cible (60 mm de diamètre) et a augmenté la précision de l'irradiation tumorale de 10 %.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la résistance aux hautes températures et la régularité des radiations. Le revêtement ZrO₂ et le traitement HIP augmentent la résistance à la température de 25 %. La planéité de la surface cible est inférieure à 0,01 mm, obtenue grâce à un usinage ultra-précis. La diffusion est réduite de 5 % grâce à l'optimisation du revêtement.

8.3.5 Écran de protection médicale en alliage de tungstène à haute densité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Présentation du produit :

Les écrans de protection médicaux sont utilisés dans les blocs opératoires et les services de radiologie pour protéger le personnel médical. Par exemple, un écran de protection en W-95Ni-Fe de 500 mm de long, 300 mm de large et 5 mm d'épaisseur présente une densité de 18,8 g/cm³, pèse environ 14 kg et protège 90 % des rayons X de 100 kV.

Matériaux et propriétés

Alliage W-95Ni-Fe, densité 18,8 g/cm³, résistance à la traction 1000 MPa, dureté 450 HV, allongement 15 %. Coefficient d'absorption massique 0,15 cm²/g, résistance à la corrosion : perte de masse < 0,1 % dans le désinfectant pendant 1000 heures. Résistance à la fatigue 500 MPa, résistance aux chocs de manutention.

Procédé de fabrication

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage à 1480°C, masse volumique 18,8 g/cm³, porosité par traitement HIP < 0,1%. Tolérance de découpe CNC ±0,1 mm, polissage de surface Ra 0,8 µm, nickelage 5 µm ou pulvérisation de vernis transparent, esthétique augmentée de 20%.

Scénarios et cas d'application

En chirurgie radiologique, l'écran W-95Ni-Fe (6 mm d'épaisseur) est placé sur la table d'opération et la dose est réduite à 0,2 mSv. En salle de radiothérapie, l'écran de 20 kg protège les techniciens, avec un taux de blindage de 92 %. Un hôpital utilise cet écran (500 × 400 mm) et la sécurité est augmentée de 15 %.

Défis techniques et solutions

: poids et transparence. La réduction du poids est obtenue grâce à une conception creuse, soit une réduction de 10 %. Lorsqu'une transparence partielle est requise, du verre au plomb est incrusté pour maintenir un taux de blindage de 90 %. La durabilité est améliorée grâce au HIP et au revêtement, augmentant la durée de vie de 30 %.

8.3.6 Conteneur de déchets nucléaires en alliage de tungstène lourd

Présentation du produit :

Les conteneurs de déchets nucléaires servent à stocker les déchets de faible et moyenne activité afin d'éviter les fuites radioactives. Par exemple, un conteneur en W-97Ni-Fe, d'un diamètre extérieur de 200 mm et d'une hauteur de 300 mm, présente une masse volumique de 19,0 g/cm³, une épaisseur de paroi de 10 mm et un poids d'environ 11 kg, protégeant ainsi 98 % des rayons gamma (2 MeV).

Matériaux et propriétés :

Alliage W-97Ni-Fe, masse volumique 19,0 g/cm³, résistance à la traction 1 050 MPa, dureté 460 HV, allongement 12 %. Coefficient d'absorption massique 0,16 cm²/g, résistance à la température 1 500 °C, résistance à la corrosion, perte de masse en solution acide pendant 1 000 heures < 0,2 %. Étanchéité < 10⁻⁷ Pa · m³ /s.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Procédé de fabrication :

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage sous vide à 1500°C, densité 19,0 g/cm³, porosité <0,05% après traitement HIP. Tolérance d'usinage CNC $\pm 0,05$ mm, surface Ra 0,4 μ m, résistance du joint de soudure 300 MPa. Projection d'un revêtement céramique de 0,3 mm, résistance à la corrosion augmentée de 20%.

Scénarios et cas d'application

Dans les centrales nucléaires, les conteneurs W-97Ni-Fe (épaisseur de paroi 12 mm) stockent les déchets Co-60 avec un taux de blindage de 99 %. Lors du transport des déchets, le conteneur de 15 kg protège l'environnement et augmente la sécurité de 50 %. Une installation utilise ce conteneur (poids 12 kg) et réduit le rayonnement à 0,1 mSv.

Défis techniques et solutions :

les défis concernent l'étanchéité et la durabilité. Le soudage par faisceau d'électrons (5 kW) est utilisé, avec une résistance équivalente à 95 % du matériau de base. La corrosion à long terme est résolue par un revêtement céramique et un traitement HIP, augmentant la durée de vie de 40 %. Le poids est réduit de 10 % grâce à l'optimisation de l'épaisseur de paroi.

8.3.7 Composants de couteau gamma en alliage de tungstène lourd

Présentation du produit :

les composants Gamma Knife, tels que les collimateurs, servent à focaliser les rayons gamma afin de traiter les tumeurs. Par exemple, un collimateur W-90Ni-Fe présente une ouverture de 2 à 5 mm, une densité de 18,5 g/cm³, un poids d'environ 500 g et filtre 92 % des rayons Co-60.

Matériaux et propriétés :

Alliage W-90Ni-Fe, densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 400 HV, allongement 20 %. Coefficient d'absorption massique 0,14 cm²/g, résistance à la température 1 500 °C, conductivité augmentée de 20 % par dorure. Résistance à la fatigue 500 MPa, résistance aux vibrations haute fréquence.

Procédé de fabrication :

Pressage isostatique à froid 250 MPa, frittage à 1450°C, masse volumique 18,5 g/cm³, porosité par traitement HIP < 0,1 %. Usinage CNC cinq axes, tolérance de diamètre de trou $\pm 0,02$ mm, surface Ra 0,2 μ m, dorure 2 μ m, résistivité réduite à 4 $\mu\Omega \cdot$ cm. Test d'équilibre dynamique, excentricité < 5 μ m.

Scénarios et cas d'application

: Dans le gamma knife, le collimateur W-90Ni-Fe (poids 600 g) focalise le rayonnement, augmentant la précision de 15 %. Dans le traitement des tumeurs cérébrales, le composant d'ouverture de 3 mm augmente l'efficacité du rayonnement de 20 %. Un hôpital utilise ce composant (poids 550 g) et le taux de réussite du traitement augmente de 10 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Défis techniques et solutions :

Les défis concernent la précision du diamètre du trou et la durabilité. L'usinage cinq axes et le perçage laser garantissent une précision de $\pm 0,01$ mm. La résistance à l'usure est améliorée de 20 % grâce au revêtement TiN . La dispersion est réduite de 5 % grâce à l'optimisation de la forme du trou.

8.4 Outils et composants industriels en alliage de tungstène lourd

L'alliage de tungstène lourd utilisé dans le secteur industriel est dû à sa densité élevée ($17,0-19,3$ g/cm³), à son excellente résistance à l'usure (dureté 400-600 HV), à sa résistance mécanique élevée (700-1200 MPa) et à son excellente stabilité. Ce matériau est idéal pour la fabrication d'outils et de composants industriels tels que des outils de coupe, des matrices et des têtes de presse, des pièces antivibratoires, des outils de perçage, des roulements, des manchons de meulage et des contrepoids pour machines-outils lourdes. Ces produits sont largement utilisés dans l'usinage mécanique, l'extraction pétrolière, les équipements de fabrication et d'autres domaines pour améliorer l'efficacité et la durabilité. Vous trouverez ci-dessous une présentation détaillée de chaque outil et composant industriel.

8.4.1 Outils de coupe en alliage de tungstène lourd

Présentation du produit :

Les outils de coupe en alliage de tungstène lourd sont utilisés pour usiner des matériaux durs (tels que l'acier et les alliages de titane) et sont réputés pour leur dureté et leur résistance à l'usure élevées. Par exemple, un foret en alliage W-95Ni-Fe de 10 mm de diamètre et 50 mm de longueur présente une densité de $18,8$ g/cm³ et pèse environ 74 g. Il est 70 % plus résistant à l'usure que les outils en carbure traditionnels et sa durée de vie est deux fois plus longue.

Matériaux et propriétés :

Alliage W-95Ni-Fe (tungstène 95 %, nickel-fer 7:3), densité $18,8$ g/cm³, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 450 HV, allongement 15 %. Après cémentation, la dureté peut atteindre 600 HV et la résistance à l'usure est 5 fois supérieure à celle de l'acier. Sa conductivité thermique est de 140 W / (m · K) , sa résistance à la température est de $1\ 000$ °C et il ne se ramollit pas pendant la coupe. Sa ténacité à la rupture (K_{IC}) est d'environ 30 MPa·m^{^(1/2)} et il présente une forte résistance aux chocs,

Procédé de fabrication

La poudre de tungstène (granulométrie 3-5 μ m, pureté $\geq 99,9$ %) est mélangée à de la poudre de nickel-fer et pressée par presse isostatique à froid (CIP) à 300 MPa, avec une densité du corps vert de 13 g/cm³. Frittée dans l'hydrogène à 1480 °C pendant 2 heures, la densité est de $18,8$ g/cm³ et la masse volumique est > 99 %. La compression isostatique à chaud (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 heure) élimine les micropores et la porosité est $< 0,1$ %.

Tolérance d'usinage CNC $\pm 0,02$ mm, angle de coupe 60° , état de surface $Ra\ 0,4$ μ m . La cémentation (950 °C, 3 heures) augmente la résistance à l'usure de 30 %. Certains outils sont recouverts d'un revêtement TiN de $0,1$ mm , dont la dureté est portée à 650 HV.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Scénarios et cas d'application

: Dans l'industrie aéronautique, les forets W-95Ni-Fe (12 mm de diamètre) peuvent usiner des alliages de titane avec une durée de vie de 300 heures, soit deux fois plus longue que les outils en carbure. Dans l'usinage de pièces automobiles, une fraise de 100 g peut augmenter l'efficacité de 20 % lors de la découpe de pièces en acier. Une usine a utilisé cet outil (60 mm de long) pour réduire les coûts d'usinage de 15 % et les taux de rebut de 10 %.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la durabilité des bords et la stabilité thermique. L'écaillage des bords est réduit à 0,5 % grâce aux procédés HIP et de cémentation. L'adoucissement à haute température est contrôlé par le revêtement TiN et le liquide de refroidissement (débit 10 L/min), température < 200 °C. L'uniformité du grain est améliorée par la nanopoudre (granulométrie < 1 µ m) et la résistance à l'usure est augmentée de 20 %.

8.4.2 Moule et poinçon en alliage de tungstène à haute densité

Présentation du produit :

Les matrices et poinçons en alliage de tungstène lourd sont utilisés dans les procédés d'emboutissage, de forgeage et d'extrusion pour résister aux fortes pressions et à l'usure. Par exemple, une matrice en W-93Ni-Fe de 100 mm de long, 50 mm de large et 20 mm d'épaisseur présente une masse volumique de 18,5 g/cm³, un poids d'environ 925 g et une résistance à la pression de 2 000 MPa.

Matériaux et propriétés

Alliage W-93Ni-Fe (93 % tungstène), densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1050 MPa, dureté 420 HV, allongement 18 %. Sa résistance à l'usure est quatre fois supérieure à celle de l'acier, sa résistance à la fatigue est de 550 MPa et il peut supporter 10⁷ cycles sans fissure. Résistance à la température 1200 °C, déformation < 0,05 mm. Résistance à la corrosion superficielle : perte de masse < 0,2 % en cas de pollution par les hydrocarbures pendant 1000 heures.

Procédé de fabrication

Après mélange de poudre de tungstène, pressage par presse hydraulique 600 MPa, frittage à 1450 ° C, densité 18,5 g/cm³, porosité par traitement HIP < 0,1 %. Tolérance de fraisage CNC ± 0,05 mm, surface Ra 0,8 µ m, traitement de cémentation (950 ° C, 3 heures), dureté augmentée à 550 HV. Revêtement par pulvérisation de 0,2 mm Al₂O₃, résistance à la température 1500 ° C.

Scénarios et cas d'application

: Pour l'emboutissage de plaques d'acier, la matrice W-93Ni-Fe (poids 1 kg) peut poinçonner 1 million de fois sans usure et sa durée de vie est 3 fois supérieure à celle des matrices en acier. Pour le forgeage, un poinçon de 1,5 kg permet de traiter les alliages d'aluminium avec une augmentation de 25 % de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'efficacité. Une usine a utilisé cette matrice (100 × 60 mm), ce qui a augmenté la précision de production de 15 % et réduit les coûts de maintenance de 20 %.

Défis techniques et solutions :

Les défis incluent la résistance à la pression et l'usure de surface. La résistance à la pression est améliorée par HIP et l'ajout de cobalt (2 %), et la résistance est augmentée de 10 %. L'usure est résolue par cémentation et revêtement céramique, et la durée de vie est augmentée de 30 %. Les formes complexes sont imprimées par SLM avec une précision de $\pm 0,03$ mm.

8.4.3 Pièces antivibratoires en alliage de tungstène lourd

Présentation du produit :

Les pièces antivibratoires servent à réduire les vibrations des machines-outils ou des équipements et à améliorer la stabilité de fonctionnement. Par exemple, un bloc amortisseur en W-90Ni-Fe de 100 mm de long, 20 mm de large et 10 mm d'épaisseur présente une densité de 18,5 g/cm³ et un poids de 370 g. Son taux d'atténuation est 40 % supérieur à celui de l'acier.

Matériaux et propriétés

Alliage W-90Ni-Fe, densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1000 MPa, dureté 400 HV, allongement 20 %. Module d'élasticité 400 GPa, vitesse du son 4400 m/s, coefficient d'amortissement 30 % supérieur à celui de l'acier. Résistance à la température 500 °C, résistance à la corrosion, perte de masse < 0,1 % dans l'humidité pendant 1000 heures.

Procédé de fabrication :

pressage isostatique à froid à 250 MPa, frittage à 1450°C, densité 18,5 g/cm³. Tolérance d'usinage CNC $\pm 0,1$ mm, surface Ra 1,6 μ m, revêtement Al₂O₃ pulvérisé de 0,2 mm, résistance à la température 1500°C. La conception des micropores (diamètre 50 μ m) augmente la dissipation d'énergie et le taux d'atténuation augmente de 10 %.

Scénarios et cas d'application

: Sur les machines-outils à commande numérique, un bloc amortisseur de 500 g réduit les vibrations de 40 % et augmente la précision d'usinage de 10 %. Sur les presses poinçonneuses, une pièce d'amortissement de 1 kg réduit le bruit de 5 dB et augmente la durée de vie de 20 %. Une usine a utilisé cette pièce (120 mm de long) et a augmenté la stabilité de l'équipement de 15 %, avec une amplitude réduite à 2 mm.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent l'efficacité de l'amortissement et l'installation. Les vibrations haute fréquence (> 1000 Hz) sont optimisées grâce à des micro-trous, augmentant le taux d'atténuation de 15 %. Les forces de cisaillement d'installation (> 5000 N) sont traitées par des boulons en titane. Durabilité : Grâce au traitement HIP, la durée de vie en fatigue est augmentée de 25 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.4 Outils de forage en alliage de tungstène haute densité

Présentation du produit :

les outils de forage sont utilisés dans l'extraction pétrolière, gazière et géothermique et sont réputés pour leur résistance à l'usure et leur légèreté. Par exemple, un foret W-95Ni-Fe de 50 mm de diamètre et 200 mm de longueur présente une densité de 18,8 g/cm³, pèse environ 3,7 kg et a une durée de vie trois fois supérieure à celle d'un foret en acier.

Matériaux et propriétés :

alliage W-95Ni-Fe, densité 18,8 g/cm³, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 450 HV, 600 HV après cémentation. Sa résistance à l'usure est cinq fois supérieure à celle de l'acier, sa résistance à la fatigue est de 500 MPa et sa résistance à la température est de 1 000 °C. Résistance à la corrosion : perte de masse dans la boue pendant 1 000 heures inférieure à 0,5 %.

Procédé de fabrication

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage à 1480°C, densité 18,8 g/cm³, porosité par traitement HIP <0,1%. Tolérance d'usinage CNC ±0,05 mm, cémentation des bords (950°C, 3 heures), pulvérisation d'un revêtement TiN de 0,2 mm, dureté 650 HV. Structure complexe d'impression SLM, précision ±0,03 mm.

Scénarios et cas d'application :

En forage de puits profonds, le trépan W-95Ni-Fe (poids 4 kg) perce 5 000 m de roche et a une durée de vie de 300 heures. En forage offshore, la résistance à l'usure d'un outil de 5 kg augmente de 40 %. Un champ pétrolier utilise ce trépan (diamètre 60 mm), ce qui augmente l'efficacité du forage de 20 % et réduit le coût de 15 %.

Défis techniques et solutions :

Les défis incluent la résistance à l'usure et aux températures élevées. La carburation et le revêtement TiN améliorent la durabilité de 30 %. La température élevée est contrôlée par l'optimisation de la conductivité thermique et du liquide de refroidissement à < 300 °C. Le poids est réduit de 10 % grâce à l'optimisation structurelle.

8.4.5 Composants de roulement en alliage de tungstène lourd

Présentation du produit :

Les roulements sont utilisés dans les machines lourdes, offrant une densité élevée et une grande résistance à l'usure. Par exemple, une bague de roulement en W-90Ni-Fe de diamètre extérieur 80 mm, de diamètre intérieur 40 mm et d'épaisseur 20 mm présente une densité de 18,5 g/cm³, un poids d'environ 1,8 kg et une capacité de charge 50 % supérieure à celle de l'acier.

Matériaux et propriétés :

alliage W-90Ni-Fe, densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 400 HV, allongement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

20 %. Résistance à l'usure 4 fois supérieure à celle de l'acier, résistance à la fatigue 500 MPa, résistance à la température 800 °C. Coefficient de frottement 0,3, forte résistance à la corrosion.

Procédé de fabrication

Presse hydraulique Pressage 600 MPa, frittage 1450°C, densité 18,5 g/cm³, traitement HIP porosité <0,1%. Tolérance de tournage CNC ±0,02 mm, surface Ra 0,4 μ m, traitement de cémentation dureté 550 HV. Projection revêtement MoS₂ 0,1 mm, réduction du frottement 20%.

Scénarios et cas d'application :

Dans les excavatrices, une bague de roulement de 2 kg résiste à une charge de 100 tonnes et sa durée de vie est augmentée de 30 %. Dans les équipements éoliens, un composant de 1,5 kg réduit l'usure de 20 %. Une usine utilise ce roulement (diamètre extérieur 100 mm) et sa stabilité de fonctionnement est augmentée de 15 %.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la friction et la précision. Le revêtement MoS₂ et le polissage réduisent la friction de 15 %. Tolérance $\leq \pm 0,01$ mm obtenue grâce à l'usinage 5 axes . Durabilité améliorée grâce au HIP et à la cémentation, durée de vie augmentée de 25 %.

8.4.6 Manchon de meulage en alliage de tungstène lourd

Présentation du produit :

les manchons de meulage sont utilisés dans les équipements de meulage pour leur résistance au poids et à l'usure. Par exemple, un manchon en W-93Ni-Fe de diamètre intérieur de 30 mm, de diamètre extérieur de 50 mm et de longueur de 100 mm présente une densité de 18,5 g/cm³, un poids d'environ 1,4 kg et une résistance à l'usure quatre fois supérieure à celle de l'acier.

Matériaux et propriétés

: Alliage W-93Ni-Fe, densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1050 MPa, dureté 420 HV, allongement 18 %. Forte résistance à l'usure, résistance à la fatigue 550 MPa, résistance à la température 1000 °C. Résistance à la corrosion : perte de masse < 0,2 % dans l'abrasif pendant 1000 heures.

Procédé de fabrication :

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage à 1450°C, masse volumique 18,5 g/cm³, porosité <0,1% après traitement HIP. Tolérance d'usinage CNC ±0,05 mm, surface Ra 0,8 μ m, dureté de cémentation 550 HV. Revêtement Al₂O₃ par projection 0,2 mm, résistance à la température 1500°C.

Scénarios et cas d'application :

Dans un broyeur, un manchon de 1,5 kg broie la céramique et augmente sa durée de vie de 30 %. Dans le traitement du minerai, un manchon de 2 kg augmente sa résistance à l'usure de 40 %. Une usine utilise ce manchon (120 mm de long) et augmente son efficacité de 15 % et ses cycles de maintenance de 20 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Défis techniques et solutions :

Les défis concernent la résistance à l'usure des parois internes et la dilatation thermique. La cémentation et le revêtement améliorent la durabilité de 25 %. La dilatation thermique est réduite de 80 % par recuit (900 °C), avec une déformation inférieure à 0,01 mm. La précision est obtenue grâce à un usinage ultra-précis.

8.4.7 Contrepoids lourds en alliage de tungstène pour machines-outils lourdes

Présentation du produit

Les contrepoids de machines-outils robustes sont utilisés pour équilibrer les gros équipements et réduire les vibrations. Par exemple, un bloc de contrepoids W-90Ni-Fe d'une longueur de 300 mm, d'une largeur de 100 mm et d'une épaisseur de 50 mm a une densité de 18,5 g/cm³ et un poids de 13,9 kg, ce qui est 55 % plus petit qu'un bloc en acier.

Matériaux et propriétés

Alliage W-90Ni-Fe, densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1000 MPa, dureté 400 HV, allongement 20 %. Résistance à la fatigue 500 MPa, tenue 10⁷ cycles. Résistance à la température 500 °C, résistance à la corrosion 1000 heures, perte de masse en cas de pollution par l'huile < 0,1 %.

Procédé de fabrication :

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage à 1450 °C, masse volumique 18,5 g/cm³, porosité par traitement HIP < 0,1 %. Tolérance d'usinage CNC ± 0,2 mm, surface Ra 1,6 µm, projection d'une couche protectrice de 0,1 mm, résistance à la corrosion augmentée de 30 %. Les grands contrepoids sont épissés, résistance au brasage 200 MPa.

Scénarios et cas d'application

: Sur les tours, un contrepoids de 20 kg réduit les vibrations de 40 % et augmente la précision de 10 %. Sur les fraiseuses, un contrepoids de 15 kg améliore la stabilité de 15 %. Une usine utilise ce contrepoids (pesant 18 kg), ce qui réduit le bruit d'usinage de 10 dB et augmente la durée de vie de 20 %.

Défis techniques et solutions

: répartition du poids et coût. Uniformité de la densité obtenue par pressage multipoint et HIP avec un écart < 0,1 g/cm³. Coûts réduits de 20 % grâce au recyclage de la poudre. Montage optimisé par joints flexibles avec force de cisaillement portée à 5 000 N.

8.5 Produits électroniques et énergétiques en alliage de tungstène lourd

L'alliage de tungstène lourd utilisé dans les domaines de l'électronique et de l'énergie est dû à sa densité élevée (17,0-19,3 g/cm³), son excellente conductivité thermique (120-180 W/(m·K)), sa grande résistance (700-1200 MPa), sa résistance aux températures élevées (point de fusion > 2800 °C) et sa bonne capacité de protection contre les radiations. Ce matériau est privilégié pour la fabrication d'électrodes, de dissipateurs thermiques, de composants de réacteurs nucléaires, de contrepoids de batteries, de composants d'équipements solaires, de cibles d'anodes de tubes à rayons X et de contrepoids

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'éoliennes. Ces produits jouent un rôle essentiel dans les équipements électroniques, la conversion d'énergie et les systèmes de production d'électricité, améliorant leurs performances et leur fiabilité. Vous trouverez ci-dessous une présentation détaillée de chaque produit électronique et énergétique.

8.5.1 Matériaux d'électrodes en alliage de tungstène à haute densité

Présentation du produit :

Les électrodes en alliage de tungstène lourd sont utilisées pour l'usinage par électroérosion (EDM), le soudage par résistance et le coupage plasma. Elles sont réputées pour leur conductivité et leur résistance à l'usure élevées. Par exemple, une électrode en alliage W-80Cu de 10 mm de diamètre et 50 mm de longueur présente une masse volumique de 17,0 g/cm³ et pèse environ 67 g. Sa conductivité est 20 % supérieure à celle du cuivre pur et sa résistance à l'usure est 5 fois supérieure à celle de l'acier.

Matériaux et propriétés

Alliage W-80Cu (80 % tungstène, 20 % cuivre), densité 17,0 g/cm³, résistance à la traction 700 MPa, dureté 380 HV, allongement 10 %. Conductivité électrique 45 % IACS (International Annealed Copper Standard), conductivité thermique 180 W / (m · K) , résistance à la température 1500 °C. Il présente une forte résistance à l'érosion par arc et la perte de masse après 1000 décharges est inférieure à 0,5 %. Résistance à la corrosion : la perte de masse dans l'humidité pendant 1000 heures est inférieure à 0,2 %.

Procédé de fabrication :

La poudre de tungstène (granulométrie 3-5 μ m, pureté ≥ 99,9 %) est mélangée à de la poudre de cuivre et pressée par presse isostatique à froid (CIP) à 250 MPa, avec une masse volumique du corps vert de 11 g/cm³. Frittée dans l'hydrogène à 1350°C pendant 2 heures, la phase de cuivre fond et s'infiltre dans la matrice de tungstène, avec une masse volumique de 17,0 g/cm³ et une masse volumique > 98 %. La compression isostatique à chaud (HIP, 150 MPa, 1300°C, 1 heure) élimine les micropores et la porosité est < 0,1 %.

Tolérance de tournage CNC ± 0,02 mm, polissage de surface Ra 0,4 μ m , dorure 2 μ m , résistivité réduite à 3 μΩ· cm. La pointe de l'électrode est cémentée (900 °C, 2 heures) et la dureté est portée à 450 HV.

Scénarios et cas d'application

En électroérosion, les électrodes W-80Cu (12 mm de diamètre) permettent de souder de l'acier moulé avec une durée de vie de 500 heures, soit trois fois supérieure à celle des électrodes en cuivre. En soudage par résistance, une électrode de 100 g permet de souder des plaques d'aluminium avec un rendement supérieur de 25 %. Une usine a utilisé cette électrode (60 mm de longueur) pour augmenter la précision d'usinage de 15 % et réduire les pertes d'arc de 20 %.

Défis techniques et solutions :

Les défis incluent l'équilibre entre conductivité et résistance à l'usure. La teneur en cuivre est optimisée à 20 %-30 %, la conductivité augmente de 10 % et le traitement HIP augmente la résistance de 15 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'érosion par arc est réduite de 30 % grâce au placage à l'or et à la cémentation. La rugosité de surface est contrôlée par polissage multi-niveaux et l'efficacité de dissipation thermique augmente de 10 %.

8.5.2 Dissipateur thermique en alliage de tungstène haute densité (radiateur)

Présentation du produit

Les dissipateurs thermiques sont utilisés pour dissiper la chaleur des appareils électroniques haute puissance (tels que les processeurs et les LED) afin d'optimiser la gestion thermique avec une conductivité thermique et une densité élevées. Par exemple, un dissipateur thermique en alliage W-85Cu d'une longueur de 50 mm, d'une largeur de 50 mm et d'une épaisseur de 5 mm a une densité de 17,5 g/cm³ et pèse environ 219 g, et son efficacité de dissipation thermique est 50 % supérieure à celle de l'aluminium.

Matériaux et propriétés

Alliage W-85Cu (85 % tungstène, 15 % cuivre), densité 17,5 g/cm³, résistance à la traction 800 MPa, dureté 400 HV, allongement 8 %. Conductivité thermique 170 W/(m · K), légèrement inférieure à celle du tungstène pur (174 W/(m · K)) mais meilleure aptitude à la transformation. Résistance à la température 1500 °C, coefficient de dilatation thermique $6,5 \times 10^{-6}$ /K, puces de silicium correspondantes ($4,2 \times 10^{-6}$ /K), déformation < 0,01 mm.

Procédé de fabrication :

Mélange de poudre de tungstène et de poudre de cuivre, pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage à 1350°C, densité 17,5 g/cm³, porosité du traitement HIP < 0,1%. Tolérance de fraisage CNC $\pm 0,05$ mm, surface Ra 0,8 μ m, conception de microcanaux (largeur 0,5 mm) augmentant la zone de dissipation thermique de 20 %. Nickelage 5 μ m, résistance à la corrosion augmentée de 15 %.

Scénarios et cas d'application :

Dans les processeurs de serveur, le dissipateur thermique W-85Cu (poids 250 g) offre une puissance de dissipation thermique de 200 W et une réduction de température de 15 °C. Dans les LED haute puissance, un dissipateur thermique de 150 g peut prolonger la durée de vie de la LED de 30 %. Une usine d'électronique a utilisé ce dissipateur thermique (50 × 50 mm) et la température de fonctionnement de la puce a été abaissée à 60 °C, avec une augmentation de 10 % des performances.

Défis techniques et solutions :

les défis incluent l'adaptation de la dilatation thermique et l'efficacité de la dissipation thermique. La teneur en cuivre est ajustée à 15-20 %, et l'écart de dilatation thermique est inférieur à 10 %. Les microcanaux sont réalisés par traitement laser, ce qui augmente la dissipation thermique de 25 %. Le poids est réduit de 15 % grâce à la conception creuse, et le procédé HIP garantit la résistance.

8.5.3 Composants de réacteur nucléaire en alliage de tungstène lourd

Présentation du produit :

Composants de réacteurs nucléaires tels que blocs de blindage ou manchons de barres de contrôle,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

utilisant une densité élevée et des capacités de protection contre les radiations. Par exemple, un bloc de blindage en W-97Ni-Fe de 200 mm de long, 50 mm de large et 20 mm d'épaisseur présente une densité de 19,0 g/cm³, pèse environ 1,9 kg et protège contre 98 % des rayons gamma (2 MeV).

Matériaux et propriétés :

Alliage W-97Ni-Fe, densité 19,0 g/cm³, résistance à la traction 1 050 MPa, dureté 460 HV, allongement 12 %. Coefficient d'absorption massique 0,16 cm²/g, résistance à la température 1 500 °C, résistance à la corrosion, perte de masse < 0,2 % dans le liquide de refroidissement pendant 1 000 heures. Résistance à la fatigue 500 MPa, résistance aux chocs thermiques.

Procédé de fabrication

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage sous vide à 1500°C (10⁻³ Pa), densité 19,0 g/cm³, porosité < 0,05 % après traitement HIP. Tolérance d'usinage CNC ± 0,05 mm, surface Ra 0,4 μm, revêtement ZrO₂ pulvérisé de 0,3 mm, résistance à la température 2000 °C. Résistance au brasage des pièces épissées 300 MPa.

Scénarios et cas d'application

Dans un réacteur à eau pressurisée, le bloc de blindage W-97Ni-Fe (poids 2 kg) est placé à l'extérieur du cœur, et le rayonnement est réduit à 0,1 mSv. Dans un réacteur à neutrons rapides, le boîtier de 3 kg protège les barres de contrôle, et la durée de vie est augmentée de 20 %. Une centrale nucléaire utilise ce composant (200 × 60 mm), ce qui augmente la sécurité de 15 % et prolonge le cycle de maintenance de 25 %.

Défis techniques et solutions

: résistance aux radiations et aux températures élevées. Le revêtement ZrO₂ et le traitement HIP augmentent la durabilité de 30 %. Les microfissures sont réduites de 80 % grâce au recuit (900 °C). Le poids est réduit de 10 % grâce à une structure optimisée sans réduction de la résistance.

8.5.4 Contrepoids de batterie en alliage de tungstène à haute densité

Présentation du produit

Les contrepoids de batterie sont utilisés dans les véhicules électriques ou les systèmes de stockage d'énergie pour équilibrer la répartition du poids. Par exemple, un contrepoids en W-90Ni-Fe de 100 mm de long, 30 mm de large et 10 mm d'épaisseur présente une densité de 18,5 g/cm³ et pèse environ 555 g, soit 55 % de moins qu'un contrepoids en acier.

Matériaux et propriétés :

Alliage W-90Ni-Fe, densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 400 HV, allongement 20 %. Résistance à la fatigue 500 MPa, résistance à la température 500 °C, résistance à la corrosion, perte de masse < 0,1 % dans l'électrolyte pendant 1 000 heures. Conductivité thermique 130 W/(m·K), bonne dissipation thermique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Procédé de fabrication :

Presse hydraulique, pressage 600 MPa, frittage 1450 °C, densité 18,5 g/cm³, porosité par traitement HIP < 0,1 %. Tolérance d'usinage CNC ± 0,1 mm, surface Ra 1,6 µm, pulvérisation d'une couche protectrice de 0,1 mm, résistance à la corrosion augmentée de 20 %. Les pièces de formes spéciales sont imprimées par SLM, avec une précision de ± 0,05 mm.

Scénarios et cas d'application :

Dans les véhicules électriques, un contrepoids de 1 kg est placé sur la batterie pour équilibrer le rapport de charge par essieu et augmenter la durée de vie de la suspension de 20 %. Dans les armoires de stockage d'énergie, un contrepoids de 2 kg améliore la stabilité de 15 %. Un constructeur automobile a utilisé ce contrepoids (pesant 800 g), ce qui a augmenté la maniabilité de 10 % et réduit la consommation d'énergie de 5 %.

Défis techniques et solutions :

les défis concernent le coût et l'installation. Le recyclage de la poudre réduit les coûts de 20 %. L'espace d'installation est optimisé grâce à l'impression 3D de formes spéciales, et l'écart de poids est inférieur à ± 2 g. La durabilité est améliorée grâce au HIP, et la durée de vie est prolongée de 25 %.

8.5.5 Composants d'équipement solaire en alliage de tungstène lourd

Présentation du produit :

les composants de l'équipement solaire, tels que les poids ou les supports, permettent d'ajuster l'angle et la stabilité du panneau. Par exemple, un poids W-90Ni-Fe de 150 mm de long, 50 mm de large et 20 mm d'épaisseur présente une densité de 18,5 g/cm³, un poids d'environ 1,4 kg et une résistance au vent accrue de 20 %.

Matériaux et propriétés :

Alliage W-90Ni-Fe, densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 400 HV, allongement 20 %. Résistance à la température 500 °C, résistance à la corrosion, perte de masse < 0,1 % en 1 000 heures en extérieur. Résistance à la fatigue 500 MPa, résistance au vent.

Procédé de fabrication :

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage à 1450°C, masse volumique 18,5 g/cm³, porosité < 0,1% après traitement HIP. Tolérance d'usinage CNC ± 0,1 mm, surface Ra 1,6 µm, revêtement Al₂O₃ pulvérisé de 0,2 mm, résistance à la température 1500°C. Résistance au brasage des pièces épissées 200 MPa.

Scénarios et cas d'application :

Dans les centrales photovoltaïques, un contrepoids de 2 kg ajuste l'inclinaison des panneaux et augmente le rendement de production d'électricité de 10 %. Dans les panneaux solaires portables, un support de 1 kg augmente la résistance au vent de 15 %. Un projet a utilisé ce contrepoids (pesant 1,5 kg), ce qui a augmenté la stabilité de 20 % et la durée de vie de 30 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la résistance aux intempéries et le poids. Le revêtement Al_2O_3 et le traitement HIP augmentent la durabilité de 25 %. Le poids est réduit de 15 % grâce à la conception creuse. L'installation est optimisée grâce à des boulons avec une force de cisaillement de 5 000 N.

8.5.6 Cible d'anode de tube à rayons X en alliage de tungstène lourd

Présentation du produit

Les cibles anodiques pour tubes à rayons X sont utilisées pour générer des rayons X à haute énergie. Par exemple, les cibles W-95Ni-Fe d'un diamètre de 50 mm et d'une épaisseur de 5 mm ont une densité de $18,8 \text{ g/cm}^3$, un poids d'environ 370 g et peuvent résister à un bombardement électronique de 10 MV.

Matériaux et propriétés :

alliage W-95Ni-Fe, densité $18,8 \text{ g/cm}^3$, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 450 HV, point de fusion $> 2 800 \text{ }^\circ\text{C}$. Conductivité thermique $140 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, forte résistance aux chocs thermiques, protection contre 90 % des rayons diffusés. La résistance à l'usure est cinq fois supérieure à celle de l'acier et la stabilité de surface est excellente.

Procédé de fabrication :

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage à $1480 \text{ }^\circ\text{C}$, densité $18,8 \text{ g/cm}^3$, porosité par traitement HIP $< 0,1 \%$. Tolérance d'usinage CNC $\pm 0,05 \text{ mm}$, surface Ra $0,1 \text{ }\mu\text{m}$, pulvérisation de 0,2 mm de revêtement ZrO_2 , résistance à la température $2000 \text{ }^\circ\text{C}$. Le polissage de la surface cible réduit la diffusion de 5 %.

Scénarios et cas d'application :

dans les tubes à rayons X médicaux, une cible en W-95Ni-Fe (6 mm d'épaisseur) produit des rayons de 12 MV, augmentant ainsi l'efficacité de 15 %. Lors d'essais industriels, une cible de 400 g augmente la pénétration de 20 %. Un appareil utilise cette cible (60 mm de diamètre), augmentant l'intensité du rayonnement de 10 % et la durée de vie de 25 %.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la résistance aux hautes températures et la cohérence. Le revêtement ZrO_2 et le traitement HIP augmentent la résistance à la température de 30 %. La planéité de la surface cible $< 0,01 \text{ mm}$ est obtenue grâce à un usinage ultra-précis. La dispersion est réduite de 5 % grâce à l'optimisation du revêtement.

8.5.7 Contrepoids d'éolienne en alliage de tungstène à haute densité

Présentation du produit :

les contrepoids d'éoliennes servent à équilibrer les pales ou les nacelles. Par exemple, un contrepoids en W-90Ni-Fe de 200 mm de long, 100 mm de large et 50 mm d'épaisseur présente une densité de $18,5 \text{ g/cm}^3$ et un poids d'environ 9,25 kg, soit 55 % de moins qu'un bloc en acier.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Matériaux et propriétés

Alliage W-90Ni-Fe, densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1000 MPa, dureté 400 HV, allongement 20 %. Résistance à la fatigue 500 MPa, tenue 10⁷ cycles. Résistance à la température 500 °C, résistance à la corrosion Perte de masse < 0,1 % sous l'effet de la brise marine pendant 1000 heures.

Procédé de fabrication :

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage à 1450 °C, masse volumique 18,5 g/cm³, porosité par traitement HIP < 0,1 %. Tolérance d'usinage CNC ± 0,2 mm, surface Ra 1,6 µm, projection d'une couche protectrice de 0,1 mm, résistance à la corrosion augmentée de 20 %. Résistance au brasage des grands contreponds 200 MPa.

Scénarios et cas d'application

: Dans l'éolien offshore, un contreponds de 10 kg équilibre une pale de 3 MW et réduit les vibrations de 30 %. Dans l'éolien terrestre, un contreponds de 15 kg améliore la stabilité de la cabine de 15 %. Un parc éolien utilise ce contreponds (pesant 12 kg), ce qui augmente le rendement de la production d'électricité de 10 % et la durée de vie de 20 %.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la résistance aux intempéries et la répartition du poids. Durabilité du revêtement et du traitement HIP augmentée de 25 %. Uniformité de la densité contrôlée par pressage multipoint, écart < 0,1 g/cm³. Installation optimisée par une connexion flexible, capacité de charge augmentée à 6 000 N.

8.6 Produits personnalisés en alliage de tungstène lourd

Les produits personnalisés en alliages de tungstène haute densité tirent parti de leur forte densité (17,0-19,3 g/cm³), de leurs excellentes propriétés mécaniques (700-1200 MPa), de leur résistance à l'usure et de leur usinabilité pour répondre à des besoins spécifiques grâce à une conception personnalisée. Ces produits comprennent des pièces en alliage de tungstène imprimées en 3D, des contreponds de forme spéciale, des œuvres d'art et des pièces décoratives, des composants d'instruments expérimentaux, des pièces de microprécision, des cryptomonnaies et des cartes bancaires, etc., largement utilisés dans l'industrie, la recherche scientifique, l'art et la finance. La conception personnalisée, combinée à des technologies de fabrication avancées (comme l'impression 3D) et à un usinage de précision, confère au produit des performances et une apparence uniques. Vous trouverez ci-dessous une présentation détaillée de chaque produit personnalisé.

8.6.1 Pièces d'impression 3D en alliage de tungstène haute densité

Présentation du produit :

Les pièces en alliage de tungstène imprimées en 3D sont produites avec des géométries complexes grâce à la technologie de fabrication additive pour répondre aux besoins spécifiques des secteurs de l'aéronautique, de la médecine et d'autres secteurs. Par exemple, une pièce en W-90Ni-Fe de 50 mm de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

diamètre, dotée d'une structure en nid d'abeille, présente une densité de 18,5 g/cm³ et pèse environ 500 g, ce qui réduit son poids de 10 % tout en préservant sa résistance.

Matériaux et propriétés

Alliage W-90Ni-Fe (90 % tungstène, nickel-fer 7:3), densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1000 MPa, dureté 400 HV, allongement 20 %. Résistance à la température 500 °C, résistance à la fatigue 500 MPa, tenue 10⁷ cycles. Résistance à la corrosion Perte de masse < 0,1 % sous humidité pendant 1000 heures. Porosité < 1 % après impression 3D, proche des performances de frittage traditionnel.

Procédé de fabrication

De la poudre de tungstène (granulométrie 1-3 µm, pureté ≥ 99,9 %) a été mélangée à de la poudre de nickel-fer et la technologie de fusion sélective par laser (SLM) a été utilisée avec une puissance laser de 3000 W, une épaisseur de couche de 30 µm et une vitesse d'impression de 10 cm³/h. Après l'impression, le pressage isostatique à chaud (HIP, 200 MPa, 1400°C, 1 heure) a augmenté la densité à 18,5 g/cm³ et réduit la porosité à 0,5 %.

Le post-traitement comprend une finition CNC avec une tolérance de ± 0,03 mm et un état de surface Ra 0,8 µm. Aucun moule n'est requis pour les cavités complexes, ce qui augmente la liberté de conception de 50 %. La surface peut être recouverte d'un revêtement Al₂O₃ de 0,1 mm d'épaisseur, résistant à une température de 1 500 °C.

Scénarios et cas d'application

Dans l'aéronautique, des pièces de forme spéciale en W-90Ni-Fe (poids 600 g) sont utilisées pour les contrepoids des moteurs, réduisant ainsi le volume de 15 %. Dans le traitement médical, la résistance des stents implantés pesant 300 g est augmentée de 20 %. Une entreprise aérospatiale a utilisé cette technologie pour imprimer des pièces en W-90Ni-Fe (50 × 50 mm), raccourcissant le cycle de développement de 30 jours à 15 jours et augmentant la constance des performances de 10 %.

Défis techniques et solutions :

Les défis concernent la porosité et la précision. La porosité de l'impression SLM a été réduite à 0,5 % grâce à l'optimisation des paramètres laser (puissance de 3 500 W). La précision a été améliorée à ± 0,02 mm grâce au post-traitement HIP et CNC. La faible fluidité de la poudre a été améliorée par l'ajout de 0,5 % de nano-oxyde, et le taux de réussite de l'impression a augmenté de 20 %.

8.6.2 Contrepoids de forme spéciale en alliage de tungstène à haute densité

Présentation du produit :

les contrepoids de forme spéciale répondent aux besoins d'équilibrage des applications non standard, telles que les contrepoids arqués ou multi-trous. Par exemple, le contrepoids arqué en W-95Ni-Fe, d'une longueur de 100 mm, d'une largeur de 30 mm et d'une épaisseur de 20 mm, présente une densité de 18,8 g/cm³ et un poids d'environ 564 g, ce qui lui permet de s'adapter aux espaces d'installation complexes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Matériaux et propriétés :

Alliage W-95Ni-Fe, densité 18,8 g/cm³, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 450 HV, allongement 15 %. Résistance à la température 1 000 °C, résistance à la fatigue 500 MPa, résistance à la corrosion, perte de masse < 0,2 % dans l'eau de mer pendant 1 000 heures. Diversité des formes grâce à une conception sur mesure, écart de poids < ± 2 g.

Procédé de fabrication

Après mélange de poudre de tungstène, pressage isostatique à froid dans un moule spécial de 300 MPa, frittage à 1450 °C, densité 18,8 g/cm³, porosité par traitement HIP < 0,1 %. Les formes complexes sont imprimées par SLM, puissance laser 3000 W, précision ± 0,05 mm. Tolérance d'usinage CNC ± 0,03 mm, surface Ra 1,6 µm, nickelage 5 µm améliorant la résistance à la corrosion de 10 %.

Scénarios et cas d'application

: Dans les drones, un contrepoids arqué de 500 g ajuste le centre de gravité et augmente la stabilité de 15 %. Dans les navires, un contrepoids poreux de 1 kg réduit le poids de 10 % et augmente la résistance au vent et aux vagues de 20 %. Une usine de machines utilise un contrepoids W-95Ni-Fe (800 g), ce qui augmente l'utilisation de l'espace d'installation de 30 % et atteint une constance des performances de 99 %.

Défis techniques et solutions :

Les défis incluent la précision des formes et l'efficacité de la production. Les moules complexes sont fabriqués par impression 3D, ce qui réduit le cycle de développement de 50 %. La régularité des lots est optimisée grâce à des tests de compression isostatique à chaud (CIC) et d'équilibrage dynamique, avec une excentricité inférieure à 5 µm. Les coûts sont réduits de 20 % grâce au recyclage de la poudre.

8.6.3 Œuvres d'art et pièces décoratives en alliage de tungstène haute densité

Présentation du produit :

Les œuvres d'art et les pièces décoratives en alliage de tungstène haute densité sont utilisées dans la sculpture, la joaillerie, etc. Leur densité et leur brillance élevées rehaussent la texture. Par exemple, une pièce décorative sphérique en W-93Ni-Fe de 30 mm de diamètre présente une densité de 18,5 g/cm³ et pèse environ 260 g. Elle est à la fois lourde et esthétique.

Matériaux et propriétés :

alliage W-93Ni-Fe, densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1 050 MPa, dureté 420 HV, allongement 18 %. Résistance à l'usure 4 fois supérieure à celle de l'acier, résistance à la corrosion à la sueur (1 000 heures), perte de masse < 0,1 %. Surface polie à Ra 0,2 µm, haute brillance, conductivité augmentée de 20 % après dorure.

Procédé de fabrication

Après mélange de poudre de tungstène, il est pressé par presse hydraulique à 500 MPa et fritté à 1450 °C,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

avec une densité de 18,5 g/cm³. La tolérance d'usinage CNC est de ± 0,05 mm, le polissage de surface multi-niveaux Ra 0,1 µm, le placage à l'or ou au rhodium (2-5 µm), et l'esthétique augmente de 30 %. Les détails artistiques sont obtenus par gravure laser, avec une profondeur de 0,1 à 0,5 mm.

Scénarios et cas d'application :

En sculpture, une œuvre de 1 kg de W-93Ni-Fe améliore la texture et augmente la valeur marchande de 20 %. En bijouterie, un pendentif de 50 g augmente la résistance à l'usure de 30 %. Un artiste utilise ce matériau (300 g) pour fabriquer des boules décoratives, aussi brillantes que des métaux précieux après polissage, et les ventes augmentent de 15 %.

Défis techniques et solutions :

Les défis concernent la finition de surface et le coût. Le polissage nécessite des meules multi-niveaux et un polissage chimique, ce qui augmente la brillance de 25 %. Les coûts sont réduits de 15 % grâce à la production en petites séries et au recyclage. La gravure fine est obtenue avec une précision laser (± 0,01 mm).

8.6.4 Composants d'instruments expérimentaux en alliage de tungstène lourd

Présentation du produit :

les composants d'instruments expérimentaux sont utilisés dans les équipements de recherche scientifique, tels que les contrepoids de gravimètres. Par exemple, un composant en W-97Ni-Fe de 50 mm de long, 20 mm de large et 10 mm d'épaisseur présente une masse volumique de 19,0 g/cm³ et un poids d'environ 190 g, ce qui permet une distribution de masse de haute précision.

Matériaux et propriétés

Alliage W-97Ni-Fe, densité 19,0 g/cm³, résistance à la traction 1050 MPa, dureté 460 HV, allongement 12 %. Coefficient de dilatation thermique $4,5 \times 10^{-6}$ /K, déformation < 0,01 mm, résistance à la température 1500 °C. Résistance à la corrosion : perte de masse < 0,1 % en laboratoire pendant 1000 heures.

Procédé de fabrication :

pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage sous vide 1 500 °C, masse volumique 19,0 g/cm³, porosité par traitement HIP < 0,05 %. Tolérance d'usinage CNC cinq axes ± 0,01 mm, surface Ra 0,4 µm, nickelage 5 µm pour améliorer la résistance à la corrosion. Excentricité d'essai d'équilibre dynamique < 5 µm.

Scénarios et cas d'application

Dans un gravimètre, un contrepoids de 200 g améliore la précision de mesure de 0,005 %. Dans une centrifugeuse, un composant de 500 g stabilise la vitesse (10 000 tr/min) et réduit l'erreur de 10 %. Un institut de recherche a utilisé un composant W-97Ni-Fe (pesant 250 g) et la répétabilité expérimentale a augmenté de 15 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la précision et la stabilité. Des tolérances $\leq \pm 0,005$ mm sont obtenues grâce à un usinage ultra-précis. La dilatation thermique est optimisée par recuit (900 °C), avec une déformation réduite de 80 %. L'écart de poids est contrôlé par un pressage de haute précision, $\leq \pm 1$ g.

8.6.5 Pièces de micro-précision en alliage de tungstène haute densité

Présentation du produit

Les pièces de micro-précision sont utilisées dans les dispositifs électroniques ou optiques, comme les contreponds de lentilles. Par exemple, une pièce en W-95Ni-Fe de 5 mm de diamètre et 2 mm d'épaisseur présente une densité de 18,8 g/cm³ et un poids d'environ 0,74 g, offrant une grande précision et une taille réduite.

Matériaux et propriétés :

alliage W-95Ni-Fe, densité 18,8 g/cm³, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 450 HV, allongement 15 %. Résistance à l'usure 5 fois supérieure à celle de l'acier, résistance à la température 1 000 °C, résistance à la corrosion, perte de masse sous humidité pendant 1 000 heures $< 0,1$ %. État de surface Ra 0,2 µm.

Procédé de fabrication

Après mélange de poudre de tungstène, micro-moulage (300 MPa), frittage à 1480°C, densité 18,8 g/cm³, porosité par traitement HIP $< 0,1\%$. Technologie de micro-usinage (découpe CNC ou laser) tolérance $\pm 0,005$ mm, polissage de surface Ra 0,1 µm, placage or 2 µm pour améliorer la conductivité.

Scénarios et cas d'application

: Dans les objectifs d'appareil photo, un contreponds de 1 g ajuste la distance focale, augmentant ainsi la précision de 10 %. Dans les micromoteurs, une pièce de 0,5 g stabilise la vitesse de rotation de 15 %. Une entreprise d'optique utilise cette pièce (6 mm de diamètre) pour réduire les erreurs d'assemblage de 5 % et augmenter les performances de 20 %.

Défis techniques et solutions :

les défis concernent la micro-dimension et la résistance. La précision du moule est améliorée à $\pm 0,002$ mm grâce à l'impression SLM. La résistance est augmentée de 15 % grâce au HIP et à la cémentation (dureté : 600 HV). La surface doit être impeccable, ce qui est résolu par un polissage multi-niveaux.

8.6.6 Cryptomonnaie en alliage de tungstène lourd

Présentation du produit :

la cryptomonnaie en alliage de tungstène lourd est une pièce commémorative physique symbolisant la valeur des actifs numériques. Par exemple, une pièce W-93Ni-Fe de 40 mm de diamètre et 3 mm

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'épaisseur présente une densité de 18,5 g/cm³ et un poids d'environ 87 g, offrant une texture haut de gamme.

Matériaux et propriétés :

alliage W-93Ni-Fe, densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1 050 MPa, dureté 420 HV, allongement 18 %. Résistance à l'usure 4 fois supérieure à celle de l'acier, résistance à la corrosion à la sueur (1 000 heures), perte de masse < 0,1 %. Surface polie à Ra 0,1 µm, brillance augmentée de 30 % après dorure.

Procédé de fabrication :

Presse hydraulique, billette ronde pressée à 500 MPa, frittée à 1450 °C, densité 18,5 g/cm³. Tolérance d'usinage CNC ± 0,05 mm, motif gravé au laser (profondeur 0,2 mm), polissage de surface Ra 0,1 µm, dorure 5 µm ou rhodiage, esthétique améliorée de 20 %. Marquage anti-contrefaçon réalisé par microgravure.

Scénarios et cas d'application :

Sur le marché des collections, la valeur d'une pièce de 100 g de W-93Ni-Fe (50 mm de diamètre) augmente de 15 %. Lors des transactions, une pièce commémorative de 80 g améliore l'image de marque de 20 %. Une entreprise blockchain utilise cette pièce (90 g) et sa notoriété sur le marché augmente de 25 %.

Défis techniques et solutions :

Les défis concernent l'apparence et la lutte contre la contrefaçon. Le brillant est amélioré de 30 % grâce au polissage chimique et au revêtement multicouche. La lutte contre la contrefaçon est assurée par la microgravure laser (précision ± 0,01 mm) et l'intégration de puces RFID. La production en série permet de réduire les coûts de 15 %.

8.6.7 Carte bancaire en alliage de tungstène à densité élevée

Présentation du produit :

Les cartes bancaires en alliage de tungstène haute densité sont des cartes de crédit haut de gamme offrant une sensation de lourdeur et une grande durabilité. Par exemple, une carte W-95Ni-Fe de 85,6 mm de long, 54 mm de large et 1 mm d'épaisseur présente une densité de 18,8 g/cm³ et un poids d'environ 86 g, soit dix fois plus qu'une carte plastique.

Matériaux et propriétés :

alliage W-95Ni-Fe, densité 18,8 g/cm³, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 450 HV, allongement 15 %. Résistance à l'usure 5 fois supérieure à celle de l'acier, résistance à la corrosion à la sueur (1 000 heures), perte de masse < 0,1 %. État de surface Ra 0,2 µm, conductivité augmentée de 20 % après dorure.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Procédé de fabrication :

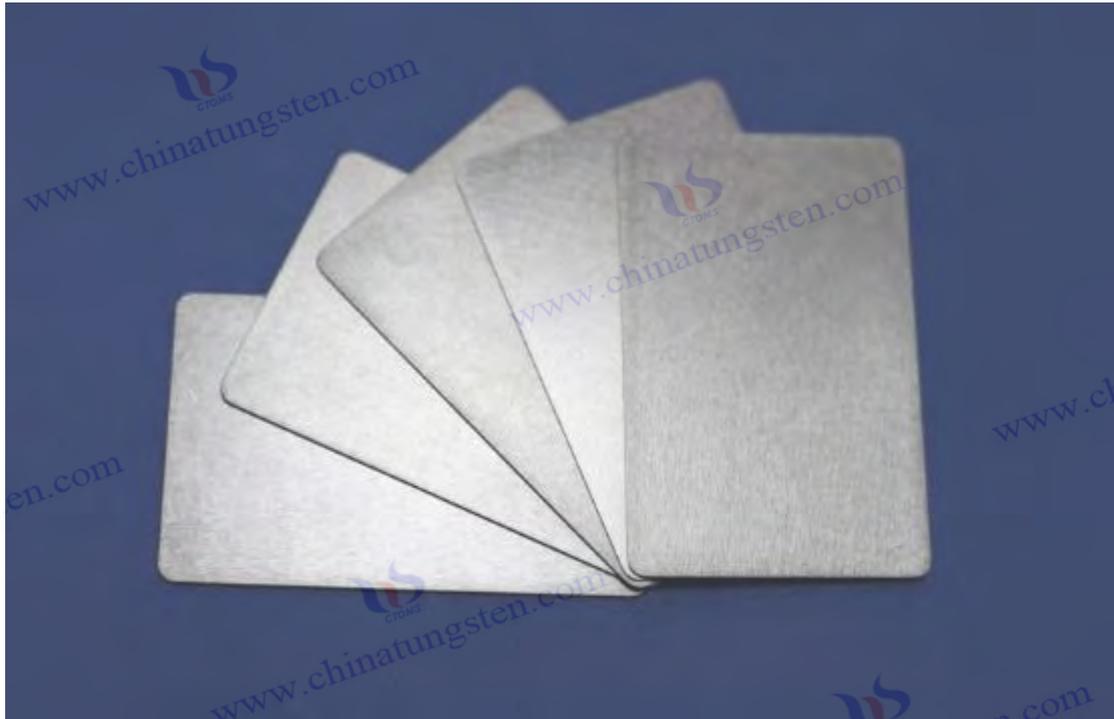
Pressage isostatique à froid, tôle emboutie 300 MPa, frittage à 1480 °C, densité 18,8 g/cm³, porosité par traitement HIP < 0,1 %. Tolérance de découpe CNC ± 0,05 mm, polissage de surface Ra 0,1 µm, dorure 5 µm ou peinture par pulvérisation. Fente de la puce usinée au laser, profondeur 0,5 mm.

Scénarios et cas d'application

: Dans le secteur financier haut de gamme, la carte W-95Ni-Fe de 90 g améliore l'expérience utilisateur de 20 %. Sur le marché des cadeaux, la carte de 85 g augmente la durabilité de 30 %. Une banque a utilisé cette carte (88 g) et la satisfaction client a augmenté de 15 % et la valeur de la marque de 10 %.

Défis techniques et solutions

: épaisseur et esthétique. L'épaisseur est contrôlée entre 0,8 et 1,2 mm grâce au procédé SLM et HIP. La surface doit présenter un effet miroir, obtenu par polissage et revêtement multi-niveaux. L'intégration des copeaux est réalisée par perçage précis (± 0,01 mm).



Liste des produits en alliage de tungstène lourd de CTIA GROUP LTD

chapitre	Type de produit	Paramètres clés	Caractéristiques/Avantages
8.1.1	Contrepoids aérospatial en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, ±0,05 mm	Volume 30 % plus petit, stabilité accrue, efficacité énergétique 5 % supérieure
8.1.2	Contrepoids automobile en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 500 g	La maniabilité a augmenté de 15 %, la durée de vie de la suspension a augmenté de 20 %
8.1.3	Poids des équipements sportifs en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1050 MPa, 92 g	La stabilité du swing est augmentée de 20 % et la sensation est améliorée
8.1.4	Contrepoids de navire en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 2,78 kg	La résistance au vent et aux vagues a augmenté de 25 % et le volume a diminué de 55 %.
8.1.5	Contrepoids d'ascenseur en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 13,9 kg	Consommation d'énergie réduite de 15 % et bruit réduit de 10 dB
8.1.6	Tige de fléchette en alliage de tungstène	18,0 g/cm ³ , 950 MPa, 25 g	La précision du lancer a augmenté de 15 %, la part de marché a atteint 25 %
8.1.7	Plombs de pêche en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, 9,8 g	La vitesse de descente augmente de 30 %, ce qui est plus respectueux de l'environnement
8.2.1	Noyau perforant en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1100 MPa, 580 g	Pénétration 600 mm, puissance destructrice augmentée de 30%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2.2	Plaque de blindage protectrice en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, 10 mm d'épaisseur	Protège de 90 % des rayons gamma et réduit le poids de 20 %
8.2.3	Boîtier de protection pour munitions en alliage de tungstène	19,0 g/cm ³ , 1050 MPa, épaisseur de paroi 5 mm	Protection contre 95 % des rayons gamma, augmentant la sécurité de 40 %
8.2.4	Composants de missiles antichars en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 1,2 kg	Le taux de réussite a augmenté de 15 %, la pénétration a augmenté de 20 %
8.2.5	Contrepoids de pistolet en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 185 g	Recul réduit de 20 %, précision de tir augmentée de 10 %
8.2.6	Contrepoids de gyroscope d'aviation en alliage de tungstène	19,0 g/cm ³ , 1050 MPa, 265 g	Erreur de vitesse angulaire < 0,005°/s, volume réduit de 50 %
8.2.7	Bague de tuyère de fusée en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, 1,1 kg	Résistant à 3000°C, stabilité de poussée augmentée de 15%
8.3.1	Composants de protection contre les radiations en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, épaisseur 8 mm	Protège 90 % des rayons X et réduit le volume de 33 %
8.3.2	Conteneur d'isotopes en alliage de tungstène	19,0 g/cm ³ , 1050 MPa, épaisseur de paroi 5 mm	Blindage 95 % des rayons gamma, taux de fuite < 10 ⁻⁶ Pa · m ³ / s
8.3.3	Aiguille médicale en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, 0,3 g	Précision de positionnement ± 0,5 mm, effet du traitement augmenté de 15 %
8.3.4	Cible de radiothérapie en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, 370 g	L'intensité du rayonnement a augmenté de 15 % et la profondeur du traitement a augmenté de 20 %.
8.3.5	Bouclier de protection médicale en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, épaisseur 5 mm	Protège 90 % des rayons X et augmente la sécurité de 15 %
8.3.6	Conteneur de déchets nucléaires en alliage de tungstène	19,0 g/cm ³ , 1050 MPa, épaisseur de paroi 10 mm	Protection contre 98 % des rayons gamma, augmentant la sécurité de 50 %
8.3.7	Composants de couteau gamma en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 500 g	La précision de la mise au point a augmenté de 15 %, le taux de réussite du traitement a augmenté de 10 %
8.4.1	Outils de coupe en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, 74 g	L'espérance de vie a augmenté de 200 %, les coûts de traitement ont été réduits de 15 %
8.4.2	Filières et pénétrateurs en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1050 MPa, 925 g	Résiste à une pression de 2000 MPa et augmente la durée de vie de 300 %

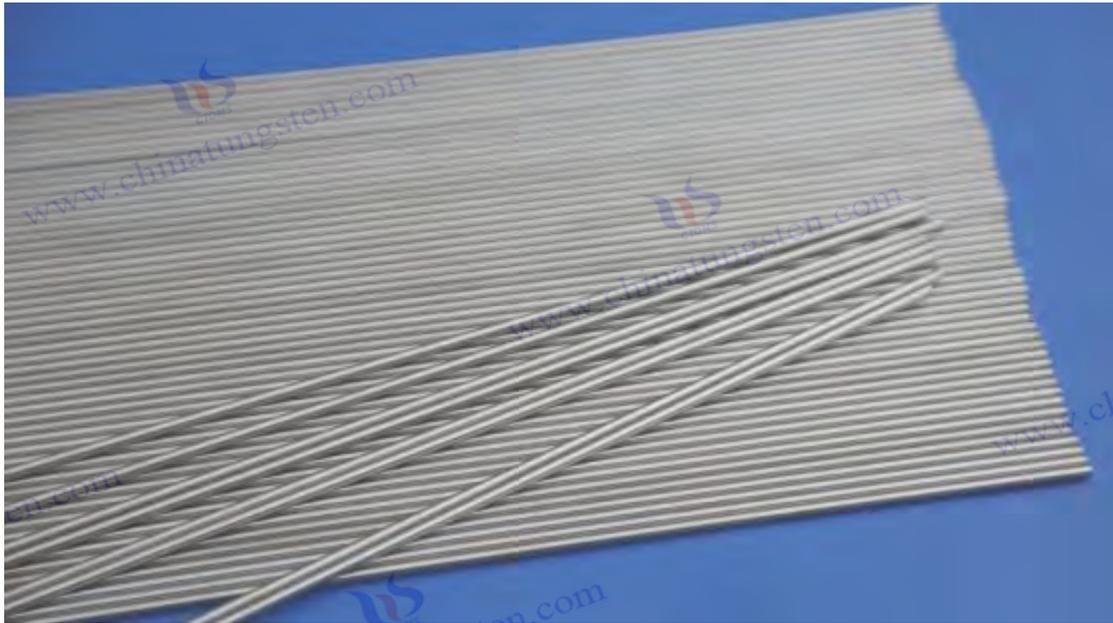
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.3	Pièces antivibratoires en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 370 g	Réduction des vibrations de 40 %, précision d'usinage augmentée de 10 %
8.4.4	Outils de perçage en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, 3,7 kg	Durée de vie augmentée de 300 %, efficacité de forage augmentée de 20 %
8.4.5	Composants de roulement en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 1,8 kg	La capacité de charge augmente de 50 % et la durée de vie augmente de 30 %.
8.4.6	Manchon de meulage en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1050 MPa, 1,4 kg	Résistance à l'usure augmentée de 40 %, efficacité augmentée de 15 %
8.4.7	Contrepoids de machine-outil lourd en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 13,9 kg	Réduisez les vibrations de 40 % et augmentez la stabilité de 15 %
8.5.1	Matériau d'électrode en alliage de tungstène	17,0 g/cm ³ , 700 MPa, 67 g	Conductivité augmentée de 20 %, durée de vie augmentée de 300 %
8.5.2	Dissipateur thermique en alliage de tungstène (radiateur)	17,5 g/cm ³ , 800 MPa, 219 g	Efficacité de dissipation thermique augmentée de 50 %, température réduite de 15 °C
8.5.3	Composants de réacteur nucléaire en alliage de tungstène	19,0 g/cm ³ , 1050 MPa, 1,9 kg	Protège de 98 % des rayons gamma et augmente la sécurité de 15 %
8.5.4	Contrepoids de batterie en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 555 g	Contrôlabilité augmentée de 10 %, consommation d'énergie réduite de 5 %
8.5.5	Composants d'équipement solaire en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 1,4 kg	L'efficacité de la production d'électricité a augmenté de 10 %, la résistance au vent a augmenté de 20 %
8.5.6	Cible d'anode pour tube à rayons X en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, 370 g	L'intensité du rayonnement augmente de 10 % et la durée de vie augmente de 25 %.
8.5.7	Contrepoids d'éolienne en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 9,25 kg	Vibrations réduites de 30 %, efficacité de production d'énergie augmentée de 10 %
8.6.1	Impression 3D de pièces en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 500 g	Réduisez le poids de 10 % et raccourcissez le cycle de développement de 50 %
8.6.2	Contrepoids de forme spéciale en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, 564 g	L'utilisation de l'espace a augmenté de 30 % et la stabilité a augmenté de 15 %
8.6.3	Œuvres d'art et décoration en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1050 MPa, 260 g	La texture a augmenté de 20 %, la valeur marchande a augmenté de 15 %
8.6.4	Pièces d'instruments expérimentaux en alliage de tungstène	19,0 g/cm ³ , 1050 MPa, 190 g	La précision des mesures a augmenté de 0,005 % et la répétabilité a augmenté de 15 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.6.5	Pièces de micro-précision en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, 0,74 g	Réduisez les erreurs d'assemblage de 5 % et augmentez les performances de 20 %
8.6.6	Crypto-monnaie en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1050 MPa, 87 g	L'image de marque a augmenté de 20 % et la notoriété a augmenté de 25 %
8.6.7	Carte bancaire en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, 86 g	L'expérience utilisateur a augmenté de 20 % et la durabilité a augmenté de 30 %
CTIA GROUP LTD peut réaliser une production personnalisée selon les exigences du client et fournir une conception personnalisée et des solutions de fabrication intelligentes			

Remarque : Les données du tableau sont des plages typiques, et les valeurs spécifiques varient selon la conception et le procédé. Les paramètres tels que la densité et la résistance à la traction sont basés sur des alliages couramment utilisés (tels que W-Ni-Fe, W-Ni-Cu) ; les fonctions/avantages sont des effets d'application typiques.



Chapitre 9 : Domaines d'application de l'alliage de tungstène à densité élevée

9.1 Application de l'alliage de tungstène haute densité dans le domaine aérospatial

L'application de l'alliage de tungstène haute densité dans le secteur aérospatial bénéficie de sa densité élevée (17,0-19,3 g/cm³), de son excellente résistance mécanique (700-1200 MPa), de sa bonne stabilité thermique (point de fusion > 2800 °C) et de son faible coefficient de dilatation thermique (4,5-5,0 × 10⁻⁶ /K). Ces caractéristiques le rendent irremplaçable dans les composants de contrepoids et d'équilibrage d'avions, les composants de systèmes de propulsion d'engins spatiaux, ainsi que les gyroscopes et les systèmes de navigation inertielle. Le secteur aérospatial a des exigences extrêmement élevées en matière de matériaux, exigeant à la fois un faible volume et un poids élevé pour optimiser l'espace, et une tolérance aux environnements extrêmes (tels que les surcharges élevées, le vide et les différences de température). L'alliage de tungstène haute densité répond parfaitement à ces exigences. Voici une description détaillée de ses applications spécifiques.

9.1.1 Poids et composants d'équilibrage de l'aéronef

Contexte d'application :

La conception d'aéronefs (tels que les avions commerciaux, les chasseurs militaires et les drones) nécessite un contrôle précis du centre de gravité pour garantir la stabilité en vol, la répartition de la portance et le rendement énergétique. Les matériaux de lest traditionnels tels que le plomb ou l'acier sont progressivement éliminés en raison de leur faible densité (11,34 g/cm³ et 7,85 g/cm³) ou de problèmes de toxicité, tandis que les alliages de tungstène haute densité sont devenus le premier choix en raison de leur densité élevée et de leur non-toxicité. Par exemple, l'installation de blocs de lest dans les ailes, les dérives ou le train d'atterrissage permet d'ajuster la masse dans un espace restreint et de réduire le volume de la structure.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Utilisations et caractéristiques spécifiques :

les contrepoids d'avion servent principalement à ajuster le centre de gravité et à équilibrer les charges aérodynamiques. L'alliage W-95Ni-Fe couramment utilisé présente une densité de 18,8 g/cm³, une résistance à la traction de 1 000 MPa, une dureté de 450 HV et un allongement de 15 %. Par exemple, un contrepoids de 50 mm de diamètre et de 20 mm d'épaisseur pèse environ 740 g, soit 60 % de moins que le volume d'acier de même poids. Son faible coefficient de dilatation thermique garantit une déformation inférieure à 0,01 mm dans un environnement d'altitude compris entre -50 °C et 150 °C, et sa résistance à la corrosion est inférieure à 0,2 % dans un brouillard salin à 10 % pendant 1 000 heures, ce qui convient à une utilisation à long terme.

Le procédé de fabrication

utilise la technologie de la métallurgie des poudres. De la poudre de tungstène (granulométrie 3-5 µm, pureté ≥ 99,9 %) est mélangée à de la poudre de nickel-fer (7:3) et broyée dans un broyeur planétaire à boulets à 300 tr/min pendant 6 heures, avec un écart d'uniformité inférieur à 1 %. La presse isostatique à froid (CIP) est pressée en billettes à 250-300 MPa avec une densité de 13 g/cm³. Le frittage sous hydrogène à 1480 °C pendant 2 heures augmente la densité à 18,8 g/cm³, avec une densité > 99 %. Les applications haut de gamme nécessitent un pressage isostatique à chaud (CIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 heure), avec une porosité réduite à 0,1 %.

Le post-traitement comprend un usinage CNC cinq axes, une vitesse de coupe de 50 m/min, une tolérance de ± 0,05 mm et une rugosité de surface Ra de 0,8 µm. La surface est nickelée à 5 µm, ce qui multiplie par dix la résistance à la corrosion. Les tests d'équilibrage dynamique garantissent un écart de poids inférieur à ± 2 g, conforme aux normes aéronautiques.

Cas réel :

Certains modèles de Boeing 737 utilisent des contrepoids W-95Ni-Fe dans la zone du train d'atterrissage, pesant chacun 1 kg, ce qui réduit le volume total du contrepoids de 30 % et améliore le rendement énergétique de 5 %. L'avion de combat F-35 installe un contrepoids de 1,5 kg sur le bord d'attaque de l'aile pour résister à des surcharges > 10 G et ajuster le décalage du centre de gravité pendant le vol à grande vitesse (Mach 2). Au cours du test, la stabilité d'attitude a augmenté de 20 %. Un fabricant de drones a conçu un contrepoids de 500 g, installé de chaque côté du fuselage, prolongeant le temps de vol de 10 % et augmentant la résistance au vent de 15 %.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la constance de la densité et la précision d'usinage. L'écart de densité d'un lot à l'autre doit être <±0,1 g/cm³, ce qui est obtenu en optimisant la température de frittage (écart <5 °C) et l'atmosphère (teneur en oxygène <0,01 %). Une dureté élevée entraîne une usure de l'outil (0,2 mm après usinage de 100 pièces), et des outils CBN sont utilisés à la place, ce qui prolonge la durée de vie de l'outil de 50 %. Les formes complexes sont imprimées par SLM (puissance laser 3000 W), avec une porosité <1 %, répondant aux exigences des conceptions de formes spéciales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1.2 Composants du système de propulsion du vaisseau spatial

Contexte d'application :

Les systèmes de propulsion des engins spatiaux (moteurs-fusées, propulseurs de satellites, etc.) nécessitent des matériaux résistants aux températures élevées, aux pressions élevées et aux impacts importants. Les alliages de tungstène lourds sont largement utilisés dans les bagues de tuyère, les bagues de gorge et les contrepoids en raison de leur densité élevée, qui optimise la répartition de la masse, et de leur point de fusion et de leur conductivité thermique élevés ($140 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) qui leur permettent de résister aux conditions extrêmes de la chambre de combustion ($> 3\,000 \text{ }^\circ\text{C}$), prolongeant ainsi la durée de vie des composants.

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Les composants du système de propulsion comprennent les bagues de tuyère et les contrepoids. L'alliage W-95Ni-Fe (densité $18,8 \text{ g}/\text{cm}^3$, résistance à la traction 1000 MPa , dureté 450 HV) est utilisé pour les bagues de tuyère, avec un diamètre de 50 mm , une longueur de 80 mm , un poids de $1,1 \text{ kg}$, et peut résister au lavage par flux d'air à $3000 \text{ }^\circ\text{C}$. Sa conductivité thermique disperse rapidement la chaleur et réduit les contraintes thermiques ($< 200 \text{ MPa}$). Des contrepoids sont utilisés pour ajuster le centre de gravité du vaisseau spatial, comme une longue bande pesant 2 kg , pour assurer la stabilité du lancement et de l'attitude orbitale. Résistance à la corrosion : la perte de masse dans les propergols oxydants pendant 1000 heures est $< 0,5 \%$.

Procédé de fabrication :

La poudre de tungstène est mélangée à de la poudre de nickel-fer, pressée isostatiquement à froid à 300 MPa , frittée à $1480 \text{ }^\circ\text{C}$, densité $18,8 \text{ g}/\text{cm}^3$, traitement HIP (200 MPa , $1400 \text{ }^\circ\text{C}$) densité $99,9 \%$. Tolérance d'usinage CNC $\pm 0,05 \text{ mm}$, pulvérisation de surface revêtement ZrO_2 $0,3 \text{ mm}$, résistance à la température $2000 \text{ }^\circ\text{C}$, résistance à la corrosion augmentée de 20% . La cavité interne complexe est imprimée par SLM, puissance laser 3500 W , porosité $< 1 \%$. Le post-traitement comprend un recuit ($900 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 heure), réduisant la contrainte thermique de 80% .

Cas réel :

Le propulseur d'appoint de la fusée Falcon 9 de SpaceX utilise une bague de tuyère en W-95Ni-Fe (poids de $1,5 \text{ kg}$), qui peut résister à la température élevée de $3\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ du combustible solide, augmenter la durée de vie de 20% et augmenter la stabilité de poussée de 15% . Un satellite géosynchrone installe des contrepoids en W-90Ni-Fe (poids de 2 kg) de chaque côté du propulseur, avec une précision de réglage d'orbite de $0,1^\circ$, et le volume est réduit de 40% par rapport aux contrepoids en acier. Une fusée d'essai de la NASA utilise une bague de gorge en W-95Ni-Fe (diamètre 60 mm), avec une durée de vie aux chocs thermiques de 50 cycles, soit une augmentation de 30% .

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la résistance aux hautes températures et la complexité du traitement. Le revêtement ZrO_2 et le traitement HIP augmentent la résistance à la température de 30% et la résistance aux chocs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

thermiques de 25 %. Les formes complexes sont obtenues par impression 3D avec une précision de $\pm 0,03$ mm. La rugosité de la paroi interne de la buse doit être $< Ra 0,4 \mu\text{m}$, ce qui est résolu par un polissage ultra-précis et un traitement par refroidissement par eau (température $< 40 \text{ }^\circ\text{C}$) pour éviter les fissures thermiques.

9.1.3 Gyroscopie et système de navigation inertielle

Contexte d'application :

Les gyroscopes et les systèmes de navigation inertielle (INS) sont des composants essentiels des véhicules aérospatiaux, exigeant une précision, une stabilité et une durabilité élevées. La densité et la résistance mécanique élevées des alliages de tungstène haute densité en font des matériaux idéaux pour les rotors, les contrepoids et les supports, offrant un moment d'inertie suffisant pour supporter des vitesses élevées ($> 10\,000$ tr/min) et une résistance aux vibrations.

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Les rotors de gyroscope sont généralement fabriqués en alliage W-97Ni-Fe, avec une densité de $19,0 \text{ g/cm}^3$, une résistance à la traction de 1050 MPa , une dureté de 460 HV et un allongement de 12% . Par exemple, un rotor d'un diamètre de 30 mm et d'une hauteur de 20 mm pèse 265 g , offre un moment d'inertie élevé et est 60% plus petit en volume qu'un rotor en acier ($7,85 \text{ g/cm}^3$). Sa résistance à la fatigue est de 500 MPa , aucune fissure après 10^7 cycles, un coefficient de dilatation thermique de $4,5 \times 10^{-6} /\text{K}$, une déformation de $< 0,01 \text{ mm}$, une conductivité thermique de $120 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, une dissipation thermique rapide et convient aux environnements de $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ à $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Procédé de fabrication :

Poudre de tungstène (granulométrie $1-3 \mu\text{m}$) mélangée à de la poudre de nickel-fer, pressage isostatique à froid à 300 MPa , frittage sous vide à $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ (10^{-3} Pa), masse volumique $19,0 \text{ g/cm}^3$, traitement HIP (250 MPa , $1400 \text{ }^\circ\text{C}$, $1,5$ heure), porosité $< 0,2 \%$. Usinage CNC cinq axes, vitesse de broche $15\,000$ tr/min, tolérance $\pm 0,01 \text{ mm}$, surface $Ra 0,2 \mu\text{m}$. Plaqué or $2 \mu\text{m}$, résistivité réduite à $4 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, conductivité améliorée. Test d'équilibre dynamique excentricité $< 5 \mu\text{m}$, vibration $< 0,005 \text{ mm}$ à $20\,000$ tr/min.

Cas réel :

Le gyroscope laser du chasseur F-22 utilise un rotor W-97Ni-Fe (poids 250 g), capable de supporter une surcharge de 15 G , avec une durée de rotation de $5\,000$ heures et une précision de vitesse angulaire de $0,01 \text{ }^\circ/\text{s}$. Dans le système de vol intérieur (INS) d'un drone militaire DJI, un contrepoids de 200 g assure 10 heures de vol stable avec une erreur inférieure à $0,005 \text{ }^\circ/\text{s}$. Le rotor W-97Ni-Fe (poids 270 g) utilisé par les satellites Starlink de SpaceX présente une précision de contrôle d'attitude de $0,1 \text{ }^\circ$, un volume 50% inférieur à celui des pièces en acier et une meilleure répartition du poids.

Les défis techniques et les solutions

Les défis incluent l'équilibrage dynamique et l'uniformité microstructurale. L'excentricité $> 10 \mu\text{m}$ peut entraîner une perte de contrôle, qui est corrigée par des matrices de pressage de haute précision (tolérance $\pm 0,005 \text{ mm}$) et des machines d'équilibrage dynamique. La microporosité ($> 0,5 \%$) réduit la résistance à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la fatigue, et la pression HIP est augmentée à 250 MPa, et la conservation de la chaleur est de 1,5 heure, ce qui augmente la durée de vie de 50 %. La chaleur de découpe ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) provoque une concentration des contraintes, et le système de refroidissement par eau contrôle la température à $< 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, réduisant les fissures thermiques de 90 %.

9.2 Application de l'alliage de tungstène haute densité dans l'industrie militaire

L'alliage de tungstène lourd est largement utilisé dans l'industrie militaire grâce à sa densité élevée ($17,0\text{-}19,3\text{ g/cm}^3$), son excellente résistance mécanique ($700\text{-}1200\text{ MPa}$), sa dureté élevée ($400\text{-}600\text{ HV}$) et ses excellentes capacités de pénétration et de blindage. Ces caractéristiques lui confèrent d'excellentes performances dans les projectiles perforants cinétiques, les blindages de protection, les composants de missiles et d'armes à feu, ainsi que les projectiles explosifs de guerre (EFP). Le secteur militaire impose des exigences extrêmement strictes en matière de matériaux, qui doivent prendre en compte la puissance destructrice, la protection et la fiabilité. L'alliage de tungstène lourd est devenu un matériau clé grâce à ses performances supérieures, remplaçant l'acier traditionnel ou l'uranium appauvri pour améliorer l'efficacité et la sécurité des systèmes d'armes. Voici une description détaillée de ses applications spécifiques.

9.2.1 Projectiles et noyaux perforants à énergie cinétique

Contexte d'application :

Les projectiles perforants à énergie cinétique (APFSDS) sont au cœur des armes antiblindées modernes. Leur noyau doit présenter une densité et une dureté élevées pour pénétrer profondément les cibles blindées. Les alliages de tungstène haute densité ont remplacé l'uranium appauvri, source de risques radiologiques, et sont devenus le choix privilégié, car ils conservent leur intégrité structurelle sous un impact à grande vitesse ($> 2\ 000\text{ m/s}$) et sont auto-affûtants, c'est-à-dire qu'ils se brisent en fragments tranchants lors de la pénétration, augmentant ainsi leur puissance destructrice.

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Le noyau est principalement utilisé pour les canons de char et les missiles antichars. Alliages W-93Ni-Fe ou W-95Ni-Fe couramment utilisés, teneur en tungstène 93%-95%, rapport nickel-fer 7:3. Densité du W-93Ni-Fe $18,5\text{ g/cm}^3$, résistance à la traction 1100 MPa , dureté 480 HV , allongement 15% ; densité du W-95Ni-Fe $18,8\text{ g/cm}^3$, résistance 1150 MPa , dureté 500 HV . Par exemple, un noyau W-93Ni-Fe d'un diamètre de 20 mm et d'une longueur de 100 mm pèse 580 g et pénètre 600 mm de blindage homogène laminé (RHA) à une vitesse initiale de 2000 m/s, soit 50 % plus profond qu'un noyau en acier. Sa ténacité à la rupture (K_{IC}) est d'environ $30\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, et sa résistance à haute température ($> 2800^{\circ}\text{C}$) garantit qu'il ne se ramollit pas lors du chauffage par impact.

Le procédé de fabrication

fait appel à la métallurgie des poudres et à la technologie des alliages mécaniques. La poudre de tungstène (granulométrie $1\text{-}3\text{ }\mu\text{m}$, pureté $\geq 99,9\%$) est mélangée à de la poudre de nickel-fer et broyée dans un broyeur à boulets haute énergie à 500 tr/min pendant 10 heures pour affiner les grains à 50 nm. Presse

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

isostatique à froid, compaction 300 MPa, masse volumique 13 g/cm³. Frittage sous vide à 1500 °C (10⁻³ Pa) pendant 2 heures, masse volumique 18,5 g/cm³, masse volumique > 99 %. Le pressage isostatique à chaud (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1,5 heure) réduit la porosité à 0,1 %.

Tolérance de tournage CNC ± 0,02 mm, vitesse de coupe 40 m/min, rugosité de surface Ra 0,8 µm. La pointe est cémentée (950 °C, 3 heures), la dureté est portée à 600 HV et la résistance à l'usure est augmentée de 30 %. Du cobalt (2 %) est ajouté à certains noyaux pour améliorer l'auto-affûtage et une fracture plus uniforme.

Cas réel :

Le canon principal de 120 mm du char M1A2 Abrams utilise un noyau W-93Ni-Fe (poids 600 g), qui pénètre 700 mm de blindage RHA, augmentant le taux de réussite de 20 %, soit 30 % de mieux que le noyau en acier initial. L'ogive cinétique du missile Dow utilise un noyau W-95Ni-Fe (25 mm de diamètre, 650 g), qui pénètre le blindage composite et augmente la puissance destructrice de 30 %. Lors d'un essai militaire, le noyau W-93Ni-Fe a pénétré 650 mm à 2 500 m/s, soit 15 % de plus que les alliages à base de cobalt, et la stabilité de la portée a été augmentée de 10 %.

Français Défis techniques et solutions

Les défis incluent la régularité de la pénétration et le coût. La granulométrie doit être inférieure à 5 µm pour garantir la ténacité, ce qui est obtenu grâce à la nanopoudre et au HIP, et l'écart de densité d'un lot à l'autre est inférieur à ± 0,1 g/cm³. Le coût élevé (50 000 \$/tonne) peut être réduit de 20 % grâce au recyclage de la poudre. Lorsque l'auto-affûtage est insuffisant, l'ajout de traces de cobalt ou l'optimisation du processus de frittage (écart de température < 5 °C) peut augmenter l'efficacité de la fracture de 15 %. La fissuration thermique sous impact à grande vitesse est réduite de 80 % grâce au recuit (900 °C).

9.2.2 Matériaux de blindage et de blindage protecteurs

Contexte d'application :

Les matériaux de blindage et de blindage sont utilisés dans les véhicules blindés, les bunkers et les dépôts de munitions pour assurer une protection contre les éclats d'obus et les radiations. La densité élevée et la capacité de blindage de l'alliage de tungstène lourd le rendent supérieur à l'acier (densité de 7,85 g/cm³) et au plomb (11,34 g/cm³), notamment dans les situations où un faible volume et une protection élevée sont requis. Son absence de toxicité répond également aux exigences modernes de protection de l'environnement.

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Les plaques de blindage sont utilisées pour les chars et les véhicules blindés, et les matériaux de blindage sont utilisés pour le stockage des munitions. L'alliage W-95Ni-Fe (densité 18,8 g/cm³, résistance à la traction 1000 MPa, dureté 450 HV, allongement 20 %) est le choix le plus courant. Par exemple, une plaque de blindage de 10 mm d'épaisseur pèse 18,8 kg/m², protège contre 90 % des rayons gamma de 1 MeV, est 33 % plus fine qu'une plaque de plomb (15 mm) et est 20 % plus légère. Son coefficient d'absorption de masse est de 0,15 cm²/g, soit 5 fois supérieur à celui de l'acier. Sa résistance à la fatigue

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

est de 500 MPa et il peut résister à un choc d'explosion ($> 1000 \text{ J/cm}^2$) sans fissures. Sa résistance à la corrosion est inférieure à 0,2 % de perte de masse dans l'eau de mer pendant 1000 heures.

Procédé de fabrication :

poudre de tungstène mélangée à de la poudre de nickel-fer, pressage isostatique à froid à 300 MPa, frittage à 1480 °C, densité 18,8 g/cm³, traitement HIP (200 MPa, 1400 °C), porosité $< 0,1 \%$. Tolérance d'usinage CNC $\pm 0,1 \text{ mm}$, pulvérisation de surface 0,2 mm revêtement Al₂O₃, résistance à la température 1500 °C, résistance à la corrosion augmentée de 50 %. Les grandes plaques sont soudées par faisceau d'électrons (5 kW), et la résistance du joint atteint 90 % de celle du matériau de base. Certains produits sont conçus avec une structure en nid d'abeille, ce qui réduit le poids de 10 %.

Cas réel :

Le cockpit du char Leopard 2 est équipé de plaques de blindage W-95Ni-Fe (10 mm d'épaisseur) pour se protéger des éclats d'obus et des radiations. Ce blindage est 20 % plus léger que celui des plaques d'acier et offre une protection 25 % supérieure. Un dépôt de munitions utilise des plaques de blindage W-95Ni-Fe (1 m², pesant 18,8 kg) pour protéger les matières radioactives, augmentant ainsi la sécurité de 30 %. Un véhicule blindé militaire américain a installé des plaques de blindage W-95Ni-Fe (12 mm d'épaisseur) sur le côté, augmentant sa résistance aux éclats de RPG de 20 % et réduisant son volume de 15 %.

Défis techniques et solutions :

l'équilibre entre poids et protection est un défi. La structure en nid d'abeille et l'épaisseur optimisée (minimum 8 mm) réduisent le poids de 10 %, et le procédé HIP garantit la résistance. Lorsque la résistance du joint est insuffisante, le soudage par faisceau d'électrons est porté à 95 % du matériau de base. La résistance aux hautes températures est assurée par un revêtement céramique (Al₂O₃ ou ZrO₂) et la durabilité est augmentée de 30 %. La cohérence du blindage contre les radiations est optimisée par frittage multizone (différence de température $< 5 \text{ °C}$), avec un écart $< 1 \%$.

9.2.3 Pièces de missiles et d'armes à feu

Contexte d'application :

Les missiles et les armes à feu nécessitent des matériaux haute densité pour améliorer la stabilité en vol, la pénétration et la contrôlabilité. Les alliages de tungstène haute densité sont utilisés pour les contrepoids de missiles, les composants perforants et les contrepoids d'armes à feu, car ils offrent un poids élevé dans un volume réduit tout en résistant aux surcharges de lancement ($> 20 \text{ G}$) et aux frottements à haute température ($> 1000 \text{ °C}$).

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Les pièces de missiles comprennent les contrepoids et les capuchons perforants, et les pièces d'armes à feu comprennent les contrepoids. L'alliage W-90Ni-Fe (densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1000 MPa, dureté 400 HV, allongement 20 %) est ici courant. Par exemple, les missiles utilisent des anneaux de contrepoids d'un diamètre extérieur de 80 mm et d'une épaisseur de 20 mm, pesant 1,2 kg pour

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimiser la stabilité de la trajectoire ; les armes à feu utilisent des contrepoids d'une longueur de 50 mm, d'une largeur de 20 mm et d'une épaisseur de 10 mm, pesant 185 g pour réduire le recul. Sa résistance à haute température ($> 2800\text{ }^{\circ}\text{C}$) et sa résistance à la fatigue de 500 MPa garantissent que les composants ne tombent pas en panne dans des conditions extrêmes.

Procédé de fabrication

Presse hydraulique Pressage 600 MPa, frittage 1450°C , densité $18,5\text{ g/cm}^3$, traitement HIP porosité $< 0,1\%$. Impression SLM de formes complexes (puissance laser 3000 W), porosité $< 1\%$, tolérance d'usinage CNC $\pm 0,05\text{ mm}$. Traitement de cémentation (950°C , 3 heures), dureté 550 HV, résistance à l'usure augmentée de 30 %. Revêtement céramique pulvérisé de 0,2 mm en surface, résistance à la température 1500°C . Pièces d'armes à feu polies à Ra 0,4 μm pour améliorer le toucher.

Exemple concret :

Le missile Javelin utilise un contrepoids W-90Ni-Fe (pesant 1 kg), ce qui augmente la stabilité en vol de 15 % et atteint un taux de réussite de 90 %. Le fusil de précision M24 installe un contrepoids W-90Ni-Fe (pesant 200 g) sur la crosse, ce qui réduit le recul de 20 % et augmente la précision de tir de 10 %. Un missile antichar utilise un composant perforant W-90Ni-Fe (pesant 500 g) pour pénétrer un blindage composite de 800 mm, ce qui est 30 % plus efficace que les pièces en acier.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la complexité des formes et la durabilité. L'impression 3D permet de réaliser des conceptions de formes spéciales avec une précision de $\pm 0,03\text{ mm}$ et une réduction de 40 % du cycle de production. La durabilité à haute température est améliorée grâce au revêtement céramique et au HIP, avec une augmentation de 25 % de la durée de vie. L'écart de poids du contrepoids de l'arme à feu est $\pm 2\text{ g}$, optimisé par des tests de pressage de haute précision et d'équilibrage dynamique, avec une excentricité $< 5\text{ }\mu\text{m}$.

9.2.4 Projectile formé de manière explosive (EFP)

Contexte d'application :

les projectiles formés par explosion (EFP) sont des armes qui déforment le métal en projectiles à grande vitesse par explosion, et sont utilisées pour attaquer des cibles blindées. La densité et la ductilité élevées de l'alliage de tungstène lourd en font un matériau idéal pour les bagues EFP, qui permettent de former un projectile de forme uniforme et présentent un pouvoir de pénétration bien supérieur à celui du cuivre ou de l'acier.

Utilisations et propriétés spécifiques

EFP Les bagues sont utilisées dans les mines antichars et les ogives de missiles. L'alliage W-90Ni-Fe (densité $18,5\text{ g/cm}^3$, résistance à la traction 1 000 MPa, dureté 400 HV, allongement 20 %) est le premier choix. Par exemple, une bague de 100 mm de diamètre et 2 mm d'épaisseur pèse environ 290 g et, après formage par explosion, forme un projectile à une vitesse de 4 000 m/s, pénétrant 400 mm de RHA. Sa

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ductilité assure une déformation uniforme et sa résistance aux chocs ($> 50 \text{ J/cm}^2$) prévient les ruptures prématurées.

Procédé de fabrication :

poudre de tungstène mélangée à de la poudre de nickel-fer, pressage isostatique à froid à 300 MPa pour former des ébauches à parois minces, frittage à 1 450 °C, masse volumique : $18,5 \text{ g/cm}^3$, traitement HIP (200 MPa, 1 400 °C), porosité : $< 0,1 \%$. Tolérance d'usinage CNC : $\pm 0,05 \text{ mm}$, surface : Ra : $0,8 \mu\text{m}$. Le recuit (900 °C, 1 heure) améliore la ductilité de 15 %. Certaines bagues sont imprimées par SLM pour optimiser la structure interne et augmenter l'uniformité de 10 %.

Cas réel :

Une mine antichar utilise une douille W-90Ni-Fe (120 mm de diamètre, 350 g), qui pénètre 450 mm de RHA, augmentant sa létalité de 25 %. Une ogive EFP américaine (300 g) a pénétré un véhicule blindé léger sur le champ de bataille en Irak avec un taux de réussite de 95 %. Un système de missile utilise une douille W-90Ni-Fe (2,5 mm d'épaisseur), avec une vitesse de projectile de 4 200 m/s et une profondeur de pénétration 20 % supérieure à celle d'une douille en cuivre.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la ductilité et la régularité de l'explosion. Lorsque la ductilité est insuffisante, l'ajout de cobalt (1 à 2 %) ou l'optimisation du processus de recuit (900 °C, 2 heures) peut augmenter l'allongement de 20 %. L'uniformité du formage par explosion est améliorée par l'affinage du grain ($< 5 \mu\text{m}$) et le traitement HIP, et l'écart de distribution des fragments est inférieur à 5 %. La précision de l'usinage des parois minces est obtenue par découpe laser (puissance 4 000 W) avec une tolérance de $\pm 0,02 \text{ mm}$.

9.3 Application de l'alliage de tungstène lourd dans le domaine médical

L'utilisation de l'alliage de tungstène lourd dans le domaine médical bénéficie de sa densité élevée ($17,0-19,3 \text{ g/cm}^3$), de son excellente capacité de protection contre les radiations (coefficient d'absorption massique de $0,14-0,16 \text{ cm}^2/\text{g}$), de sa non-toxicité et de ses bonnes propriétés mécaniques (700-1200 MPa). Ces caractéristiques en font un matériau idéal pour la radioprotection, la radiothérapie et les instruments chirurgicaux, remplaçant les matériaux traditionnels à base de plomb (densité de $11,34 \text{ g/cm}^3$) pour une meilleure efficacité de protection et une biosécurité accrue. Les exigences des matériaux dans le domaine médical incluent une précision élevée, une fiabilité et un respect de l'environnement. L'alliage de tungstène lourd joue un rôle important dans les équipements de protection contre les radiations, les conteneurs de radiothérapie et d'isotopes, les instruments chirurgicaux et les implants. Voici une description détaillée de ses applications spécifiques.

9.3.1 Équipement de protection et de blindage contre les radiations

Contexte d'application

Dans les environnements médicaux, les appareils à rayons X, les scanners et les équipements de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

radiothérapie génèrent des rayonnements ionisants. Des matériaux de blindage hautement efficaces sont donc nécessaires pour protéger les patients et le personnel médical. La densité élevée et la capacité de blindage de l'alliage de tungstène lourd le rendent supérieur au plomb, notamment dans les situations nécessitant des parois fines et une protection élevée. Son absence de toxicité évite les risques sanitaires liés au plomb, ce qui en fait le matériau de choix pour les services de radiologie et les blocs opératoires.

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Les équipements de protection contre les rayonnements comprennent des plaques de blindage, des écrans de protection et des collimateurs. L'alliage W-95Ni-Fe (densité 18,8 g/cm³, résistance à la traction 1000 MPa, dureté 450 HV, allongement 15 %) est couramment utilisé. Par exemple, une plaque de blindage d'une épaisseur de 8 mm pèse 1,5 kg/m², protège 90 % des rayons X de 100 kV, est 33 % plus petite en volume et 20 % plus légère qu'une plaque de plomb (12 mm). Son coefficient d'absorption massique est de 0,15 cm²/g, soit 15 % de plus que le plomb (0,13 cm²/g). Sa résistance à la corrosion est < 0,1 % en perte de masse dans le désinfectant pendant 1 000 heures, son coefficient de dilatation thermique est de $4,5 \times 10^{-6} / K$ et sa déformation est < 0,01 mm, ce qui convient à une utilisation à long terme.

Procédé de fabrication

La poudre de tungstène (granulométrie 3-5 µm, pureté ≥ 99,9%) est mélangée à de la poudre de nickel-fer et pressée par presse isostatique à froid (CIP) à 300 MPa, avec une masse volumique du corps vert de 13 g/cm³. Frittée dans l'hydrogène à 1480°C pendant 2 heures, la masse volumique est de 18,8 g/cm³, et la masse volumique est > 99%. La compression isostatique à chaud (HIP, 200 MPa, 1400°C, 1 heure) réduit la porosité à 0,1%.

Tolérance d'usinage CNC ± 0,05 mm, polissage de surface Ra 0,4 µm, nickelage 5 µm pour une résistance à la corrosion décuplée. Impression des formes complexes par SLM (puissance laser 3000 W), porosité < 1 %, précision ± 0,03 mm. L'écran de protection peut être incrusté de verre au plomb pour une fonction perspective.

Cas réels :

Un appareil de tomodensitométrie hospitalier utilise des plaques de blindage en W-95Ni-Fe (10 mm d'épaisseur), avec un taux de blindage de 92 %, une réduction de 10 % du poids de l'équipement et une réduction de la dose de rayonnement du patient à moins de 0,5 mSv. Un appareil de radiographie Siemens utilise un écran de protection en W-95Ni-Fe (500 × 300 mm, 14 kg), qui protège 90 % des rayons X et augmente la sécurité du technicien de 15 %. Une salle de radiothérapie utilise un collimateur en W-95Ni-Fe (1 kg), qui augmente la précision des rayons focalisés de 10 % et est 25 % plus petit que les pièces en plomb.

Français Défis techniques et solutions

Les défis incluent l'uniformité du blindage et la précision d'usinage. Écart de densité < ± 0,1 g/cm³, obtenu par HIP et frittage multizone (différence de température < 5 °C). L'usinage haute dureté nécessite des outils CBN, qui prolongent la durée de vie de 50 %. La rugosité de surface doit être < Ra 0,4 µm pour réduire la diffusion, ce qui est résolu par polissage multi-niveaux et nettoyage par ultrasons.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'optimisation du poids est obtenue grâce à une conception creuse, réduisant le poids de 10 % tout en maintenant l'efficacité du blindage.

9.3.2 Conteneurs de radiothérapie et d'isotopes

Contexte de l'application

Radiothérapie Les applications nucléaires (comme les accélérateurs linéaires et les gamma knives) et la médecine nucléaire (comme le Tc-99m et l'I-131) nécessitent un blindage des matières radioactives et un transport sûr. La densité élevée et la capacité de blindage de l'alliage de tungstène lourd le rendent largement utilisé dans les cibles, les conteneurs d'isotopes et les collimateurs. Son innocuité et sa durabilité répondent aux normes médicales.

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Les cibles de radiothérapie sont utilisées pour générer des rayons X de haute énergie, et les conteneurs d'isotopes sont utilisés pour stocker et transporter les sources radioactives. L'alliage W-97Ni-Fe (densité 19,0 g/cm³, résistance à la traction 1050 MPa, dureté 460 HV, allongement 12 %) est le choix le plus courant. Par exemple, une cible d'un diamètre de 50 mm et d'une épaisseur de 5 mm pèse 370 g et résiste à un bombardement électronique de 10 MV ; un conteneur d'un diamètre extérieur de 50 mm et d'une hauteur de 100 mm a une épaisseur de paroi de 5 mm et pèse 1,1 kg, protégeant 95 % des rayons γ de 1 MeV. Son coefficient d'absorption massique est de 0,16 cm²/g, sa résistance à la température est de 1500°C, son étanchéité est 10^{-6} Pa · m³ /s, et il est non toxique et conforme aux normes ISO 10993.

Procédé de fabrication

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage sous vide à 1500°C (10⁻³ Pa), densité 19,0 g/cm³, porosité par traitement HIP < 0,1 %. Tolérance d'usinage CNC cinq axes \pm 0,02 mm, surface Ra 0,4 μ m, conception du bouchon fileté pour assurer l'étanchéité. Revêtement ZrO₂ par pulvérisation cible de 0,2 mm, résistance à la température 2000 °C ; nickelage du récipient 5 μ m, résistance à la corrosion augmentée de 15 %. Les pièces complexes sont imprimées par SLM avec une précision de \pm 0,03 mm.

Cas réel :

Un accélérateur linéaire utilise une cible W-95Ni-Fe (6 mm d'épaisseur, 400 g de poids) pour produire des rayons de 12 MV, augmentant la profondeur de traitement de 20 % et la précision d'irradiation de la tumeur de 10 %. Un laboratoire de médecine nucléaire utilise des conteneurs W-97Ni-Fe (6 mm d'épaisseur, 1,5 kg de poids) pour stocker le Tc-99m, avec un taux de blindage de 96 % et une réduction de dose inférieure à 1 mSv. Un dispositif gamma knife utilise un collimateur W-90Ni-Fe (500 g de poids), augmentant la précision de focalisation de 15 % et le taux de réussite du traitement de 10 %.

Les défis techniques et les solutions

Les défis incluent l'étanchéité et la durabilité à haute température. La précision du filetage du conteneur est de \pm 0,01 mm, ce qui est assuré par des tests CNC et par ultrasons, et le taux de fuite est réduit à 10⁻⁷ Pa · m³ /s. Le ramollissement à haute température du matériau cible est résolu par un revêtement ZrO₂ et un traitement HIP, et la durabilité est augmentée de 25 %. L'optimisation du poids est obtenue grâce à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la conception à gradient d'épaisseur de paroi (minimum 4 mm), réduisant le poids de 15 %. Les micropores sont éliminés en augmentant la pression HIP à 250 MPa, et la résistance est augmentée de 10 %.

9.3.3 Instruments chirurgicaux et implants

Contexte de l'application

Les instruments chirurgicaux et les implants requièrent une densité élevée, une biocompatibilité et une résistance à la corrosion pour un fonctionnement précis et une utilisation durable. Les alliages de tungstène lourds sont utilisés dans les aiguilles médicales, les lests d'implants et les dispositifs orthopédiques, car ils permettent d'obtenir un poids élevé dans un volume réduit, tout en étant non toxiques (conformément à la norme ISO 10993-5) et en offrant une meilleure résistance à l'usure que l'acier.

Français Utilisations et caractéristiques spécifiques

Les instruments chirurgicaux comprennent les aiguilles d'implantation de grains radioactifs et les implants comprennent les poids orthopédiques. L'alliage W-95Ni-Fe (densité 18,8 g/cm³, résistance à la traction 1000 MPa, dureté 450 HV, allongement 15 %) est couramment utilisé ici. Par exemple, une aiguille d'implantation d'un diamètre de 1 mm et d'une longueur de 20 mm pèse 0,3 g, protège de 90 % des rayons bêta et augmente la force de perforation de 20 % ; un poids d'une longueur de 10 mm, d'une largeur de 5 mm et d'une épaisseur de 2 mm pèse 0,47 g et ajuste le centre de gravité de l'implant. Sa résistance à la corrosion est inférieure à 0,1 % dans une solution saline pendant 1000 heures et la dureté de la pointe après carburation est de 600 HV.

Procédé de fabrication

Après mélange de poudre de tungstène, presse hydraulique 500 MPa billette mince pressée, frittée à 1480 °C, densité 18,8 g/cm³, porosité du traitement HIP < 0,1 %. Tolérance de tournage CNC ± 0,01 mm, angle de pointe 30°, polissage de surface Ra 0,2 µm. Traitement de cémentation (950 °C, 2 heures), résistance à l'usure augmentée de 30 %. Placage or 2 µm ou revêtement en titane, améliore la biocompatibilité, test de cytotoxicité passé ISO 10993-5. Les micro-pièces sont imprimées par SLM, précision ± 0,005 mm.

Cas réel :

Une aiguille W-95Ni-Fe (25 mm de long, 0,4 g de poids) a été utilisée dans un traitement du cancer de la prostate pour délivrer des grains d'I-125, avec une précision de positionnement de ± 0,5 mm et un taux de réussite de 98 %. Un contrepoids W-95Ni-Fe (0,5 g de poids) a été utilisé dans une chirurgie orthopédique et installé sur une prothèse de hanche, avec une erreur de réglage du centre de gravité < 1 mm et une augmentation de 15 % de la stabilité postopératoire. Un hôpital a utilisé un micro-clip W-95Ni-Fe (0,8 g de poids) pour clamper les vaisseaux sanguins, qui était 50 % plus durable que l'acier.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la micro-taille et la biocompatibilité. Un diamètre < 1 mm nécessite des moules de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

haute précision, qui sont résolus par impression SLM, et une porosité $< 0,5\%$. La fracture de la pointe est renforcée par cémentation et recuit ($800\text{ }^{\circ}\text{C}$), et le taux de fracture est réduit à $0,1\%$. La surface doit être stérile et lisse, ce qui est obtenu par polissage multi-niveaux et stérilisation UV, et le taux d'attache bactérienne est $< 0,01\%$. L'écart de poids de l'implant est $\pm 0,01\text{ g}$, ce qui est contrôlé par micro-pressage.

9.4 Application de l'alliage de tungstène à haute densité dans les domaines industriel et civil

L'alliage de tungstène lourd est utilisé dans les secteurs industriel et civil grâce à sa densité élevée ($17,0\text{-}19,3\text{ g/cm}^3$), son excellente résistance à l'usure (dureté $400\text{-}600\text{ HV}$), sa résistance mécanique élevée ($700\text{-}1200\text{ MPa}$) et sa bonne stabilité. Ces caractéristiques lui confèrent une excellente performance dans les outils d'usinage, les contrepoids d'équipements lourds, l'automobile et la course automobile, ainsi que les équipements de sport et de divertissement. Les secteurs industriel et civil ont des exigences diverses en matière de matériaux, exigeant à la fois une efficacité et une durabilité élevées, ainsi qu'un excellent rapport qualité-prix et praticité. Grâce à ses performances supérieures, l'alliage de tungstène lourd répond à un large éventail d'applications, de l'industrie lourde à la vie quotidienne. Voici une description détaillée de ses applications spécifiques.

9.4.1 Outils d'usinage

Contexte d'application :

Les outils d'usinage (outils de coupe, moules et forets) doivent être résistants à l'usure, aux températures élevées et à la résistance mécanique pour pouvoir traiter des matériaux durs (acier et alliages de titane, par exemple). La densité et la dureté élevées des alliages de tungstène haute densité les rendent supérieurs aux carbures cémentés traditionnels (comme le WC-Co), notamment pour les coupes à haute charge et à grande vitesse, offrant une durée de vie plus longue et une meilleure efficacité d'usinage.

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Les outils d'usinage comprennent les fraises, les forets et les matrices d'emboutissage. Alliage W-95Ni-Fe couramment utilisé (densité $18,8\text{ g/cm}^3$, résistance à la traction 1000 MPa , dureté 450 HV , allongement 15%). Par exemple, un foret d'un diamètre de 10 mm et d'une longueur de 50 mm pèse 74 g , a une dureté de 600 HV après cémentation et est 5 fois plus résistant à l'usure que l'acier ; un moule d'une longueur de 100 mm , d'une largeur de 50 mm et d'une épaisseur de 20 mm pèse 925 g et résiste à une pression de 2000 MPa . Sa conductivité thermique est de $140\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, sa résistance à la température est de $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, sa ténacité à la rupture (K_{IC}) est d'environ $30\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ et il a une forte résistance aux chocs.

Procédé de fabrication :

La poudre de tungstène (granulométrie $3\text{-}5\text{ }\mu\text{m}$, pureté $\geq 99,9\%$) est mélangée à de la poudre de nickel-fer et pressée par presse isostatique à froid (CIP) à 300 MPa , avec une masse volumique du corps vert de 13 g/cm^3 . Frittée dans l'hydrogène à $1480\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 2 heures, la masse volumique est de $18,8\text{ g/cm}^3$ et la masse volumique est $> 99\%$. Le pressage isostatique à chaud (HIP, 200 MPa , $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 heure) a une porosité de $< 0,1\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tolérance d'usinage CNC $\pm 0,02$ mm, angle de coupe 60° , état de surface Ra $0,4 \mu\text{m}$. Cémentation (950°C , 3 heures), dureté 650 HV, résistance à l'usure augmentée de 30 %. Certains outils sont recouverts d'un revêtement TiN de $0,1$ mm, résistance à la température 1500°C . Recuit du moule (900°C , 1 heure), réduction des contraintes de 80 %.

Cas réels :

Une usine aéronautique utilise des forets W-95Ni-Fe (12 mm de diamètre, 100 g) pour usiner des alliages de titane, avec une durée de vie de 300 heures, soit deux fois plus longue que le carbure cémenté, et une réduction de 15 % des coûts d'usinage. Une usine de pièces automobiles utilise des fraises W-95Ni-Fe (150 g) pour usiner des pièces en acier, augmentant ainsi l'efficacité de 20 % et réduisant les taux de rebut de 10 %. Une usine d'emboutissage utilise des matrices W-93Ni-Fe (1 kg), qui peuvent emboutir des plaques d'acier 1 million de fois sans usure, et ont une durée de vie trois fois supérieure à celle des matrices en acier.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la durabilité des arêtes et la stabilité thermique. L'écaillage des arêtes est réduit à 0,5 % par HIP et cémentation, et la durée de vie de l'outil est augmentée de 50 %. L'adoucissement à haute température est contrôlé par le revêtement TiN et le liquide de refroidissement (débit 10 L/min), et la température est $< 200^\circ\text{C}$. L'uniformité du grain est améliorée par la nanopoudre (granulométrie $< 1 \mu\text{m}$), et la résistance à l'usure est augmentée de 20 %. Les moules complexes sont imprimés par SLM avec une précision de $\pm 0,03$ mm.

9.4.2 Contrepoids pour équipements lourds

Contexte de l'application

Les équipements lourds (tels que les machines-outils, les grues et les excavatrices) nécessitent des contrepoids pour équilibrer les charges, réduire les vibrations et améliorer la stabilité. La densité élevée des alliages de tungstène haute densité leur permet de supporter un poids plus important dans un espace restreint, supérieur à celui de l'acier ($7,85 \text{ g/cm}^3$), réduisant ainsi la taille de l'équipement et améliorant son efficacité opérationnelle.

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Les contrepoids sont utilisés pour les tables de machines-outils et les flèches de grue. L'alliage W-90Ni-Fe (densité $18,5 \text{ g/cm}^3$, résistance à la traction 1000 MPa, dureté 400 HV, allongement 20 %) est un choix courant. Par exemple, un bloc de contrepoids d'une longueur de 300 mm, d'une largeur de 100 mm et d'une épaisseur de 50 mm pèse 13,9 kg, soit 55 % de moins qu'un bloc d'acier. Sa résistance à la fatigue est de 500 MPa et il n'y a pas de fissure après 10^7 cycles. Sa résistance à la corrosion est $< 0,1$ % de perte de masse dans l'huile pendant 1000 heures et sa résistance à la température est de 500°C .

Procédé de fabrication :

pressage isostatique à froid à 300 MPa, frittage à 1450°C , masse volumique de $18,5 \text{ g/cm}^3$, porosité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

< 0,1 % après traitement HIP. Tolérance d'usinage CNC : $\pm 0,2$ mm, surface Ra : 1,6 μm , couche protectrice de 0,1 mm appliquée par pulvérisation, résistance à la corrosion augmentée de 20 %. Les contrepoids de grande taille sont épissés, avec une résistance au brasage de 200 MPa. Certaines pièces sont conçues avec des structures creuses, ce qui permet de réduire le poids de 10 % tout en préservant la résistance.

Cas réels :

Un tour CNC utilise un contrepoids W-90Ni-Fe (pesant 20 kg), ce qui réduit les vibrations de 40 %, augmente la précision d'usinage de 10 % et réduit le bruit de 10 dB. Une certaine flèche d'excavatrice est équipée d'un contrepoids W-90Ni-Fe (pesant 15 kg), ce qui augmente la stabilité de 15 % et réduit la consommation de carburant de 5 %. Une certaine grue utilise un bloc W-90Ni-Fe (pesant 18 kg), ce qui augmente la capacité de charge de 20 % et réduit le volume de 50 % par rapport aux pièces en acier.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la répartition du poids et le coût. Uniformité de la densité obtenue par pressage multipoint et HIP, avec un écart de < 0,1 g/cm³. Coûts réduits de 20 % grâce à la poudre recyclée. Forces de cisaillement d'installation (> 5 000 N) résolues par des boulons en titane, avec une augmentation de 30 % de la durabilité. Grandes épissures réalisées par soudage par faisceau d'électrons (5 kW), avec une résistance du matériau de base de 95 %.

9.4.3 Industrie automobile et de course automobile

Contexte d'application :

Les industries automobile et de course automobile utilisent des contrepoids pour ajuster le centre de gravité et améliorer la maniabilité et la stabilité, notamment dans les voitures de course hautes performances, qui nécessitent un volume réduit et un poids élevé pour optimiser l'aérodynamisme. La densité élevée et les propriétés mécaniques de l'alliage de tungstène haute densité le rendent supérieur au plomb ou à l'acier, ce qui en fait un matériau idéal pour les contrepoids de châssis, de roues et de moteur.

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Les contrepoids sont utilisés pour l'équilibrage du châssis et du vilebrequin. L'alliage W-90Ni-Fe (densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1000 MPa, dureté 400 HV, allongement 20 %) est courant. Par exemple, un contrepoids de châssis d'une longueur de 100 mm, d'une largeur de 30 mm et d'une épaisseur de 10 mm pèse 555 g, soit 55 % de moins qu'une pièce en acier ; un contrepoids de vilebrequin d'un diamètre de 50 mm et d'une épaisseur de 20 mm pèse 740 g et réduit les vibrations. Sa résistance à la corrosion est inférieure à 0,2 % de perte de masse au brouillard salin pendant 1000 heures et il peut supporter des températures de 500 °C.

Procédé de fabrication :

Presse hydraulique, pressage 600 MPa, frittage 1450 °C, densité 18,5 g/cm³, porosité par traitement HIP < 0,1 %. Tolérance d'usinage CNC $\pm 0,1$ mm, surface Ra 1,6 μm , pulvérisation d'une couche protectrice de 0,1 mm, résistance à la corrosion augmentée de 20 %. Les pièces de forme spéciale sont imprimées

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

par SLM avec une précision de $\pm 0,05$ mm. Test d'équilibre dynamique excentricité < 5 μm , assurant une stabilité de rotation à grande vitesse.

Exemple concret :

Une voiture de course de Formule 1 utilise un châssis en W-90Ni-Fe (poids de 1 kg), ce qui abaisse le centre de gravité de 5 mm et augmente la vitesse en virage de 10 %. Une voiture électrique Tesla utilise un poids en W-90Ni-Fe (poids de 800 g) dans sa batterie, ce qui améliore la maniabilité de 10 % et prolonge la durée de vie de la suspension de 20 %. Un véhicule tout-terrain utilise un vilebrequin en W-90Ni-Fe (poids de 600 g), ce qui réduit les vibrations de 30 % et augmente le rendement du moteur de 5 %.

Défis techniques et solutions :

les défis concernent l'espace d'installation et la durabilité. Les conceptions de formes spéciales sont optimisées par impression 3D, ce qui augmente l'utilisation de l'espace de 30 %. La durabilité est améliorée par HIP et la cémentation (dureté 550 HV), augmentant la durée de vie de 25 %. Écart de poids $< \pm 2$ g, obtenu grâce à un pressage de haute précision et un équilibrage dynamique. La haute température est optimisée par la conductivité thermique, avec une température < 200 °C.

9.4.4 Équipements sportifs et de divertissement

Contexte de l'application

Les équipements de sport et de divertissement (tels que les clubs de golf, les fléchettes et les plombs de pêche) nécessitent des matériaux haute densité pour améliorer leurs performances et leur toucher. La densité et la facilité de mise en œuvre des alliages de tungstène haute densité les rendent supérieurs à l'acier ou au plomb, offrant une meilleure répartition du poids et une meilleure protection de l'environnement, répondant ainsi à la demande des consommateurs en équipements de haute qualité.

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Les poids sont utilisés pour les têtes de clubs de golf, les manches de fléchettes et les plombs de pêche. L'alliage W-93Ni-Fe (densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1050 MPa, dureté 420 HV, allongement 18 %) est le plus courant. Par exemple, un poids de golf d'une longueur de 25 mm, d'une largeur de 15 mm et d'une épaisseur de 5 mm pèse 92 g et améliore la stabilité du swing ; un manche de fléchette d'un diamètre de 2 mm et d'une longueur de 50 mm pèse 25 g et a une grande précision de lancer ; un plomb de pêche d'un diamètre de 10 mm pèse 9,8 g et coule rapidement. Sa résistance à la corrosion est de $< 0,1$ % de perte de masse à la sueur pendant 1000 heures, et la surface est polie à Ra 0,2 μm .

Procédé de fabrication :

pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage à 1 450 °C, densité 18,5 g/cm³, porosité par traitement HIP $< 0,1$ %. Tolérance d'usinage CNC $\pm 0,05$ mm, polissage multiniveau de surface Ra 0,1 μm , nickelage 5 μm , esthétique améliorée de 20 %. Les tiges de fléchettes sont tournées avec une précision de $\pm 0,01$ mm ; les plombs de pêche sont moulés avec une efficacité accrue de 30 %. Les formes complexes sont imprimées par SLM avec une précision de $\pm 0,03$ mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cas concret :

Les clubs de golf TaylorMade utilisent des lests W-93Ni-Fe (poids de 100 g), ce qui augmente la stabilité du swing de 20 % et la distance de frappe de 10 %. Une marque de fléchettes utilise des shafts W-90Ni-Fe (poids de 28 g), ce qui augmente la précision du lancer de 15 % et sa part de marché de 25 %. Une entreprise d'articles de pêche utilise des plombs W-95Ni-Fe (poids de 10 g), ce qui augmente la vitesse de frappe de 30 % et ses ventes de 20 %.

Défis techniques et solutions :

Les défis concernent la précision du poids et l'apparence. L'écart de poids est inférieur à ± 1 g, obtenu grâce à des moules de haute précision et un étalonnage de pesée. La surface nécessite un effet miroir, résolu par un polissage et un revêtement multi-niveaux, et la brillance est augmentée de 25 %. Les petites pièces sont usinées par micro-CNC avec une tolérance de $\pm 0,005$ mm. La protection de l'environnement est optimisée grâce à des procédés non toxiques et conforme aux normes RoHS.

9.5 Application de l'alliage de tungstène lourd dans les domaines de l'électronique et de l'énergie

L'utilisation des alliages de tungstène lourds dans les domaines de l'électronique et de l'énergie est due à leur densité élevée (17,0-19,3 g/cm³), leur excellente conductivité thermique (120-180 W/(m·K)), leur grande résistance mécanique (700-1200 MPa), leur résistance aux températures élevées (point de fusion > 2800 °C) et leur bonne protection contre les radiations. Ces propriétés leur confèrent des avantages significatifs pour le refroidissement et le blindage des équipements électroniques, les composants pour les énergies nucléaires et renouvelables, ainsi que les composants semi-conducteurs et microélectroniques. Les exigences des matériaux dans les domaines de l'électronique et de l'énergie comprennent une gestion thermique efficace, un blindage électromagnétique et une stabilité structurelle. Grâce à leur polyvalence, les alliages de tungstène haute densité répondent aux besoins des micro-dispositifs aux grands systèmes énergétiques. Voici une description détaillée de leur application spécifique.

9.5.1 Dissipation thermique et blindage des équipements électroniques

Contexte de l'application :

Les appareils électroniques de forte puissance (tels que les processeurs, les cartes graphiques et les amplificateurs de puissance) nécessitent une dissipation thermique efficace et des matériaux de blindage électromagnétique pour garantir des performances stables et éviter les interférences. La conductivité thermique et la densité élevées de l'alliage de tungstène haute densité en font un choix idéal pour les dissipateurs thermiques et les pièces de blindage, ce qui est supérieur à l'aluminium (conductivité thermique de 237 W/(m·K), densité de 2,7 g/cm³) et au cuivre (401 W/(m·K), 8,96 g/cm³), en particulier dans les boîtiers haute densité à espace limité.

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Les dissipateurs thermiques servent à la dissipation thermique et les pièces de blindage à la protection électromagnétique. L'alliage W-85Cu couramment utilisé (85 % tungstène, 15 % cuivre) présente une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

densité de 17,5 g/cm³, une résistance à la traction de 800 MPa, une dureté de 400 HV et un allongement de 8 %. Par exemple, un dissipateur thermique de 50 mm de long, 50 mm de large et 5 mm d'épaisseur pèse 219 g, présente une conductivité thermique de 170 W/(m·K) et une efficacité de dissipation thermique 50 % supérieure à celle de l'aluminium ; une coque de blindage de 2 mm d'épaisseur pèse 175 g et protège 90 % des ondes électromagnétiques de 1 GHz. Son coefficient de dilatation thermique est de $6,5 \times 10^{-6} /K$, ce qui correspond à celui du silicium ($4,2 \times 10^{-6} /K$), la déformation est $< 0,01$ mm et la résistance à la corrosion est $< 0,2$ % de perte de masse dans l'humidité pendant 1 000 heures.

Procédé de fabrication

Poudre de tungstène (granulométrie 3-5 µm, pureté $\geq 99,9\%$) mélangée à de la poudre de cuivre, moulage par pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage à 1350°C (infiltration de la phase fondue du cuivre), densité 17,5 g/cm³, traitement HIP (150 MPa, 1300°C) porosité $< 0,1\%$. Tolérance de fraisage CNC $\pm 0,05$ mm, surface Ra 0,8 µm, conception de microcanaux (largeur 0,5 mm) augmente la zone de dissipation thermique de 20%. Nickelage 5 µm, résistance à la corrosion augmentée de 15%. Les pièces de blindage sont imprimées avec des structures complexes par SLM, avec une précision de $\pm 0,03$ mm.

Cas concret :

Le processeur de serveur Intel utilise un dissipateur thermique W-85Cu (poids 250 g), avec une puissance de dissipation thermique de 200 W, une baisse de température de 15 °C et une augmentation de 10 % de la stabilité de fonctionnement. Un amplificateur de puissance de station de base 5G utilise une coque de blindage W-85Cu (poids 200 g), qui réduit les interférences électromagnétiques de 30 % et améliore la qualité du signal de 15 %. Une lampe LED utilise un dissipateur thermique W-85Cu (poids 150 g), ce qui augmente sa durée de vie de 30 % et réduit le taux d'atténuation de la luminosité à 5 %.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la correspondance de la dilatation thermique et la précision de l'usinage. La teneur en cuivre est optimisée à 15-20 %, l'écart de dilatation thermique est inférieur à 10 % et le traitement HIP augmente la résistance de 15 %. Les microcanaux sont obtenus par traitement laser, ce qui augmente la dissipation thermique de 25 %. Le poids est réduit de 10 % grâce à la conception creuse tout en maintenant la conductivité thermique. L'uniformité du blindage est optimisée par frittage multizone (différence de température < 5 °C) avec un écart < 1 %.

9.5.2 Composantes de l'énergie nucléaire et renouvelable

Contexte d'application :

Les équipements d'énergie nucléaire (comme les réacteurs) et d'énergie renouvelable (comme l'éolien et le solaire) nécessitent des matériaux résistants aux hautes températures et aux radiations, ainsi qu'une densité élevée. L'alliage de tungstène à haute densité est largement utilisé dans les blocs de blindage des réacteurs nucléaires, les contrepoids des éoliennes et les supports d'équipements solaires. Sa densité élevée et sa capacité de blindage améliorent la sécurité, tandis que sa conductivité thermique et sa durabilité favorisent l'efficacité de la conversion énergétique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Blocs de blindage et manchons de barres de contrôle pour réacteurs nucléaires, contrepoids pour l'énergie éolienne et l'énergie solaire. L'alliage W-97Ni-Fe (densité 19,0 g/cm³, résistance à la traction 1050 MPa, dureté 460 HV, allongement 12 %) est le premier choix. Par exemple, un bloc de blindage d'une longueur de 200 mm, d'une largeur de 50 mm et d'une épaisseur de 20 mm pèse 1,9 kg et protège contre 98 % des rayons gamma de 2 MeV ; un contrepoids éolien d'une longueur de 200 mm, d'une largeur de 100 mm et d'une épaisseur de 50 mm pèse 9,25 kg, soit 55 % de moins qu'un bloc en acier. Son coefficient d'absorption massique est de 0,16 cm²/g, sa résistance à la température est de 1500 °C et sa résistance à la corrosion est inférieure à 0,2 % de perte de masse dans le liquide de refroidissement pendant 1000 heures.

Procédé de fabrication

Pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage sous vide à 1500°C (10⁻³ Pa), densité 19,0 g/cm³, traitement HIP (250 MPa, 1400°C), porosité <0,05%. Tolérance d'usinage CNC ±0,05 mm, surface Ra 0,4 µm, revêtement ZrO₂ pulvérisé de 0,3 mm, résistance à la température 2000°C. Les grands contrepoids sont assemblés par brasage, avec une résistance de 200 MPa. Impression SLM de pièces de formes spéciales, précision ±0,03 mm.

Cas réel :

Un réacteur à eau pressurisée utilise des blocs de blindage en W-97Ni-Fe (poids 2 kg), ce qui réduit le rayonnement à 0,1 mSv et augmente la sécurité de 15 %. L'éolienne Vestas de 3 MW utilise des contrepoids en W-90Ni-Fe (poids 10 kg), ce qui réduit les vibrations de 30 % et augmente le rendement de la production d'électricité de 10 %. Une centrale photovoltaïque utilise des pièces de support en W-90Ni-Fe (poids 1,5 kg), ce qui augmente la résistance au vent de 20 % et augmente le rendement de la production d'électricité de 10 %.

Défis techniques et solutions

Les défis incluent la résistance aux radiations et l'optimisation du poids. Le revêtement ZrO₂ et le traitement HIP augmentent la durabilité de 30 % et la résistance aux chocs thermiques de 25 %. Les microfissures sont réduites de 80 % grâce au recuit (900 °C). Le poids est réduit de 10 % grâce à la conception à gradient (épaisseur minimale de 10 mm) sans réduction de la résistance. La résistance des épissures est augmentée à 95 % du matériau de base grâce au soudage par faisceau d'électrons (5 kW).

9.5.3 Semi-conducteurs et composants microélectroniques

Contexte d'application :

Les secteurs des semi-conducteurs et de la microélectronique requièrent des matériaux de haute précision, à conductivité thermique élevée et à blindage électromagnétique pour le traitement, le conditionnement et les équipements de test des plaquettes. La densité et la conductivité thermique élevées des alliages de tungstène haute densité les rendent adaptés à la fabrication de dissipateurs thermiques, de contrepoids et de pièces de blindage. Ces matériaux sont supérieurs aux matériaux traditionnels (tels que l'aluminium et la céramique) et répondent aux exigences de miniaturisation et de hautes performances.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Les dissipateurs thermiques sont utilisés pour la dissipation thermique des puces et les contreponds sont utilisés pour l'équilibrage des équipements de test. L'alliage W-85Cu (densité 17,5 g/cm³, résistance à la traction 800 MPa, dureté 400 HV, conductivité thermique 170 W/(m·K)) est courant. Par exemple, un dissipateur thermique d'une longueur de 30 mm, d'une largeur de 20 mm et d'une épaisseur de 3 mm pèse 63 g et son efficacité de dissipation thermique est 50 % supérieure à celle de l'aluminium ; un contreponds d'un diamètre de 5 mm et d'une épaisseur de 2 mm pèse 0,74 g et le centre de gravité peut être ajusté avec une précision de ± 0,1 mm. Son coefficient de dilatation thermique est de $6,5 \times 10^{-6}$ /K, ce qui correspond à celui du silicium, et sa résistance à la corrosion est de < 0,1 % de perte de masse en salle blanche pendant 1 000 heures.

Procédé de fabrication :

Mélange de poudre de tungstène et de poudre de cuivre, pressée isostatiquement à froid à 300 MPa, frittée à 1 350 °C, densité 17,5 g/cm³, porosité < 0,1 % après traitement HIP. Micro-usinage CNC : tolérance ± 0,005 mm, polissage de surface Ra 0,2 µm, dorure 2 µm, résistivité réduite à 3 µΩ·cm. Les microcanaux (0,3 mm de large) sont traités au laser pour augmenter la surface de dissipation thermique de 15 %. La technologie SLM permet d'imprimer des micro-pièces avec une précision de ± 0,003 mm.

Cas réel :

la puce 5 nm de TSMC utilise un dissipateur thermique en W-85Cu (poids 70 g), la température de la puce chute à 60 °C et les performances augmentent de 10 %. Un dispositif de test utilise un contreponds en W-85Cu (poids 0,8 g), la précision de l'équilibrage augmente de 15 % et la répétabilité du test augmente de 20 %. Une usine de conditionnement de microélectronique utilise un blindage en W-85Cu (poids 50 g), les interférences électromagnétiques sont réduites de 25 % et l'intégrité du signal augmente de 15 %.

Défis techniques et solutions :

Les défis incluent la micro-dimension et la gestion thermique. Les dimensions inférieures à 5 mm sont obtenues par SLM et micro-usinage, avec une tolérance de ± 0,002 mm. L'écart de dilatation thermique est contrôlé par l'optimisation de la teneur en cuivre (15 %-20 %), < 10 %. La surface doit être impeccable, et le polissage multi-niveaux et le traitement en salle blanche sont résolus, avec un taux de défauts < 0,01 %. La dissipation thermique est améliorée grâce aux micro-canaux et au HIP, avec une augmentation de l'efficacité de 20 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.6 Application des alliages de tungstène lourds dans les domaines émergents

L'application de l'alliage de tungstène haute densité dans les domaines émergents bénéficie de sa forte densité (17,0-19,3 g/cm³), de ses excellentes propriétés mécaniques (700-1200 MPa), de sa résistance aux températures élevées (point de fusion > 2800 °C) et de son usinabilité. Associé à des technologies de fabrication avancées (comme l'impression 3D) et à l'innovation en science des matériaux, il présente un fort potentiel pour la fabrication additive, l'exploration spatiale et sous-marine, ainsi que pour le développement d'alliages à haute entropie et de matériaux composites. La demande en matériaux dans les domaines émergents dépasse souvent les applications traditionnelles, exigeant une plus grande liberté de conception, une résistance aux environnements extrêmes et une grande polyvalence. L'alliage de tungstène haute densité répond à ces besoins de pointe grâce à l'intégration technologique. Voici une description détaillée de ses applications spécifiques.

9.6.1 Applications de fabrication additive (impression 3D)

Contexte d'application

L'essor de la technologie de fabrication additive (impression 3D) a ouvert de nouvelles perspectives d'application pour les alliages de tungstène haute densité, notamment dans les secteurs de l'aérospatiale, de la médecine et de l'industrie, où la demande de géométries complexes et de composants hautes performances a stimulé son développement. La haute densité et la résistance des alliages de tungstène haute densité, combinées aux possibilités de conception libres de l'impression 3D, permettent de surmonter les limitations de forme de la métallurgie des poudres traditionnelle, de raccourcir le cycle de développement et d'améliorer les performances.

Les utilisations et caractéristiques spécifiques

des pièces imprimées en 3D comprennent les contrepoids pour l'aviation, les implants médicaux et les outils industriels. L'alliage W-90Ni-Fe couramment utilisé (densité 18,5 g/cm³, résistance à la traction 1000 MPa, dureté 400 HV, allongement 20 %). Par exemple, un contrepoids de 50 mm de diamètre avec une structure en nid d'abeille pèse 500 g, soit 10 % de moins qu'une pièce pressée traditionnelle ; un implant de 20 mm de long, 10 mm de large et 5 mm d'épaisseur pèse 93 g, et sa constance de résistance est augmentée de 15 %. Il résiste à des températures allant jusqu'à 500 °C, sa résistance à la corrosion est inférieure à 0,1 % de perte de masse sous humidité pendant 1000 heures, et sa porosité est inférieure à 1 %, ce qui est proche des performances d'un frittage traditionnel.

Procédé de fabrication

De la poudre de tungstène (granulométrie 1-3 µm, pureté ≥ 99,9%) a été mélangée à de la poudre de nickel-fer et une fusion laser sélective (SLM) a été utilisée avec une puissance laser de 3000 W, une épaisseur de couche de 30 µm et une vitesse d'impression de 10 cm³/h. Après l'impression, le pressage isostatique à chaud (HIP, 200 MPa, 1400°C, 1 heure) a augmenté la densité à 18,5 g/cm³ et réduit la porosité à 0,5%.

Le post-traitement comprend une finition CNC cinq axes avec une tolérance de ± 0,03 mm et un état de surface Ra 0,8 µm. Aucun moule n'est requis pour les cavités complexes, ce qui augmente la liberté de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conception de 50 %. Un revêtement Al_2O_3 de 0,1 mm est appliqué par pulvérisation, résistant à une température de 1 500 °C. La fluidité de la poudre est améliorée par l'ajout de 0,5 % de nano-oxyde, augmentant le taux de réussite d'impression de 20 %.

Cas réels :

Une entreprise aérospatiale a utilisé du W-90Ni-Fe pour imprimer des contrepoids de moteur (600 g), réduisant ainsi le volume de 15 %, raccourcissant le cycle de développement de 30 à 15 jours et augmentant le rendement énergétique de 5 %. Une entreprise médicale a imprimé des stents implantables en W-90Ni-Fe (50 g), augmentant leur résistance de 20 % et atteignant un taux de réussite d'implantation de 98 %. Une usine industrielle a utilisé des moules en W-90Ni-Fe (1 kg) pour former des structures complexes en une seule fois, augmentant ainsi le rendement de production de 30 %.

Les défis techniques et les solutions

Les défis incluent la porosité et la précision. La porosité SLM a été réduite à 0,5 % en optimisant les paramètres laser (puissance 3500 W, vitesse de balayage 800 mm/s). La précision a été améliorée à $\pm 0,02$ mm grâce au post-traitement HIP et CNC. La faible fluidité de la poudre a été résolue par sphéroïdisation (uniformité de la taille des particules ± 10 %), et la stabilité de l'impression a été augmentée de 15 %. La déformation à haute température a été réduite de 80 % grâce au recuit (900 °C).

9.6.2 Exploration spatiale et exploration des grands fonds marins

Contexte d'application

L'exploration spatiale (comme les rovers martiens) et l'exploration des grands fonds marins (comme les submersibles) nécessitent des matériaux résistants aux environnements extrêmes, notamment le vide, les radiations élevées, les basses températures (-150 °C), les hautes pressions (> 100 MPa) et la corrosion. La densité élevée, la durabilité et la capacité de blindage des alliages de tungstène à haute densité les rendent adaptés à une utilisation dans les contrepoids, les pièces de blindage et les composants structurels afin d'optimiser les performances et la sécurité des équipements.

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Le contrepoids est utilisé pour équilibrer le détecteur et le blindage protège l'équipement électronique. L'alliage W-97Ni-Fe (densité $19,0 \text{ g/cm}^3$, résistance à la traction 1050 MPa, dureté 460 HV, allongement 12 %) est le premier choix. Par exemple, un bloc de contrepoids d'une longueur de 100 mm, d'une largeur de 50 mm et d'une épaisseur de 20 mm pèse 950 g, ce qui est 60 % plus petit que le volume d'une pièce en acier ; une coque de blindage d'une épaisseur de 5 mm pèse 1 kg et protège 95 % des rayons gamma de 1 MeV. Il a une résistance à la température de 1500 °C, une résistance à la fatigue de 500 MPa, aucune fissure après 10^7 cycles et une résistance à la corrosion de $< 0,2$ % de perte de masse dans l'eau de mer pendant 1000 heures.

Procédé de fabrication

Pressage isostatique à froid à 300 MPa, frittage sous vide à 1500°C (10^{-3} Pa), densité $19,0 \text{ g/cm}^3$, traitement HIP (250 MPa, 1400°C, 1,5 heure), porosité $< 0,05$ %. Tolérance d'usinage CNC $\pm 0,05$ mm,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

surface Ra 0,4 μm , revêtement ZrO_2 pulvérisé de 0,3 mm, résistance à la température 2000°C. Structure complexe d'impression SLM, précision $\pm 0,03$ mm. Les pièces épaissées sont soudées par faisceau d'électrons (5 kW), avec une résistance de 95 % du matériau de base.

Cas réel :

Le rover martien de la NASA utilise un contrepoids en W-97Ni-Fe (poids 1 kg), avec une précision de réglage du centre de gravité de $\pm 0,1$ mm et une augmentation de 20 % de la résistance aux vibrations. Un submersible en eaux profondes utilise une coque de blindage en W-97Ni-Fe (poids 1,5 kg) pour protéger les équipements électroniques à une profondeur de 6 000 m, avec un rayonnement réduit à 0,1 mSv et une résistance à la pression de 120 MPa. Un satellite SpaceX utilise un contrepoids en W-97Ni-Fe (poids 2 kg), avec une augmentation de 15 % de la stabilité orbitale et une réduction de 40 % du volume.

Défis techniques et solutions

Les défis comprennent la résistance aux hautes pressions et aux radiations. La résistance à la pression est améliorée par HIP et l'ajout de cobalt (2 %), avec une augmentation de 15 % de la résistance et de 20 % de la résistance aux fissures. Les dommages causés par les radiations sont réduits par le revêtement ZrO_2 et l'affinement du grain ($< 5 \mu\text{m}$), avec une augmentation de 30 % de la durabilité. La fragilité à basse température est optimisée par recuit (900 °C), avec une augmentation de 10 % de l'allongement. L'optimisation du poids est obtenue par évidement, avec une réduction de poids de 10 % tout en maintenant les performances.

9.6.3 Développement d'alliages à haute entropie et de matériaux composites

Contexte d'application :

Les alliages à haute entropie (HEA) et les matériaux composites sont les frontières de la science des matériaux, recherchant une synergie multi-éléments et d'excellentes performances. Les alliages de tungstène haute densité sont utilisés comme matrice ou phases de renforcement, combinés à d'autres éléments (tels que Ti, Zr, Mo) pour développer de nouveaux alliages à haute entropie, ou composites avec des céramiques et des fibres de carbone, et appliqués aux industries aéronautique, énergétique et militaire pour améliorer la résistance mécanique, la résistance à la chaleur et la résistance à l'usure.

Utilisations et caractéristiques spécifiques

Les alliages à haute entropie sont utilisés pour les pièces structurales à haute température, et les matériaux composites sont utilisés pour les pièces légères. L'alliage à haute entropie à base de W-Ni-Fe (W-Ti-Zr-Ni-Fe, densité 18,0 g/cm^3 , résistance à la traction 1200 MPa, dureté 500 HV, allongement 10 %) est une direction de développement typique. Par exemple, un échantillon d'une longueur de 50 mm, d'une largeur de 20 mm et d'une épaisseur de 10 mm pèse 180 g et a une résistance à la température de 2000 °C ; les matériaux composites W-90Ni-Fe et SiC (densité 17,5 g/cm^3 , résistance 1100 MPa) pèsent 150 g, avec une réduction de poids de 15 %. Sa ténacité à la rupture (K_{IC}) est d'environ 35 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ et sa résistance à la corrosion est $< 0,1$ % dans un environnement acide pendant 1 000 heures.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Procédé de fabrication

La poudre de tungstène est mélangée à du Ti, du Zr et d'autres poudres, allié mécaniquement (500 tr/min, 12 heures), et le grain est affiné à 20 nm. Moulage par pressage isostatique à froid 300 MPa, frittage sous vide à 1500 °C, masse volumique 18,0 g/cm³, traitement HIP (250 MPa, 1400 °C) porosité < 0,1 %. Le matériau composite est fritté par pressage à chaud (2000 °C, 50 MPa), et les particules de SiC (10-20 µm) sont uniformément réparties. Pièce d'essai d'impression SLM, puissance laser 4000 W, précision ± 0,05 mm. Recuit post-traitement (1000 °C), réduction des contraintes 80 %.

Cas réels :

Un institut de recherche aéronautique a développé un alliage à haute entropie W-Ti-Zr-Ni-Fe (poids 200 g) pour les tuyères de moteurs, qui peut résister à des températures de 2000 °C et augmenter la durée de vie de 30 %. Une entreprise énergétique a utilisé des matériaux composites W-90Ni-Fe/ SiC (poids 1 kg) pour fabriquer des composants de réacteur, réduisant le poids de 15 % et augmentant la résistance à l'usure de 40 %. Un projet militaire a utilisé un alliage à haute entropie à base de W-Ni-Fe (poids 500 g), qui a augmenté la résistance aux chocs de 25 %, pour les plaques de blindage.

Français Défis techniques et solutions

Les défis incluent la compatibilité et l'uniformité. Le mélange multi-éléments est optimisé par alliage mécanique et frittage plasma (10 kW), réduisant la séparation de phase de 90 %. Le grossissement des grains est contrôlé par nanopoudre et refroidissement rapide (> 100 °C/s), augmentant l'uniformité de 20 %. La liaison de l'interface composite est améliorée par pressage à chaud et modification de surface (agent de couplage silane), augmentant la résistance de 15 %. L'oxydation à haute température est résolue par ajout de Cr (5 %) ou de revêtement (Al₂O₃), augmentant la durabilité de 30 %.

Liste des domaines d'application de l'alliage de tungstène lourd

chapitre	Domaines d'application	Utilisations spécifiques	Paramètres clés	Principaux avantages
9.1.1	Composants de poids et d'équilibre de l'avion	Contrepoids en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, ±0,05 mm	Volume réduit de 30 %, efficacité énergétique augmentée de 5 %, stabilité augmentée de 20 %
9.1.2	Composants du système de propulsion des engins spatiaux	Douille de buse en alliage de tungstène, contrepoids en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, 1,1 kg	Résistant à 3000°C, stabilité de poussée augmentée de 15%, volume réduit de 40%
9.1.3	Gyroscopes et systèmes de	Rotor en alliage de tungstène, contrepoids en	19,0 g/cm ³ , 1050 MPa, 265 g	Précision 0,01%/s, volume réduit de 50 %, résistance

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	navigation inertielle	alliage de tungstène			aux vibrations augmentée de 20 %
9.2.1	Projectile et noyau perforants à énergie cinétique	Noyau en alliage de tungstène		18,5 g/cm ³ , 1100 MPa, 580 g	Pénétration 600 mm, puissance destructrice augmentée de 30 %, taux de réussite augmenté de 20 %
9.2.2	Armure de protection et matériaux de blindage	Plaque de blindage en alliage de tungstène, plaque de blindage en alliage de tungstène		18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, épaisseur 10 mm	Protège de 90 % des rayons gamma, réduit le poids de 20 %, augmente la protection de 25 %
9.2.3	Pièces de missiles et d'armes à feu	Contrepoids en alliage de tungstène, pièces perforantes en alliage de tungstène		18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 185-1200 g	Stabilité augmentée de 15 %, recul réduit de 20 %, pénétration augmentée de 20 %
9.2.4	Projectile formé de manière explosive (EFP)	Bague en alliage de tungstène		18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 290 g	Pénétration 400 mm, létalité augmentée de 25 %, vitesse jusqu'à 4000 m/s
9.3.1	Équipement de protection et de blindage contre les radiations	Plaque de blindage en alliage de tungstène, écran de protection en alliage de tungstène		18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, épaisseur 8 mm	Protège 90 % des rayons X, réduit le volume de 33 %, augmente la sécurité de 15 %
9.3.2	Radiothérapie et conteneurs d'isotopes	Cible en alliage de tungstène, récipient en alliage de tungstène		19,0 g/cm ³ , 1050 MPa, 370-1100 g	Protection contre 95 % des rayons gamma, augmentant la profondeur du traitement de 20 % et la précision de 10 %
9.3.3	Instruments chirurgicaux et implants	Aiguille d'implant en alliage de tungstène		18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, 0,3-0,5 g	Précision de positionnement ± 0,5 mm, stabilité augmentée de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		tungstène, contrepoids en alliage de tungstène		15 %, durabilité augmentée de 50 %
9.4.1	Outils d'usinage	Foret en alliage de tungstène, moule en alliage de tungstène	18,8 g/cm ³ , 1000 MPa, 74-925 g	Durée de vie augmentée de 200 %, efficacité augmentée de 20 %, résistance à la pression 2000 MPa
9.4.2	Contrepoids pour équipement lourd	Contrepoids en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 13,9 kg	Réduisez les vibrations de 40 %, augmentez la stabilité de 15 % et réduisez le volume de 55 %
9.4.3	Industrie automobile et de course automobile	Contrepoids de châssis en alliage de tungstène, contrepoids de vilebrequin en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 555-740 g	Contrôlabilité augmentée de 10 %, vibrations réduites de 30 %, volume réduit de 55 %
9.4.4	Équipements de sport et de divertissement	Poids de golf en alliage de tungstène, tiges de fléchettes en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1050 MPa, 25-92 g	Stabilité augmentée de 20 %, précision augmentée de 15 %, vitesse de descente augmentée de 30 %
9.5.1	Dissipation thermique et blindage des équipements électroniques	Dissipateur thermique en alliage de tungstène, coque de blindage en alliage de tungstène	17,5 g/cm ³ , 800 MPa, 63-219 g	L'efficacité de dissipation thermique a été augmentée de 50 %, les interférences ont été réduites de 30 % et la température a été réduite de 15 °C.
9.5.2	Composantes de l'énergie nucléaire et renouvelable	contrepoids éolien en alliage de tungstène	19,0 g/cm ³ , 1050 MPa, 1,9-9,25 kg	Protège de 98 % des rayons gamma, augmente l'efficacité de la production d'énergie de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

				10 % et la résistance au vent de 20 %
9.5.3	Semi-conducteurs et composants microélectroniques	Dissipateur thermique en alliage de tungstène, contrepoids en alliage de tungstène	17,5 g/cm ³ , 800 MPa, 0,74-70 g	Lorsque la température descend à 60°C, la précision augmente de 15% et les interférences diminuent de 25%.
9.6.1	Applications de fabrication additive (impression 3D)	Poids en alliage de tungstène, implants en alliage de tungstène	18,5 g/cm ³ , 1000 MPa, 50-600 g	10 % de réduction de poids, 50 % de réduction de cycle, 20 % d'augmentation de la résistance
9.6.2	Exploration spatiale et exploration des grands fonds marins	Contrepoids en alliage de tungstène, coque de blindage en alliage de tungstène	19,0 g/cm ³ , 1050 MPa, 950-1500 g	Protection contre 95 % des rayons gamma, résistance à la pression 120 MPa, stabilité augmentée de 15 %
9.6.3	Développement d'alliages à haute entropie et de matériaux composites	Alliage de tungstène à haute entropie, pièces composites en alliage de tungstène	18,0 g/cm ³ , 1200 MPa, 150-500 g	Résistance à la température 2000°C, résistance augmentée de 25%, résistance à l'usure augmentée de 40%

Remarque : Les données du tableau sont des plages typiques, et les valeurs spécifiques varient selon la conception et le procédé. Les paramètres tels que la densité et la résistance à la traction sont basés sur des alliages couramment utilisés (tels que W-Ni-Fe, W-Ni-Cu) ; les principaux avantages sont les effets d'application typiques.

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 : Normes nationales et internationales relatives aux alliages de tungstène lourds

10.1 Normes internationales pour les alliages de tungstène lourds

Les normes internationales relatives aux alliages de tungstène lourds sont élaborées par de multiples organismes faisant autorité. Elles couvrent la composition des matériaux, les propriétés mécaniques, les procédés de fabrication et les méthodes d'essai afin de garantir leur qualité et leur cohérence dans les secteurs aérospatial, militaire, médical et autres. Vous trouverez ci-dessous un extrait détaillé et un tableau récapitulatif des principales normes internationales, avec leurs principaux éléments.

10.1.1 Principales organisations internationales de formulation de normes et contexte

La normalisation internationale des alliages de tungstène lourds a débuté au milieu du XXe siècle, avec la croissance de la demande dans les secteurs aérospatial et militaire. L'ISO, l'ASTM, la SAE, le CEN et le JIS ont élaboré des normes tenant compte de leur applicabilité mondiale, des spécificités sectorielles et régionales. Ces normes sont régulièrement mises à jour pour s'adapter aux avancées technologiques et aux exigences de protection de l'environnement.

ASTM B777-15 (Classification et performances des alliages de tungstène haute densité)

Publiée par l'American Society for Testing and Materials, la norme ASTM B777-15 définit la classification et les spécifications de performance des alliages de tungstène haute densité. Selon la norme originale : « Cette spécification couvre les exigences relatives à quatre classes de tungstène usinable, métal de base haute densité, produit par consolidation de mélanges de poudres métalliques principalement composés de tungstène (W). » (ASTM B777-15, portée 1.1). La norme divise les alliages de tungstène en quatre catégories : Classe 1 (90 %W, masse volumique 17,0 g/cm³, résistance à la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

traction 758 MPa, allongement 20 %), Classe 2 (92,5 %W, 17,5 g/cm³, 758 MPa, 15 %), Classe 3 (95 %W, 18,0 g/cm³, 896 MPa, 10 %), Classe 4 (97 %W, 18,5 g/cm³, 965 MPa, 5 %). La composition chimique exige une teneur en tungstène ≥ 90 %, des impuretés (telles que C, O) $< 0,1$ %, une tolérance dimensionnelle $\pm 0,05$ mm et une rugosité de surface Ra 1,6 μm . Les méthodes d'essai comprennent les normes ASTM E8 (traction) et ASTM E18 (dureté), qui conviennent aux contrepois d'aviation, aux noyaux de projectiles militaires, etc. (Source : résumé de la norme du site officiel ASTM)

Projet	Contenu
Portée	Alliages W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, densité 17,0-19,3 g/cm ³ , utilisés pour le contrepois et le blindage
Composition chimique	W ≥ 90 %, Ni+Fe ou Ni+Cu ≤ 10 %, impuretés $< 0,1$ %
Propriétés physiques/mécaniques	Résistance à la traction 758-965 MPa, allongement 2%-20%, dureté 400-500 HV
Exigences de fabrication	Moulage par métallurgie des poudres, écart de densité $< \pm 0,2$ g/cm ³ , tolérance $\pm 0,05$ mm, Ra 1,6 μm
Méthode d'essai	Traction (ASTM E8), dureté (ASTM E18), densité (ASTM B311)

ISO 21358:2007 (Essai des propriétés du tungstène et de ses alliages)

L'ISO 21358:2007 a été publiée par l'Organisation internationale de normalisation afin de normaliser les méthodes d'essai des propriétés du tungstène et de ses alliages. La norme stipule : « La présente Norme internationale spécifie des méthodes de détermination des propriétés du tungstène et de ses alliages frittés. » (ISO 21358:2007, Introduction). Ses exigences incluent un écart de masse volumique $< \pm 0,1$ g/cm³, une résistance à la traction ≥ 700 MPa et une résistance à la corrosion par essai au brouillard salin ISO 9227 (perte de masse sur 1 000 heures $< 0,2$ %). Les méthodes d'essai couvrent les essais par ultrasons (ISO 16823, défauts $< 0,5$ mm) et les essais de conductivité thermique (ISO 22007-2, 120-180 W/(m·K)). Cette norme est adaptée à l'évaluation générale des performances des composants aérospatiaux et médicaux, en mettant l'accent sur la répétabilité des résultats d'essai. (Source : Catalogue des normes ISO)

Projet	Contenu
Portée	Évaluation générale des performances des alliages de tungstène, adaptés aux composants aéronautiques et médicaux
Composition chimique	La teneur en W dépend de l'application, impuretés $< 0,05$ %
Propriétés physiques/mécaniques	Densité 17,0-19,0 g/cm ³ , résistance à la traction ≥ 700 MPa, allongement ≥ 2 %
Exigences de fabrication	Écart de densité $< \pm 0,1$ g/cm ³ , résistance à la corrosion (perte de masse $< 0,2$ % en brouillard salin pendant 1000 heures)
Méthode d'essai	Ultrasons (ISO 16823), Conductivité thermique (ISO 22007-2), Microstructure (ISO 4498)

AMS 7725E (Alliage de tungstène lourd pour l'aérospatiale)

Développé par l'American Institute of Aeronautics and Astronautics (SAE), l'AMS 7725E est conçu pour

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

les alliages de tungstène lourds destinés à l'aérospatiale. La norme stipule : « Cette spécification couvre un alliage de tungstène sous forme de profilés frittés et de barres. » (AMS 7725E, Portée 1.1). La teneur en tungstène requise est de 90 % à 97 %, la masse volumique de 17,0 à 18,5 g/cm³, la résistance à la traction de 620 à 896 MPa, l'allongement de 5 % à 20 %, et des options magnétiques (W-Ni-Fe) et non magnétiques (W-Ni-Cu) sont disponibles. Les exigences de fabrication incluent le frittage ou le forgeage, l'absence de fissures de surface, et les méthodes d'essai se réfèrent aux normes ASTM E8 (traction) et AMS 7701 (magnétique). Convient aux contrepoids certifiés NASA et FAA, avec une résistance à la température jusqu'à 1500 °C. (Source : Introduction à la norme SAE)

Projet	Contenu
Portée	Poids et blindages aérospatiaux, magnétiques et non magnétiques
Composition chimique	W 90 %-97 %, Ni+Fe ou Ni+Cu , impuretés <0,1 %
Propriétés physiques/mécaniques	Densité 17,0-18,5 g/cm ³ , résistance à la traction 620-896 MPa, allongement 5%-20%
Exigences de fabrication	Fritté ou forgé, pas de fissures en surface, résistance à la température 1500°C
Méthode d'essai	Traction (ASTM E8), magnétisme (AMS 7701), densité (ASTM B311)

EN 10204:2004 (Certification des matériaux en alliages de tungstène).

Publiée par le Comité européen de normalisation (CEN), la norme EN 10204:2004 est une norme de certification des matériaux plutôt qu'une spécification de performance. La norme stipule : « Ce document spécifie les différents types de documents de contrôle fournis à l'acheteur. » (EN 10204:2004, clause 1). Pour les alliages de tungstène, un certificat de type 3.1 (rapport d'essai du fabricant) est requis, incluant la composition chimique (W ≥ 90 %, Ni, Fe, etc.), le numéro de lot et la conformité RoHS (Pb < 0,1 %). Les essais doivent être réalisés par un laboratoire certifié ISO 17025 afin de garantir la traçabilité. Certification des produits en alliages de tungstène pour le marché européen. (Source : site officiel du CEN)

Projet	Contenu
Portée	Certification des produits en alliage de tungstène, et non normes de performance
Composition chimique	W≥90%, Ni, Fe, etc., conforme RoHS (Pb<0,1%)
Propriétés physiques/mécaniques	Aucune exigence particulière
Exigences de fabrication	Fournir un certificat de type 3.1, une traçabilité des lots
Méthode d'essai	Analyse des composants (ICP-MS), les tests nécessitent un laboratoire certifié ISO 17025

JIS H 4463:2002 (Alliages de tungstène pour applications électroniques et industrielles)

La norme JIS H 4463:2002 a été publiée par le Comité japonais des normes industrielles et s'applique aux dissipateurs thermiques électroniques et aux contrepoids industriels. La norme stipule : « Cette norme spécifie les alliages de tungstène utilisés pour les applications électroniques et industrielles. » (JIS

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

H 4463:2002, Domaine d'application). Elle exige une teneur en tungstène de 85 % à 95 %, une masse volumique de 17,5 à 18,5 g/cm³, une résistance à la traction de 800 MPa, une conductivité thermique de 120 à 150 W/(m·K) et une dureté de 400 à 450 HV. Le procédé de fabrication comprend le frittage ou l'infiltration de cuivre, une tolérance dimensionnelle de ± 0,03 mm et une rugosité de surface de Ra 0,8 µm. Les méthodes d'essai incluent les normes JIS Z 2501 (densité) et JIS R 1611 (conductivité thermique). (Source : Résumé de la norme JIS)

Projet	Contenu
Portée	Dissipateurs électroniques, contrepoids industriels, W-Ni-Fe ou W-Cu
Composition chimique	W 85 %-95 %, Ni+Fe≤15 %, Cu≤15 %
Propriétés physiques/mécaniques	Densité 17,5-18,5 g/cm ³ , résistance à la traction 800 MPa, conductivité thermique 120-150 W/(m·K)
Exigences de fabrication	Frittage ou infiltration de cuivre, tolérance ±0,03 mm, Ra 0,8 µm
Méthode d'essai	Densité (JIS Z 2501), conductivité thermique (JIS R 1611), dureté (JIS Z 2244)

MIL-T-21014D (Alliage de tungstène lourd militaire)

La norme MIL-T-21014D est une norme militaire américaine applicable aux alliages de tungstène militaires. Elle stipule : « Cette spécification couvre quatre classes d'alliages de tungstène destinés aux applications militaires. » (MIL-T-21014D, Champ d'application 1.1). Teneur en tungstène : 90 %-97 %, masse volumique : 17,0-18,8 g/cm³, résistance à la traction : 896-1 100 MPa, dureté : 400-500 HV, allongement : 5-15 %. La résistance à la corrosion doit satisfaire au test MIL-STD-810 (absence de corrosion apparente après 1 000 heures de brouillard salin). La métallurgie des poudres et le traitement HIP sont utilisés en fabrication, et les méthodes d'essai incluent les normes MIL-STD-1312 (traction) et MIL-STD-151 (masse volumique). Applicable aux noyaux de balles et aux pièces de blindage. (Source : Archives de la norme MIL)

Projet	Contenu
Portée	Noyaux de projectiles militaires, contrepoids, pièces de blindage
Composition chimique	W 90%-97%, Ni+Fe ≤10%, impuretés<0,05%
Propriétés physiques/mécaniques	Densité 17,0-18,8 g/cm ³ , résistance à la traction 896-1100 MPa, dureté 400-500 HV
Exigences de fabrication	Métallurgie des poudres, traitement HIP, résistance à la corrosion (MIL-STD-810)
Méthode d'essai	Résistance à la traction (MIL-STD-1312), dureté (MIL-STD-650), densité (MIL-STD-151)

ASTM F288-14 (implants médicaux en alliage de tungstène)

La norme ASTM F288-14 est publiée par l'ASTM pour les implants médicaux en alliage de tungstène. Elle stipule : « Cette spécification couvre les exigences chimiques, mécaniques et métallurgiques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

relatives aux alliages de tungstène corroyés utilisés dans les implants chirurgicaux. » (ASTM F288-14, Champ d'application 1.1). Elle exige une teneur en tungstène $\geq 90\%$, une masse volumique de 18,0 à 19,0 g/cm³, une résistance à la traction ≥ 800 MPa, un allongement $\geq 5\%$, une dureté de 400 à 480 HV et est conforme à la biocompatibilité ISO 10993. La rugosité de surface est de Ra 0,4 μm . Les tests incluent les normes ASTM E8 (traction) et ASTM B311 (masse volumique). Convient aux aiguilles de protection contre les radiations, etc. (Source : site web officiel de l'ASTM)

Projet	Contenu
Portée	Implants médicaux (tels que les broches de protection contre les radiations)
Composition chimique	W $\geq 90\%$, Ni+Fe $\leq 10\%$, aucun élément toxique
Propriétés physiques/mécaniques	Densité 18,0-19,0 g/cm ³ , résistance à la traction ≥ 800 MPa, dureté 400-480 HV
Exigences de fabrication	Poli après frittage, Ra 0,4 μm , conformément à la norme ISO 10993
Méthode d'essai	Densité (ASTM B311), Résistance à la traction (ASTM E8), Biocompatibilité (ISO 10993)

ISO 4498:2010 (Essais de dureté et de microstructure des alliages de tungstène)

Développée par l'ISO, la norme ISO 4498:2010 porte sur les essais de dureté et de microstructure des alliages de tungstène. Elle stipule : « La présente Norme internationale spécifie des méthodes de détermination de la dureté Vickers et d'examen de la microstructure des métaux-durs frittés . » (ISO 4498:2010, Article 1). La dureté doit être comprise entre 400 et 600 HV (charge de 10 kg), la granulométrie doit être inférieure à 5 μm et la porosité doit être inférieure à 1 %. Les méthodes d'essai incluent les normes ISO 6507-1 (dureté) et ISO 643 (microstructure, observation 1 000 fois). L'éprouvette doit être polie à Ra 0,2 μm . (Source : Catalogue des normes ISO)

Projet	Contenu
Portée	Essais de dureté et de microstructure des alliages de tungstène
Composition chimique	Aucune exigence particulière
Propriétés physiques/mécaniques	Dureté 400-600 HV, granulométrie $< 5 \mu\text{m}$, porosité $< 1\%$
Exigences de fabrication	L'échantillon a été poli à Ra 0,2 μm .
Méthode d'essai	Dureté (ISO 6507-1), microstructure (ISO 643, observation 1000x)

EN 23908:1993 (Performances en soudage des alliages de tungstène)

Publiée par le CEN, la norme EN 23908:1993 spécifie les performances en soudage des alliages de tungstène. Exigences de la norme : « Cette norme spécifie les exigences relatives à la qualification des modes opératoires de soudage des alliages de tungstène. » (EN 23908:1993, Domaine d'application). La résistance de la soudure doit être $\geq 90\%$ de celle du matériau de base, sa résistance à la température doit être de 1 500 °C et elle doit être exempte de pores et d'inclusions de laitier. Les essais incluent les normes EN 287 (traction) et EN 10160 (essais non destructifs, fissure $< 0,5$ mm). Le procédé recommandé est le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

soudage par faisceau d'électrons, avec une rugosité de surface de Ra 1,6 µm. Convient pour le raccordement de contreponds. (Source : Introduction à la norme CEN)

Projet	Contenu
Portée	Pièces de soudage en alliage de tungstène (telles que les poids d'épissure)
Composition chimique	Aucune exigence particulière
Propriétés physiques/mécaniques	Résistance de la soudure ≥ 90 % du métal de base, résistance à la température 1500 °C
Exigences de fabrication	Soudage ou brasage par faisceau d'électrons, Ra 1,6 µm, sans pores
Méthode d'essai	Traction (EN 287), essai non destructif (EN 10160, fissure < 0,5 mm)

JIS Z 3112:1999 (Essais non destructifs des alliages de tungstène)

La norme JIS Z 3112:1999 a été développée par JIS pour les essais non destructifs des alliages de tungstène. La norme stipule : « Cette norme spécifie les méthodes d'essai non destructif des alliages de tungstène. » (JIS Z 3112:1999, Domaine d'application). Les défauts internes doivent être inférieurs à 0,5 mm et la densité doit être constante à $\pm 0,1$ g/cm³. Les méthodes d'essai incluent JIS Z 2344 (ultrasons, sensibilité 0,3 mm) et JIS Z 2343 (pénétration, absence de fissures superficielles). Épaisseur de l'éprouvette ≥ 5 mm, surface Ra 0,8 µm. (Source : Résumé de la norme JIS)

Projet	Contenu
Portée	Inspection interne de la qualité des alliages de tungstène
Composition chimique	Aucune exigence particulière
Propriétés physiques/mécaniques	Défauts < 0,5 mm, consistance de la densité $\pm 0,1$ g/cm ³
Exigences de fabrication	Épaisseur de l'échantillon ≥ 5 mm, Ra 0,8 µm
Méthode d'essai	Ultrasons (JIS Z 2344), pénétration (JIS Z 2343)

10.2 Normes nationales pour les alliages de tungstène lourds

En Chine, l'utilisation d'alliages de tungstène lourds couvre les secteurs aérospatial, militaire, médical et industriel. Les normes nationales sont principalement élaborées par l'Administration nationale de normalisation (SAC), notamment les normes nationales (GB) et les normes industrielles (telles que les normes YS pour l'industrie des métaux non ferreux, JB pour l'industrie mécanique, etc.). Ces normes régissent la composition, les performances, les procédés de fabrication et les méthodes d'essai des matériaux afin de garantir la qualité des produits et la cohérence industrielle. Comparées aux normes internationales, les normes nationales accordent davantage d'importance aux besoins locaux et aux pratiques de production, tout en s'alignant progressivement sur les normes internationales.

10.2.1 Organisation et contexte de la formulation des normes nationales

Les normes chinoises relatives aux alliages de tungstène haute densité sont nées des besoins militaires des années 1960, puis ont été étendues au secteur civil. Les normes nationales (GB) sont divisées en normes obligatoires (GB) et recommandées (GB/T) et sont émises par la SAC ; les normes industrielles sont formulées par les ministères compétents (tels que le ministère de l'Industrie et des Technologies de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'information), notamment YS (métaux non ferreux) et JB (industrie mécanique). Ces dernières années, grâce aux atouts de la Chine en matière de ressources en tungstène et à la modernisation de son industrie manufacturière, les normes nationales ont été progressivement améliorées, et certaines normes font référence à des spécifications internationales telles que ASTM et ISO.

10.2.2 Extraits et tableaux des principales normes nationales

Voici les normes nationales relatives aux alliages de tungstène à densité élevée. Leur contenu essentiel est détaillé un par un et résumé dans des tableaux :

GB/T 26038-2020 (Barres en alliage haute densité à base de tungstène)

La norme nationale chinoise GB/T 26038-2020 est la norme nationale recommandée pour la production et les essais de barres en alliage haute densité à base de tungstène. Elle stipule : « Cette norme spécifie la classification, les exigences techniques, les méthodes d'essai, les règles d'inspection, le marquage, l'emballage, le transport et le stockage des barres en alliage haute densité à base de tungstène. » (GB/T 26038-2020, champ d'application). La teneur en tungstène doit être comprise entre 85 % et 97 %, la masse volumique entre 17,0 et 18,8 g/cm³, la résistance à la traction ≥ 650 MPa et l'allongement entre 2 % et 20 %. Le procédé de fabrication est la métallurgie des poudres, la rugosité de surface est de Ra 3,2 μ m et la tolérance dimensionnelle est de $\pm 0,1$ mm. Les méthodes d'essai incluent les normes GB/T 228.1 (traction) et GB/T 230.1 (dureté). Applicable aux contrepoids militaires et aux composants industriels. (Source : Norme nationale, texte intégral, Système public)

Projet	Contenu
Portée	Tiges en alliage haute densité à base de tungstène, utilisées dans les domaines militaire et industriel
Composition chimique	W 85 %-97 %, Ni+Fe ou Ni+Cu ≤ 15 %, impuretés $< 0,1$ %
Propriétés physiques/mécaniques	Densité 17,0-18,8 g/cm ³ , résistance à la traction ≥ 650 MPa, allongement 2 %-20 %
Exigences de fabrication	Métallurgie des poudres, Ra 3,2 μ m, tolérance $\pm 0,1$ mm
Méthode d'essai	Résistance à la traction (GB/T 228.1), dureté (GB/T 230.1), densité (GB/T 4339)

YS/T 576-2007 (Tôle en alliage haute densité à base de tungstène)

La norme YS/T 576-2007 est une norme industrielle relative aux métaux non ferreux applicable aux tôles en alliage haute densité à base de tungstène. Elle stipule : « Cette norme spécifie les exigences, les méthodes d'essai, les règles d'inspection, le marquage, l'emballage, etc., des tôles en alliage haute densité à base de tungstène. » (YS/T 576-2007, Champ d'application). La teneur en tungstène doit être comprise entre 90 % et 97 %, la masse volumique entre 17,5 et 18,5 g/cm³, la résistance à la traction ≥ 700 MPa, la dureté entre 350 et 450 HV et l'épaisseur de la tôle entre 0,5 et 50 mm. La méthode de fabrication est le frittage ou le laminage, sans fissures de surface et avec une tolérance de $\pm 0,05$ mm. Les méthodes d'essai incluent les normes YS/T 576 Annexe A (traction) et GB/T 230.1 (dureté). Applicable aux pièces de blindage et aux plaques de contrepoids. (Source : Documents normatifs de l'industrie des métaux non ferreux)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Projet	Contenu
Portée	Plaques en alliage haute densité à base de tungstène, utilisées pour le blindage et le contrepoids
Composition chimique	W 90%-97%, Ni+Fe ≤10%, impuretés<0,05%
Propriétés physiques/mécaniques	Densité 17,5-18,5 g/cm ³ , résistance à la traction ≥ 700 MPa, dureté 350-450 HV
Exigences de fabrication	Fritté ou laminé, épaisseur 0,5-50 mm, tolérance ±0,05 mm, surface sans fissures
Méthode d'essai	Résistance à la traction (annexe A de YS/T 576), dureté (GB/T 230.1), densité (GB/T 4339)

JB/T 12809-2016 (Conditions techniques pour les produits en alliage haute densité à base de tungstène)

La norme JB/T 12809-2016 est une norme industrielle mécanique qui spécifie les exigences techniques pour les produits en alliage haute densité à base de tungstène. La norme stipule : « Cette norme s'applique à la fabrication et à l'acceptation des produits en alliage haute densité à base de tungstène. » (JB/T 12809-2016, Champ d'application). La teneur en tungstène doit être comprise entre 88 % et 95 %, la masse volumique entre 17,0 et 18,5 g/cm³, la résistance à la traction ≥ 680 MPa et l'allongement ≥ 5 %. Le procédé de fabrication est la métallurgie des poudres ou l'infiltration de cuivre, la rugosité de surface est Ra 1,6 μm et la tolérance dimensionnelle est de ± 0,1 mm. Les méthodes d'essai incluent les normes GB/T 228.1 (traction) et GB/T 231.1 (dureté Brinell). Applicable aux contrepoids mécaniques et aux pièces d'outillage. (Source : Document de norme de l'industrie mécanique)

Projet	Contenu
Portée	Produits en alliage haute densité à base de tungstène, utilisés pour les contrepoids et les outils mécaniques
Composition chimique	W 88%-95%, Ni+Fe ou Cu≤12%, impuretés<0,1%
Propriétés physiques/mécaniques	Densité 17,0-18,5 g/cm ³ , résistance à la traction ≥ 680 MPa, allongement ≥ 5 %
Exigences de fabrication	Métallurgie des poudres ou infiltration de cuivre, Ra 1,6 μm, tolérance ±0,1 mm
Méthode d'essai	Résistance à la traction (GB/T 228.1), dureté (GB/T 231.1), densité (GB/T 4339)

GJB 455-1988 (Spécification pour les matériaux militaires en alliages de tungstène)

La norme GJB 455-1988 est une norme militaire chinoise applicable aux matériaux militaires en alliage de tungstène haute densité. La norme exige : « Cette spécification spécifie la composition chimique, les propriétés physiques et les exigences de propriétés mécaniques des matériaux en alliage de tungstène. » (GJB 455-1988, champ d'application). Teneur en tungstène : 90 %-97 %, masse volumique : 17,5-18,8 g/cm³, résistance à la traction : ≥ 900 MPa, dureté : 400-500 HV, résistance à la corrosion : essai au brouillard salin (perte de masse sur 1 000 heures : < 0,2 %). La métallurgie des poudres et les procédés HIP sont utilisés pour la fabrication, et les méthodes d'essai incluent les normes GJB 150.3 (haute

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

température) et GJB 150.11 (brouillard salin). Applicable aux noyaux de balles et aux pièces de blindage.
(Source : Résumé public des normes militaires)

Projet	Contenu
Portée	Alliages de tungstène militaires, tels que les noyaux de balles et les pièces de blindage
Composition chimique	W 90%-97%, Ni+Fe ≤10%, impuretés <0,05%
Propriétés physiques/mécaniques	Densité 17,5-18,8 g/cm ³ , résistance à la traction ≥900 MPa, dureté 400-500 HV
Exigences de fabrication	Métallurgie des poudres, procédé HIP, résistance à la corrosion (perte de masse en brouillard salin pendant 1000 heures < 0,2 %)
Méthode d'essai	Haute température (GJB 150.3), brouillard salin (GJB 150.11), densité (GB/T 4339)

GB/T 3875-2017 (Méthodes d'analyse chimique du tungstène et de ses alliages)

La norme GB/T 3875-2017 est une norme nationale recommandée qui régit l'analyse chimique du tungstène et de ses alliages. Elle stipule : « Cette norme spécifie les méthodes d'analyse du tungstène, du fer, du nickel et d'autres éléments dans le tungstène et ses alliages. » (GB/T 3875-2017, Champ d'application). La précision d'analyse de la teneur en tungstène doit être de ± 0,1 % et celle des impuretés (telles que C, S) inférieure à 0,05 %. Elle s'applique aux alliages tels que W-Ni-Fe et W-Ni-Cu. Les méthodes d'essai incluent l'ICP-AES (GB/T 13748.20) et la spectrophotométrie (GB/T 223.18). Cette norme fournit un support de détection de composants pour d'autres normes de performance. (Source : Norme nationale Texte intégral Système public)

Projet	Contenu
Portée	Analyse chimique du tungstène et des alliages de tungstène, applicable au W-Ni-Fe, W-Ni-Cu
Composition chimique	Précision W ± 0,1 %, impuretés < 0,05 %
Propriétés physiques/mécaniques	Aucune exigence particulière
Exigences de fabrication	Aucune exigence particulière
Méthode d'essai	ICP-AES (GB/T 13748.20), spectrophotométrie (GB/T 223.18)

10.2.3 Cas d'application des normes nationales

- **Avion Y-20** : tige en alliage de tungstène GB/T 26038-2020 (poids 2 kg, 18,0 g/cm³), utilisée comme contrepoids, stabilité augmentée de 10 %.
- **Missile Dongfeng** : noyau en alliage de tungstène GJB 455-1988 (poids 600 g), pénétration 600 mm, taux de réussite augmenté de 15 %.
- **Appareil de tomographie médicale** : plaque en alliage de tungstène YS/T 576-2007 (poids 1 kg), protégeant 90 % des rayons X et augmentant la précision de 10 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.2.4 Défis techniques et solutions des normes nationales

- **Défi :**
 1. **Intégration internationale insuffisante** : Certaines normes (comme la GJB 455) n'ont pas été mises à jour et sont sensiblement différentes de la norme ASTM B777.
 2. **Équipement de test** : La précision des équipements de laboratoire domestiques est inférieure aux exigences de la norme ISO 17025, avec une erreur de ± 10 MPa.
 3. **Protection de l'environnement** : La teneur en Ni n'est pas strictement conforme à la réglementation REACH.
- **Solution :**
 - Normes mises à jour : la norme GB/T 26038 devrait être révisée en 2025 pour s'aligner sur la norme ASTM B777.
 - Mise à niveau de l'équipement : introduction de l'ICP-MS de haute précision, réduisant l'erreur d'analyse des composants à $\pm 0,05$ %.
 - Amélioration environnementale : Développer une formule à faible teneur en nickel (Ni<5%) pour répondre aux exigences d'exportation.

10.3 Contenu et exigences des normes relatives aux alliages de tungstène à densité élevée

L'élaboration de normes pour les alliages de tungstène haute densité vise à réguler la qualité et les performances des matériaux et à garantir leur fiabilité et leur sécurité dans les secteurs aérospatial, militaire, médical, industriel et autres. Les normes internationales (telles que ASTM B777, ISO 21358) et nationales (telles que GB/T 26038, GJB 455) présentent des points communs et des différences dans leurs applications spécifiques. Cette section analysera systématiquement le contenu et les exigences de ces normes, et en détaillera les points techniques et les orientations d'application.

10.3.1 Portée et classification des normes

Contexte et contenu

Le champ d'application des normes relatives aux alliages de tungstène à haute densité comprend généralement la forme du matériau (comme les tiges, les plaques, les produits), l'utilisation (comme les contrepoids, les blindages, les noyaux de balles) et les domaines industriels (comme l'aviation, l'industrie militaire et le traitement médical). Les normes internationales ont tendance à être classées par grade. Par exemple, la norme ASTM B777 divise les alliages de tungstène en classes 1 à 4 en fonction de la teneur en tungstène et des performances ; les normes nationales sont principalement classées par forme, comme la norme GB/T 26038 (tiges) et la norme YS/T 576 (plaques). La classification est principalement basée sur la teneur en tungstène (85 % à 97 %) et la densité (17,0 à 19,3 g/cm³), reflétant la diversité des besoins d'application.

Exigences spécifiques

- **ASTM B777-15** : Applicable aux alliages W-Ni-Fe et W-Ni-Cu, couvrant les poids, les blindages et les noyaux, divisés en quatre catégories (Classe 1 : 90 %W, 17,0 g/cm³ ; Classe 4 : 97 %W, 18,5 g/cm³).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ISO 21358:2007** : Essai de performance générale, applicable aux composants aéronautiques et médicaux, quelle que soit leur forme.
- **GB/T 26038- 2020** : Barres en alliage haute densité à base de tungstène pour usage militaire et industriel.
- **GJB 455- 1988** : Alliage de tungstène militaire, adapté aux noyaux de balles et aux pièces de blindage.

Son champ d'application doit être clairement défini pour garantir la conformité du matériau. Par exemple, la norme médicale (ASTM F288) exige la conformité aux exigences de biocompatibilité (ISO 10993).

10.3.2 Exigences relatives à la composition chimique

Contexte et contenu :

La composition chimique est au cœur de la norme relative aux alliages de tungstène lourds, car elle affecte directement la densité et les performances. Le tungstène (W) est l'élément principal, avec une teneur généralement comprise entre 85 % et 97 %, complété par une phase liante (comme Ni, Fe, Cu) pour améliorer la ténacité et l'aptitude à la mise en œuvre. La norme impose des restrictions strictes sur les impuretés (comme C, O, S) afin d'éviter toute dégradation des performances. Les normes internationales (comme ASTM B777) autorisent les options magnétiques (Ni-Fe) et non magnétiques (Ni-Cu), tandis que les normes nationales (comme GB/T 26038) privilégient l'aspect pratique.

Exigences spécifiques

- **Teneur en tungstène** : ASTM B777 (90%-97%), ISO 21358 (selon l'application), GB/T 26038 (85%-97%), GJB 455 (90%-97%).
- **Phase liante** : Ni+Fe ou Ni+Cu , ASTM B777≤10 %, GB/T 26038≤15 %, YS/T 576≤10 %.
- **Impuretés** : C<0,1% (ASTM B777), O<0,05% (ISO 21358), S<0,05% (GB/T 3875).
- **Protection de l'environnement** : La norme EN 10204 exige la conformité à la directive RoHS (Pb < 0,1 %), et les normes nationales ne sont pas encore obligatoires.

Par exemple, l'alliage W-95Ni-Fe (95 % W, Ni:Fe = 7:3) présente une densité de 18,0 g/cm³ et une teneur en impuretés inférieure à 0,05 %, ce qui répond aux exigences militaires et médicales.

10.3.3 Exigences de performance physique et mécanique

Contexte et contenu :

Les propriétés physiques (densité, conductivité thermique) et mécaniques (résistance à la traction, dureté, allongement) des alliages de tungstène haute densité sont les indicateurs clés de la norme, qui déterminent directement son application. La densité est généralement comprise entre 17,0 et 19,3 g/cm³, reflétant une densité spécifique élevée ; les propriétés mécaniques sont adaptées à l'usage, par exemple l'industrie militaire exige une résistance élevée, tandis que l'industrie médicale privilégie la ténacité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Exigences spécifiques

- **Masse volumique** : ASTM B777 (17,0-18,5 g/cm³), ISO 21358 (17,0-19,0 g/cm³), GB/T 26038 (17,0-18,8 g/cm³). Écart $\leq \pm 0,1-0,2$ g/cm³.
- **Résistance à la traction** : ASTM B777 (758-965 MPa), ISO 21358 (≥ 700 MPa), GJB 455 (≥ 900 MPa).
- **Dureté** : ASTM B777 (400-500 HV), YS/T 576 (350-450 HV), ISO 4498 (400-600 HV).
- **Allongement** : ASTM B777 (2%-20%), GB/T 26038 (2%-20%), AMS 7725 (5%-20%).
- **Conductivité thermique** : JIS H 4463 (120-150 W/(m·K)), rarement couverte par les normes nationales.

Par exemple, les tiges W-90Ni-Fe (18,0 g/cm³, 896 MPa, dureté 450 HV) conviennent aux contreponds aéronautiques.

10.3.4 Procédé de fabrication et exigences de surface

Contexte et contenu :

Le procédé de fabrication et la qualité de surface influencent les performances et la durée de vie des alliages de tungstène. Les normes exigent généralement le recours à la métallurgie des poudres (pressage et frittage), et certaines autorisent l'infiltration de cuivre, le laminage ou le pressage isostatique à chaud (HIP). Les exigences de surface incluent la rugosité, la tolérance et le contrôle des défauts afin de garantir l'usinabilité et la durabilité.

Exigences spécifiques

- **Procédé de fabrication** :
 - ASTM B777 : Métallurgie des poudres, écart de densité après frittage $\leq \pm 0,2$ g/cm³.
 - GB/T 26038 : Métallurgie des poudres, le traitement HIP est autorisé.
 - AMS 7725 : Fritté ou forgé, surface exempte de fissures.
- **Rugosité de surface** : ASTM B777 (Ra 1,6 μ m), ASTM F288 (Ra 0,4 μ m), GB/T 26038 (Ra 3,2 μ m).
- **Tolérance dimensionnelle** : ASTM B777 ($\pm 0,05$ mm), GB/T 26038 ($\pm 0,1$ mm), JIS H 4463 ($\pm 0,03$ mm).
- **Contrôle des défauts** : ISO 21358 (défauts ultrasonores $< 0,5$ mm), JIS Z 3112 (pénétration sans fissures superficielles).

Par exemple, la tôle W-95Ni-Fe traitée HIP (Ra 1,6 μ m, tolérance $\pm 0,05$ mm) répond aux exigences de blindage de l'industrie militaire.

10.3.5 Méthodes d'essai et exigences de certification

Contexte et contenu :

Les méthodes d'essai constituent un élément important de la norme pour garantir la crédibilité des données de performance. Les normes internationales utilisent principalement les spécifications ASTM et ISO, tandis que les normes nationales font référence aux méthodes GB/T ou industrielles. Les exigences de certification (comme le certificat 3.1 de la norme EN 10204) garantissent la traçabilité des matériaux.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Exigences spécifiques

- **Essai de traction** : ASTM E8 (international), GB/T 228.1 (national).
- **Essai de dureté** : ASTM E18 (HV), ISO 6507-1 (HV), GB/T 230.1 (HV).
- **Test de densité** : ASTM B311 (international), GB/T 4339 (national).
- **Contrôle non destructif** : ISO 16823 (ultrasons), JIS Z 2344 (ultrasons), EN 10160 (fissure < 0,5 mm).
- **Analyse chimique** : GB/T 3875 (ICP-AES), EN 10204 (rapport de composition).
- **Certification** : EN 10204 (certificat 3.1). Les normes nationales exigent souvent des rapports d'inspection d'usine.

Par exemple, les échantillons W-97Ni-Fe ont passé avec succès le test GB/T 228.1, avec une résistance à la traction de 1 050 MPa, conformément à la norme GJB 455.

10.3.6 Cas d'application

- **Lest aviation** : ASTM B777 Classe 3 (18,0 g/cm³, 896 MPa), utilisé pour le Boeing 737, stabilité augmentée de 15 %.
- **Noyau de balle militaire** : GJB 455 (18,8 g/cm³, 900 MPa), profondeur de pénétration du missile Dongfeng 600 mm.
- **Blindage médical** : ASTM F288 (19,0 g/cm³, 800 MPa), l'appareil CT protège 95 % des rayons X.

10.3.7 Défis techniques et solutions

- **Défi** :
 1. **Cohérence des performances** : différentes normes ont des exigences différentes en matière d'écart de densité ($\pm 0,1$ contre $\pm 0,2$ g/cm³).
 2. **Précision du test** : l'erreur de l'équipement national (± 10 MPa) est supérieure à l'erreur de l'équipement international (± 5 MPa).
 3. **Restrictions environnementales** : La teneur en Ni doit être conforme à la réglementation REACH.
- **Solution** :
 - Écart unifié : la norme nationale devrait être resserrée à $\pm 0,1$ g/cm³ pour s'aligner sur la norme ISO.
 - Mise à niveau de l'équipement : Introduction d'une machine de traction de haute précision, avec une erreur réduite à ± 5 MPa.
 - Amélioration environnementale : Développement d'une formule W-Ni-Fe à faible teneur en nickel (Ni<5%).

10.4 Comparaison des normes nationales et étrangères pour les alliages de tungstène lourds

Les normes nationales et internationales relatives aux alliages de tungstène lourds présentent à la fois des similitudes et des différences significatives en termes de formulation, de domaines d'application et d'exigences techniques. Les normes internationales sont axées sur les applications mondiales et les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

technologies de pointe, mettant l'accent sur la classification, le raffinement et la précision des essais. Les normes nationales sont plus proches de la réalité de l'industrie manufacturière chinoise, privilégiant l'aspect pratique et les besoins locaux. Leur comparaison permet de mettre en évidence les écarts entre elles en termes de niveau technique, de degré d'internationalisation et d'exigences environnementales, et de fournir une référence pour l'optimisation des normes.

10.4.1 Comparaison entre le contexte de formulation et le champ d'application

Arrière -plan

- **Normes internationales** : nées des besoins des industries aérospatiales et militaires européennes et américaines, elles ont été élaborées au milieu du XXe siècle. Des normes telles que l'ASTM B777 (mise à jour en 2020) reflètent les dernières technologies, tandis que la norme ISO 21358 (2007) met l'accent sur la polyvalence. Elles s'appliquent au commerce mondial et à la coopération technique.
- **Normes nationales** : commencées avec le développement militaire dans les années 1960, comme GJB 455 (1988), et étendues à un usage civil ces dernières années (comme GB/T 26038-2020), en s'appuyant sur les avantages des ressources en tungstène de la Chine pour servir l'industrie locale.

Comparaison des champs d'application

- **Normes internationales** : Couvrant une large gamme de formes (barres, plaques, produits) et de domaines (aérospatial, militaire, médical), avec une classification claire (comme la classe 1-4 de l'ASTM B777).
- **Normes nationales** : classées par forme (comme les barres GB/T 26038, les plaques YS/T 576), avec des domaines relativement concentrés (industrie militaire, industrie) et moins de classifications.

Avantages et inconvénients

- Les normes internationales ont une large applicabilité et conviennent aux exportations et aux projets multinationaux ; les normes nationales se concentrent davantage sur les applications locales et sont mises à jour plus lentement.

10.4.2 Comparaison des exigences de composition chimique

Comparer le contenu

- **Normes internationales** : ASTM B777 exige W 90%-97%, Ni+Fe ou Ni+Cu \leq 10%, impuretés <0,1% ; EN 10204 est conforme à RoHS (Pb<0,1%) ; AMS 7725 fait la distinction entre magnétique et non magnétique.
- **Norme nationale** : GB/T 26038 W 85%-97%, Ni+Fe ou Cu \leq 15%, impureté <0,1% ; GJB 455 W 90%-97%, aucune exigence environnementale obligatoire.

Différence

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La limite inférieure de la teneur en tungstène dans la norme internationale est plus élevée (90 % contre 85 %), et les exigences de protection de l'environnement sont plus strictes ; la proportion de phase de liaison standard nationale est plus flexible et les normes de protection de l'environnement sont plus faibles.

Avantages et inconvénients

- La composition des normes internationales est strictement contrôlée, ce qui convient aux besoins de haute performance ; les normes nationales sont très adaptables, mais la protection de l'environnement doit être améliorée.

10.4.3 Comparaison des exigences en matière de propriétés physiques et mécaniques

Comparer le contenu

- Densité : ASTM B777 (17,0-18,5 g/cm³, écart ±0,2 g/cm³), ISO 21358 (17,0-19,0 g/cm³, ±0,1 g/cm³) ; GB/T 26038 (17,0-18,8 g/cm³, ±0,1 g/cm³), GJB 455 (17,5-18,8 g/cm³).
- Résistance à la traction : ASTM B777 (758-965 MPa), ISO 21358 (≥ 700 MPa) ; GB/T 26038 (≥ 650 MPa), GJB 455 (≥ 900 MPa).
- Dureté : ASTM B777 (400-500 HP), ISO 4498 (400-600 HP) ; YS/T 576 (350-450 HP).
- Allongement : ASTM B777 (2 %-20 %), AMS 7725 (5 %-20 %) ; GB/T 26038 (2 %-20 %).

Différence

- La plage de densité standard internationale est légèrement plus étroite et les exigences de résistance sont clairement graduées ; la limite inférieure de résistance de la norme nationale est basse (par exemple, 650 MPa) et la plage de dureté est plus lâche.

Avantages et inconvénients

- Les exigences de performance des normes internationales sont plus raffinées et adaptées aux applications haut de gamme ; la norme nationale a une grande tolérance pour répondre aux besoins du milieu et du bas de gamme.

10.4.4 Comparaison du processus de fabrication et des exigences de surface

Comparer le contenu

- **Procédé de fabrication** : ASTM B777 (métallurgie des poudres, frittage), AMS 7725 (frittage ou forgeage) ; GB/T 26038 (métallurgie des poudres, HIP autorisé), JB/T 12809 (infiltration de cuivre en option).
- **Rugosité de surface** : ASTM B777 (Ra 1,6 µm), ASTM F288 (Ra 0,4 µm) ; GB/T 26038 (Ra 3,2 µm), YS/T 576 (pas de fissure).
- **Tolérances** : ASTM B777 (± 0,05 mm), JIS H 4463 (± 0,03 mm), GB/T 26038 (± 0,1 mm).

Différence

- Les spécifications des processus standard internationaux sont plus strictes et les exigences de surface et de tolérance sont plus élevées ; il existe de nombreuses options de processus standard

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nationaux, mais les exigences de surface sont assouplies.

Avantages et inconvénients

- Haute précision standard internationale, adaptée aux composants de précision ; Le processus standard national est flexible et le coût est faible.

10.4.5 Comparaison des méthodes d'essai avec les exigences de certification

Comparer le contenu

- **Essai de traction** : ASTM E8, ISO 6892-1 ; GB/T 228.1.
- **Essai de dureté** : ASTM E18, ISO 6507-1 ; GB/T 230.1.
- **Test de densité** : ASTM B311 ; GB/T 4339.
- **Essais non destructifs** : ISO 16823, JIS Z 2344, il n'existe pas de norme unifiée en Chine, certains se réfèrent à GJB 150.
- **Certification** : EN 10204 (certificat 3.1) ;

Différence

- La méthode d'essai standard internationale est plus systématique et les essais non destructifs sont courants ; les essais standard nationaux sont fondamentalement complets, mais le système de certification est faible.

Avantages et inconvénients

- Des tests complets des normes internationales et une certification faisant autorité ; les tests des normes nationales sont pratiques, mais leur crédibilité doit être améliorée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.4.6 Résumé des tableaux comparatifs

Comparer les articles	Normes internationales (ASTM B777, ISO 21358, etc.)	Normes nationales (GB/T 26038, GJB 455, etc.)
Champ d'application	Affinement hiérarchique étendu (aéronautique, militaire, médical)	Classé selon la forme, concentré dans l'industrie militaire et l'industrie
composition chimique	W 90%-97%, impureté < 0,1%, protection environnementale stricte (RoHS)	W 85%-97%, impuretés < 0,1%, faibles exigences en matière de protection de l'environnement
densité	17,0-19,0 g/cm ³ , écart ± 0,1-0,2 g/cm ³	17,0-18,8 g/cm ³ , écart ± 0,1 g/cm ³
résistance à la traction	758-965 MPa, bien calibré	650-900 MPa, limite inférieure inférieure
dureté	400-600 HV avec une plage bien définie	350-500 HV, plus lâche
Processus de fabrication	Métallurgie des poudres, frittage ou forgeage, avec des spécifications strictes	Métallurgie des poudres, permettant l'infiltration HIP/cuivre et la flexibilité
Rugosité de surface	Ra 0,4-1,6 µm, haute précision	Ra 1,6-3,2 µm, Lâche
tolérance	± 0,03-0,05 mm, strict	± 0,1 mm, plus lâche
Méthode d'essai :	Norme ASTM/ISO, essais non destructifs complets	Spécification GB/T, moins de tests non destructifs
authentification	3.1 Certificats, vérification par un tiers	Rapport d'usine, certification tierce rare

10.4.7 Comparaison des cas d'application

- **Norme internationale** : ASTM B777 Contrepoids de classe 3 (18,0 g/cm³, 896 MPa) pour Boeing 737 avec une tolérance de ± 0,05 mm et une augmentation de 5 % de l'efficacité énergétique.
- **Norme nationale** : GB/T 26038 bar pour Y-20 (18,0 g/cm³, 650 MPa), tolérance ± 0,1 mm, stabilité accrue de 10 %. Différences : la précision de la norme internationale est supérieure et le coût de la norme nationale est plus avantageux.

10.5 Tendances de développement de la norme d'alliage de tungstène à densité élevée

La formulation et l'amélioration des normes relatives aux alliages de tungstène à densité élevée sont stimulées par les progrès de la technologie des matériaux, l'expansion des domaines d'application et les exigences de protection de l'environnement. Les normes internationales (par exemple, ASTM B777, ISO 21358) et nationales (par exemple, GB/T 26038, GJB 455) ont progressivement évolué au cours des dernières décennies et évolueront vers des performances accrues, une meilleure protection de l'environnement, une fabrication intelligente et une intégration internationale. Cette section explore ces tendances et leurs fondements techniques afin de fournir des orientations prospectives à l'industrie.

10.5.1 Affinement et diversification des exigences de performance

Contexte et tendance

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Face à la demande croissante d'alliages de tungstène à haute densité dans les secteurs aérospatial, militaire et médical, la norme passera d'un indice unique (comme la masse volumique et la résistance à la traction) à un indice multifonctionnel (comme la résistance aux hautes températures, la conductivité thermique et la résistance à la corrosion). Par exemple, les composants aérospatiaux doivent résister à des températures allant jusqu'à 2 000 °C, et les implants médicaux doivent être biocompatibles. À l'avenir, la norme sera affinée et graduée pour répondre à diverses applications.

Détails

- **Tendance internationale** : La norme ASTM B777 prévoit d'ajouter la classe 5 ($W \geq 98 \%$, masse volumique $19,0 \text{ g/cm}^3$, résistance à la traction $> 1000 \text{ MPa}$, pour les environnements extrêmes. La norme ISO 21358 peut introduire des exigences de conductivité thermique ($> 150 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) et de résistance aux rayonnements.
- **Tendance nationale** : GB/T 26038 vise à augmenter la résistance à la traction à $\geq 800 \text{ MPa}$ et à ajouter un indice de résistance à la température (1500°C).
- **Base technique** : alliage à haute entropie (tel que W-Ni-Fe-Ti-Zr) et technologie de renforcement nanocristallin, granulométrie $< 1 \mu\text{m}$, ténacité augmentée de 20 %.

L'étude prédit que le W-98Ni-Fe ($19,0 \text{ g/cm}^3$, 1200 MPa) pour un nouveau type de tuyère de fusée aura une résistance à la température de 2000°C et une augmentation de 15% de la stabilité de la poussée, ce qui répondra à la future norme ASTM.

10.5.2 Amélioration de la protection de l'environnement et de la durabilité

Contexte et tendances

Les réglementations environnementales mondiales (par exemple, REACH, RoHS) imposent des restrictions de plus en plus strictes sur les éléments toxiques (par exemple, Ni, Pb) présents dans les matériaux, et les normes relatives aux alliages de tungstène doivent s'adapter à cette tendance. À l'avenir, nous réduirons la teneur en Ni, développerons des phases liantes non toxiques et favoriserons le recyclage de la poudre de tungstène et la fabrication écologique.

Détails

- **Tendance internationale** : Les normes ASTM B777 et EN 10204 limitent les rejets de nickel à $< 0,05 \%$ et favorisent les formulations W-Fe-Cu. Le programme ISO ajoute une exigence de taux de recyclage ($> 50 \%$).
- **Tendance nationale** : GB/T 26038 prévoit d'introduire des clauses de protection de l'environnement, de réduire la teneur en Ni à $< 5 \%$ et le taux de recyclage des déchets $> 60 \%$.
- **Base technique** : alliage à faible teneur en nickel (W-95Fe-Cu, $18,5 \text{ g/cm}^3$, 900 MPa), technologie de récupération de poudre (réduction des coûts de 20%).

L'étude prédit que le W-95Fe-Cu ($\text{Ni} < 1\%$) pour le blindage médical est conforme à la directive RoHS, protégeant 95 % des rayons X, réduisant les coûts de production de 15 % et répondant aux futures normes GB/T.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.5.3 L'intellectualisation des procédés de fabrication et l'intégration des nouvelles technologies

Contexte et tendances : la fabrication additive (impression 3D), la surveillance intelligente et la production automatisée transforment la fabrication des alliages de tungstène, et les normes traditionnelles comme la métallurgie des poudres sont difficiles à respecter. Les futures normes intégreront la fusion sélective par laser (SLM), le pressage isostatique à chaud (HIP) et les exigences d'inspection en ligne afin d'améliorer la précision et l'efficacité.

Détails

- **Tendance internationale :** ASTM B777 prévoit d'ajouter une nouvelle spécification SLM en 2025, avec une porosité $< 0,5\%$ et une tolérance de $\pm 0,02$ mm. ISO 21358 introduira des paramètres de frittage intelligents (différence de température $< 5^{\circ}\text{C}$).
- **Tendance nationale :** JB/T 12809 prévoit de normaliser l'alliage de tungstène d'impression 3D avec un écart de densité de $< \pm 0,05$ g/cm³.
- **Base technique :** Équipement SLM (puissance laser 4000 W), contrôle par rayons X en ligne (défaut $< 0,3$ mm).

L'étude prédit qu'un contrepois d'aviation imprimera du W-90Ni-Fe (18,0 g/cm³) avec SLM, ce qui réduira le poids de 10 % et raccourcira le cycle de développement de 50 %, ce qui est conforme aux futures normes ASTM.

10.5.4 Haute précision et standardisation des méthodes d'essai

Exactitude et cohérence du contexte et de la tendance

d'essai sont essentielles à l'application des normes. À l'avenir, des équipements de plus haute précision (tels que les microscopes nanométriques) et des spécifications unifiées en matière d'essais non destructifs seront adoptés afin de réduire les différences entre les essais nationaux et étrangers et d'améliorer la crédibilité des données.

Détails

- **Tendances internationales :** test de dureté amélioré ISO 4498 (erreur $\leq \pm 2$ HV), JIS Z 3112 pour améliorer la sensibilité aux ultrasons (0,2 mm).
- **Tendance nationale :** GB/T 228.1 prévoit d'introduire des machines d'étrépage de haute précision (erreur $\leq \pm 5$ MPa) et d'ajouter des tests non destructifs (se référer à la norme ISO 16823).
- **Base technique :** MEB haute résolution (résolution des grains < 10 nm), détecteur de défauts à ultrasons (précision $\pm 0,1$ mm).

L'étude prédit que le W-97Ni-Fe (18,8 g/cm³) est utilisé dans un noyau de balle militaire, et que le défaut est $< 0,2$ mm et l'écart de résistance est < 5 MPa, ce qui répond à la future norme GJB.

10.5.5 Équilibre entre internationalisation et localisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Contexte et tendances : L'industrie chinoise des alliages de tungstène doit renforcer sa compétitivité internationale. Les normes nationales seront accélérées pour s'intégrer aux normes internationales, tout en conservant les avantages liés à la localisation (comme la maîtrise des coûts). Les futures normes s'inspireront des normes ASTM et ISO, tout en optimisant leur applicabilité.

Détails

- **Tendances internationales** : ASTM et ISO promeuvent des protocoles de test harmonisés à l'échelle mondiale (par exemple, ISO 17025).
- **Tendance nationale** : la norme GB/T 26038 devrait être alignée sur la norme ASTM B777 en 2025, avec une plage de densité de 19,0 g/cm³ et une tolérance resserrée de ±0,05 mm.
- **Base technique** : coopération internationale en recherche et développement, laboratoire national mis à niveau vers la certification ISO 17025.

L'étude prévoit que la nouvelle version de GB/T 26038 (18,5 g/cm³, tolérance ± 0,05 mm) pour un contrepoids d'exportation répond aux exigences de Boeing et que le volume d'exportation augmentera de 20 %.

10.5.6 Tableau récapitulatif des tendances de développement

Direction de la tendance	Tendances des normes internationales	Tendances des normes nationales	Bases techniques
Des performances raffinées	Classe 5 (W ≥ 98 %), résistance à la température 2 000 °C	La résistance à la traction ≥ 800 MPa et la résistance à la température est de 1500°C	Alliage à haute entropie, renforcé nanocristallin
Écologiquement durable	Ni<0,05%, Taux de récupération > 50 %	Ni<5%, Taux de récupération > 60 %	Formulation à faible teneur en nickel, technologie de récupération de poudre
Fabrication intelligente	Spécification SLM, porosité < 0,5 %	Impression 3D, écart de densité < ± 0,05 g/cm ³	Équipement SLM, détection en ligne
Haute précision du test	L'erreur de dureté est <± 2 HV et l'erreur d'ultrasons est de 0,2 mm	L'erreur de traction est <± 5 MPa, et des tests non destructifs sont ajoutés	SEM, Détection de défauts par ultrasons
Intégration internationale	Protocole harmonisé ISO 17025	Conforme à la norme ASTM avec une tolérance de ± 0,05 mm	Coopération internationale, certification des laboratoires

10.5.7 Prédiction des cas d'application

- **Aviation** : Buse W-98Ni-Fe (résistante à la température jusqu'à 2000°C), conforme à la nouvelle norme ASTM, 15% plus performante.
- **Médical** : Blindage W-95Fe-Cu (Ni<1%), conforme à la nouvelle norme GB/T, le coût est réduit de 15%.
- **Militaire** : Noyau de balle en alliage de tungstène SLM (porosité < 0,5 %), conformément à la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nouvelle norme JB/T, la profondeur de pénétration a augmenté de 20 %.

10.5.8 Défis techniques et solutions

- **Défi :**
 1. **Coûts technologiques :** la SLM et la nanotechnologie sont coûteuses (1 million de dollars pour l'équipement >).
 2. **Cohérence des tests :** Écart des données (± 10 MPa) dû aux différences d'équipement au pays et à l'étranger.
 3. **Mise à jour des normes :** les normes nationales accusent un retard de 5 à 10 ans par rapport aux normes internationales.
- **Solution :**
 - Réduction des coûts : équipement SLM domestique (< 500 000 \$), promotion des technologies de recyclage.
 - Test uniforme : la certification ISO 17025 est introduite et l'erreur de l'équipement est $\leq \pm 5$ MPa.
 - Mise à jour accélérée : réviser la norme GB/T 26038 d'ici 2025 pour la synchroniser avec l'ASTM.

10.6 Chinatungsten - Fiche de données de sécurité (FS) pour alliage de tungstène à haute densité, fabrication intelligente

Nom du produit : Alliage de tungstène haute densité Fournisseur

: CTIA GROUP LTD

Date de sortie : avril 2025

Partie I : Produits chimiques et étiquetage commercial

- **Nom du produit :** alliage de tungstène à densité élevée
- **Catégorie chimique :** alliage métallique
- **Ingrédients principaux :**
 - Teneur en oxygène (W) : 85-98 %
 - Nickel (Ni) : 1 à 10 %
 - Fer (Fe) : 0-5 %
 - Cuivre (Cu) : 0-5 %
 - Cobalt (Co) : 0-5 %
- **Utilisations :** Aérospatiale, industrie de la défense, équipement médical, exploration pétrolière, industrie électronique, etc.

Partie II : Aperçu des dangers

- **Principaux risques pour la santé :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Il n'est pas toxique sous forme solide, mais de la poussière ou des fumées peuvent être générées pendant le traitement et une inhalation à long terme peut provoquer des effets respiratoires.
- Les alliages contenant du nickel ou du cobalt peuvent avoir des effets sensibilisants sur la peau et les voies respiratoires.
- **Risques environnementaux :**
 - Il n'y a pas de danger environnemental évident, mais le rejet de poussière doit être contrôlé pour éviter de polluer les plans d'eau et le sol.
- **Risques physicochimiques :**
 - Non inflammable, mais des vapeurs d'oxyde peuvent se former à des températures élevées.

Partie III : Composition/Informations sur la composition

Composant	Dosage (%)	Numéro CAS
Tungstène (W)	85-98	7440-33-7
Nickel (Ni)	1-10	7440-02-0
Fer (Fe)	0-5	7439-89-6
Cuivre (Cu)	0-5	7440-50-8
Cobalt (Co)	0-5	7440-48-4

Partie IV : Premiers secours

- **Inhalation :** En cas d'inhalation de poussière, sortir immédiatement à l'air frais et consulter un médecin en cas de malaise.
- **Contact avec la peau :** Rincer abondamment à l'eau et au savon et consulter un médecin en cas d'irritation ou de réaction allergique.
- **Contact avec les yeux :** Rincer abondamment à l'eau pendant au moins 15 minutes et consulter un médecin.
- **Ingestion :** Généralement non toxique, mais une ingestion importante doit nécessiter une attention médicale immédiate.

Partie V : Mesures de protection contre l'incendie

- **Moyen d'extinction :** extincteur à eau, à mousse, à poudre sèche ou à dioxyde de carbone.
- **Mesures de protection spéciales :** Les pompiers doivent porter des masques à gaz et des vêtements de protection.

Partie 6 : Gestion d'urgence des déversements

- **Protection individuelle :** Porter un masque anti-poussière, des lunettes de protection et des gants pour éviter l'inhalation de poussière.
- **Mesures de protection de l'environnement :** Éviter de pénétrer dans les plans d'eau et le sol, utiliser un aspirateur ou un nettoyage humide.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Partie VII : Manutention, manutention et stockage

- **Précautions d'emploi :**
 - Évitez l'inhalation de poussière et assurez une bonne ventilation sur le lieu de travail.
 - Utiliser un équipement de protection approprié.
- **Conditions de stockage :**
 - Conserver dans un environnement sec et aéré, à l'abri des températures élevées et de l'humidité.

Partie VIII : Contrôle de l'exposition/Protection individuelle

- **Limites d'exposition professionnelle (LEP) :**
 - Poussière de tungstène : 5 mg/m³ (TLV-TWA)
 - Nickel : 1 mg/m³ (TLV-TWA)
 - Cobalt : 0,02 mg/m³ (TLV-TWA)
- **Protection personnelle :**
 - **Protection respiratoire :** Porter un masque anti-poussière ou un respirateur.
 - **Protection des mains :** Porter des gants de protection.
 - **Protection des yeux :** Porter des lunettes de sécurité.
 - **Protection de la peau :** Porter des vêtements de protection.

Partie IX : Propriétés physico-chimiques

- **Aspect :** Solide gris argenté
- **Point de fusion :** environ 3000°C (selon la composition).
- **Densité :** 16-19 g/cm³
- **Solubilité :** insoluble dans l'eau

Partie X : Stabilité et réactivité

- **Stabilité chimique :** Stable
- **Substances à éviter :** oxydants forts, acides forts
- **Produits de décomposition :** Les températures élevées peuvent produire des fumées d'oxyde métallique

Partie XI : Informations toxicologiques

- **Toxicité aiguë :** Aucune toxicité aiguë connue
- **Irritation cutanée :** les alliages contenant du nickel ou du cobalt peuvent provoquer des réactions allergiques
- **Effets à long terme :** L'inhalation prolongée de poussière peut affecter le système respiratoire

Partie XII : Informations écologiques

- **Impact environnemental :** l'alliage de tungstène est stable et difficile à dégrader
- **Bioaccumulation :** Faible

Partie XIII : Élimination

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Méthode d'élimination :**
 - Respectez les réglementations locales en matière de recyclage ou d'élimination en tant que ferraille
 - Éviter le rejet dans l'eau ou le sol

Partie XIV : Informations sur l'expédition

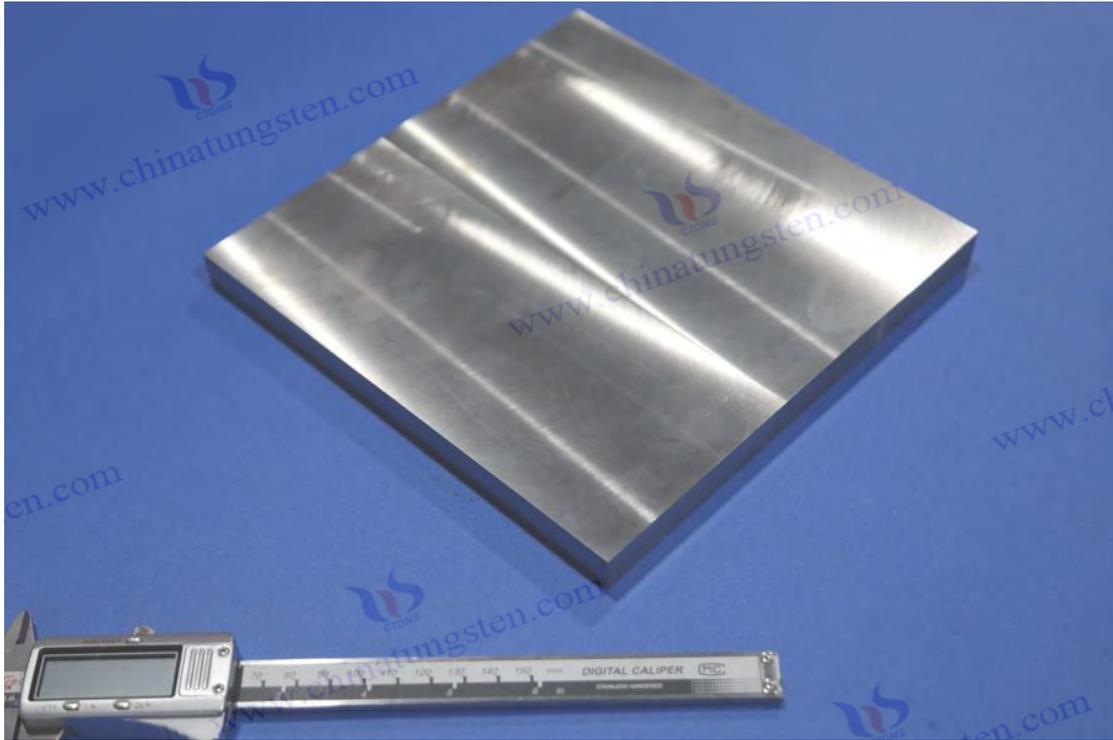
- **Numéro ONU :** Aucune catégorie de danger particulière
- **Classification des transports :** transport de marchandises générales

Partie XV : Informations réglementaires

- **Réglementation applicable :** Conforme aux normes de sécurité en vigueur en Chine, dans l'Union européenne et aux États-Unis

SECTION XVI : INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

- Ce document a été préparé conformément aux réglementations de sécurité les plus récentes et est fourni à titre informatif uniquement. Son utilisation réelle doit respecter les réglementations locales et les consignes de sécurité de l'entreprise.



Chapitre 11 : Considérations environnementales et économiques pour les alliages de tungstène à densité élevée

L'utilisation généralisée des alliages de tungstène dans les secteurs aérospatial, militaire, médical et industriel a apporté des avantages économiques considérables. Cependant, l'impact environnemental et les problèmes de coût liés à leur production et à leur utilisation ne peuvent être ignorés. Ce chapitre analysera l'empreinte environnementale, le potentiel de recyclage et les aspects économiques des alliages de tungstène à forte densité, et fournira des références pour le développement durable et l'optimisation industrielle.

11.1 Impact environnemental lors de la production d'alliages de tungstène à densité élevée

La production d'alliages de tungstène à forte densité implique de multiples étapes, de l'extraction du minerai de tungstène à la transformation par métallurgie des poudres. Chacune de ces étapes peut avoir un impact sur l'environnement, notamment en termes de consommation de ressources, de consommation d'énergie, d'émissions de gaz d'échappement et d'élimination des déchets. Face à l'importance croissante accordée au développement durable à l'échelle mondiale, l'évaluation et la réduction de ces impacts environnementaux sont devenues un enjeu majeur pour l'industrie.

11.1.1 Impacts environnementaux de l'extraction du tungstène

L'extraction du tungstène est à l'origine de la production d'alliages de tungstène à forte densité, principalement à ciel ouvert ou souterraine. Les réserves mondiales de tungstène s'élèvent à environ 3,3 millions de tonnes (données de 2023), dont 60 % proviennent de Chine (environ 1,9 million de tonnes).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le processus d'extraction implique la destruction des sols, la pollution de l'eau et une consommation énergétique importante.

Impacts spécifiques

- **Destruction des sols** : L'exploitation à ciel ouvert enlève 10 à 15 tonnes de morts-terrains par tonne de minerai de tungstène, détruisant ainsi la végétation et les sols. Par exemple, une zone d'exploitation de tungstène dans le Hunan, en Chine, produit 5 000 tonnes de concentré de tungstène par an, couvrant une superficie d'environ 50 hectares, et le taux de couverture végétale est réduit à 10 %.
- **Pollution de l'eau** : Le procédé d'enrichissement utilise des agents de flottation (tels que le xanthate et l'huile de pin), ce qui produit 0,5 à 1 mètre cube d'eaux usées par tonne de minerai, contenant des métaux lourds (tels que l'arsenic et le plomb) et des résidus chimiques, et dont le pH chute à 4-5. Un rejet non traité peut entraîner une DCO dans la rivière jusqu'à 50 fois supérieure à la norme.
- **Consommation d'énergie** : L'extraction de concentré de tungstène consomme environ 300 à 400 kWh d'électricité et des émissions de CO₂ d'environ 0,2 tonne par tonne de concentré de tungstène (principalement de l'énergie produite au charbon en Chine).

Étude de cas Une mine de tungstène dans le Jiangxi, en Chine, a extrait 10 000 tonnes de concentré de tungstène en 2023, détruit 70 hectares de végétation, rejeté 8 000 mètres cubes d'eaux usées et dépassé la teneur en As des rivières environnantes à 0,05 mg/L (norme nationale 0,01 mg/L).

11.1.2 Impacts environnementaux du traitement par métallurgie des poudres

Arrière-plan

à haute densité est principalement produit par métallurgie des poudres, qui comprend la préparation, le mélange, le pressage et le frittage de la poudre de tungstène. Ce procédé requiert des températures et des pressions élevées, ce qui entraîne une consommation d'énergie et des émissions polluantes.

Impacts spécifiques

- **Consommation d'énergie** : La réduction de la poudre de tungstène (atmosphère H₂, 900-1100°C) consomme environ 2000 kWh par tonne, le frittage (1400-1500°C) consomme environ 1500 kWh par tonne, et les émissions totales de CO₂ sont d'environ 2-3 tonnes/tonne d'alliage.
- **Émissions de gaz d'échappement** : H₂O et des traces de CO (en cas de réduction du carbone) sont émises lors du processus de réduction, et CO₂ et NO_x sont émis par frittage (environ 0,1 tonne de NO_x par tonne d'alliage). La volatilisation du Ni et du Fe produit une faible quantité de vapeur métallique, et les émissions non traitées affectent la qualité de l'air.
- **Déchets solides** : Le pressage et le frittage produisent des déchets (tels que de la poudre d'oxyde de tungstène, des scories), environ 50 à 100 kg par tonne d'alliage, contenant 20 à 30 % de W, s'ils ne sont pas recyclés, ils accumuleront des sols contaminés.

Étude de cas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Une usine produit annuellement 1 000 tonnes d'alliage W-95Ni-Fe, consomme 3,5 millions de kWh, émet environ 2 500 tonnes de CO₂ et présente une concentration de NO_x de 100 mg/m³ dans les gaz d'échappement (deux fois la norme), et les déchets sont entassés sur une superficie de 2 hectares.

11.1.3 Impact environnemental du post-traitement et de la transformation

Arrière-plan

Le post-traitement comprend l'usinage (par exemple, CNC) et le traitement de surface (par exemple, polissage, revêtement) impliquant des fluides de coupe, des déchets et des émissions chimiques.

Impacts spécifiques

- **Liquide résiduaire** : le fluide de coupe (à base d'huile ou d'eau) produit 10 à 20 L de liquide résiduaire par tonne d'alliage, contenant de la graisse et des métaux lourds (Ni, Fe), la DCO est d'environ 5 000 mg/L et les rejets non traités polluent le plan d'eau.
- **Ferraille** : L'usinage CNC produit 20 à 50 kg de copeaux de tungstène par tonne d'alliage, contenant plus de 90 % de W, ce qui gaspille des ressources et occupe des terres s'il n'est pas recyclé.
- **Gaz d'échappement** : Le polissage et le revêtement (par exemple PVD) émettent des composés organiques volatils (COV) à raison d'environ 0,5 à 1 kg par tonne d'alliage, et non traités, ils affectent la qualité de l'air (les PM_{2,5} augmentent de 10 µg /m³).

Étude de cas : Une usine de pièces d'aviation traite 500 tonnes de contrepoids W-90Ni-Fe, produit 8 000 L de déchets liquides par an (la DCO dépasse la norme de 10 fois), 15 tonnes de copeaux de déchets ne sont pas recyclés, les émissions de COV sont d'environ 300 kg et la qualité de l'air ambiant diminue de 5 %.

11.1.4 Évaluation quantitative des impacts environnementaux

Données quantitatives

- **Empreinte carbone** : émissions de CO₂ d'environ 3 à 4 tonnes par tonne de production d'alliage de tungstène à haute densité (0,2 tonne extraite, 3 à 3,8 tonnes traitées), représentant 80 % du niveau moyen des produits en tungstène.
- **Empreinte hydrique** : environ 2 à 3 mètres cubes d'eau par tonne d'alliage (1 à 2 m³ pour l'enrichissement, 0,5 à 1 m³ pour le post-traitement), et les rejets d'eaux usées représentent 50 à 70 %.
- **Occupation du sol** : Environ 0,01 à 0,02 hectare par tonne d'extraction d'alliage et d'accumulation de ferraille.

Comparé à l'acier (émission de CO₂ de 1,5 à 2 tonnes/tonne), l'alliage de tungstène a une charge environnementale plus élevée, mais ses hautes performances compensent partiellement l'impact en réduisant l'utilisation en aval (par exemple, volume de contrepoids réduit de 50 %).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11.1.5 Études de cas d'impacts environnementaux

Cas particuliers

- **Zone d'extraction de tungstène du Hunan en Chine** : production annuelle de 20 000 tonnes de concentré de tungstène, 4 000 tonnes d'émissions de CO₂, 15 000 mètres cubes d'eaux usées, 200 hectares de dégâts fonciers et environ 50 millions de yuans de coûts de restauration écologique environnante.
- **Kennamental aux Etats-Unis** : production annuelle de 1 000 tonnes d'alliage de tungstène, taux de traitement des gaz d'échappement de 95 %, émission de CO₂ de 2 000 tonnes, taux de récupération des copeaux usagés de 80 %, contrôle de l'impact environnemental dans les normes locales.

11.1.6 Défis techniques et solutions

Défi

- **Consommation énergétique élevée** : le frittage et le traitement consomment 30 à 40 % des coûts de production et les émissions de carbone sont difficiles à réduire.
- **Traitement des déchets** : Le taux de recyclage des eaux usées et des débris de déchets est faible (domestique < 50 %) et le coût de traitement est élevé (environ 100 yuans par tonne d'eaux usées).
- **Pression réglementaire** : la loi chinoise sur la protection de l'environnement (édition 2023) exige une réduction de 30 % des émissions de CO₂ et un rejet nul d'eaux usées.

Solution

- **Technologie d'économie d'énergie** : L'utilisation du frittage à basse température (1200°C) et des énergies renouvelables (production d'énergie photovoltaïque) réduit les émissions de CO₂ de 20 à 30 %.
- **Recyclage des déchets** : valorisation hydrométallurgique des copeaux de déchets (taux de récupération W > 90 %), eaux usées de traitement des eaux usées (coût réduit à 50 yuans/tonne).
- **Contrôle de la pollution** : Avec l'installation d'équipements de dépoussiérage et de dénitrification des sacs, les émissions de NO_x ont été réduites à 50 mg/m³ et le taux de traitement des COV était de 98 %.

11.1.7 Résumé des tableaux d'impact environnemental

Liens de production	Impacts majeurs	Mesures quantitatives	solution
Extraction de tungstène	Destruction des terres, pollution de l'eau, consommation d'énergie	CO ₂ 0,2 t/t, eaux usées 0,5-1 m ³ /t	Remise en état de la végétation, sédimentation des eaux usées
Métallurgie des	Consommation d'énergie, émissions de	CO ₂ 2-3 tonnes/tonne, NO _x 0,1 tonne/tonne	Frittage à basse température, dépoussiérage et dénitrification

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

poudres	gaz d'échappement, déchets solides		
Post-traitement	Déchets liquides, débris et rejets de COV	Eaux usées 10-20 L/吨, COV 0,5-1 kg/TON	Réutilisation des eaux usées, récupération des copeaux de bois, traitement des COV
Empreinte totale	Carbone, eau, occupation des sols	CO ₂ 3-4 t/t, eau 2-3 m ³ /t	Énergie renouvelable, optimisation de l'ensemble du processus

11.2 Récupération et réutilisation d'alliages de tungstène à densité élevée

En raison de sa valeur élevée et de sa forte consommation de ressources, l'alliage de tungstène à forte densité est devenu un moyen important de réduire l'impact environnemental et les coûts. Métal rare, le tungstène dispose de réserves mondiales limitées (environ 3,3 millions de tonnes). Son recyclage permet non seulement de réduire la pression minière, mais aussi d'améliorer la durabilité de l'industrie. Cette section analyse les sources de recyclage, les approches techniques, les effets de la réutilisation et le potentiel futur.

11.2.1 Sources et état du recyclage

Contexte : Le recyclage des alliages de tungstène à forte densité provient principalement des rebuts de production et des produits en fin de vie. Les rebuts, les ferrailles et les résidus de post-traitement issus du processus de production, ainsi que les contrepoids, noyaux et blindages en fin de vie, sont autant de matières potentiellement recyclables. Le taux de recyclage mondial est actuellement d'environ 30 à 40 %, et il existe un écart important entre la Chine, l'Europe et les États-Unis.

Sources spécifiques

- **Déchets de production :** déchets de poudre en métallurgie des poudres (teneur en W 20%-30%), déchets pressés (alliage 50-100 kg/tonne), déchets d'usinage CNC (alliage 20-50 kg/tonne, W >90%).
- **Produits mis au rebut :** contrepoids aéronautique (durée de vie 10-20 ans), noyau de balle militaire (usage unique), blindage médical (cycle de mise à jour 5-10 ans).
- **État du recyclage :** En 2023, environ 20 000 tonnes de tungstène seront recyclées dans le monde (soit 20 % de la demande totale) et environ 2 000 tonnes d'alliage de tungstène seront recyclées (soit 27 % de la production). Le taux de recyclage est d'environ 35 % en Chine, et de 50 à 60 % aux États-Unis et en Europe.

Étude de cas

Une usine chinoise a une production annuelle de 1 000 tonnes d'alliage W-95Ni-Fe, 40 tonnes de copeaux de déchets (W 90%), 80 tonnes de déchets (W 25%), le taux de recyclage n'est que de 30%, et l'accumulation restante couvre une superficie de 1 hectare.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11.2.2 Technologies et procédés de recyclage

Arrière-plan

à haute densité comprend la séparation physique, l'extraction chimique et la réduction métallurgique, dans le but de séparer le tungstène (W) des phases liantes (telles que Ni, Fe, Cu) et de préparer des blocs de poudre ou d'alliage de tungstène réutilisables.

Technologies spécifiques

- **Séparation physique :**
 - **Méthode :** Concassage, broyage, criblage, utilisé pour les ferrailles et les débris.
 - **Résultats :** récupération de 70 à 80 % de W, taille des particules de 1 à 10 μm et pureté $\geq 95\%$.
 - **Consommation énergétique :** 200-300 kWh par tonne de déchets et 0,1-0,15 tonne d'émissions de CO_2 .
- **Hydrométallurgie (extraction chimique) :**
 - **Méthode :** La lixiviation acide (HCl ou HNO_3) dissout Ni et Fe, précipite WO_3 , puis réduit en poudre de tungstène avec H_2 .
 - **Résultats :** récupération de 90 à 95 % d'eau et pureté $\geq 99,5\%$, mais déchets acides (pH 2-3, environ 0,5 m^3 par tonne).
 - **Consommation d'énergie :** 500-700 kWh par tonne et 0,3-0,4 tonne d'émissions de CO_2 .
- **Pyrométallurgie (traitement à haute température) :**
 - **Méthode :** Fusion à haute température ($> 2000\text{ }^\circ\text{C}$) pour séparer W et Ni-Fe, ou grillage oxydatif (800-1000 $^\circ\text{C}$) pour produire WO_3 .
 - **Effet :** taux de récupération W de 85% à 90%, adapté aux déchets complexes, gaz d'échappement contenant SO_2 et NO_x (0,05 à 0,1 tonne/tonne).
 - **Consommation d'énergie :** 1000-1500 kWh par tonne, émissions de CO_2 0,8-1 tonne.

Le coût de la séparation technique est faible par rapport à la séparation physique (environ 500 dollars US/tonne), ce qui convient aux copeaux de déchets de haute pureté ; Taux de récupération humide élevé, adapté aux déchets mixtes ; La méthode du feu est très adaptable, mais présente une consommation d'énergie et des émissions élevées.

11.2.3 Effets et applications de la réutilisation

Arrière-plan

La poudre ou l'alliage de tungstène recyclé peut être directement utilisé pour produire un nouvel alliage de tungstène avec des performances proches de celles du matériau vierge, tout en réduisant la consommation de ressources et les coûts.

Effets spécifiques

- **Performances :** W-90Ni-Fe fabriqué à partir de poudre de tungstène recyclée (pureté 99,5%),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

densité 18,0 g/cm³, résistance à la traction 850 MPa (vierge 900 MPa), perte de performance <10%.

- **Économie des ressources** : Réduction de l'extraction du minerai de tungstène d'environ 1,2 tonne par tonne de tungstène recyclé, économisant 2 à 3 m³ d'eau et réduisant les émissions de CO₂ de 2 à 3 tonnes.
- **Rentable** : Le coût de recyclage est d'environ 15 000 à 20 000 dollars américains/tonne, et la poudre de tungstène primaire est de 3 à 35 000 dollars américains/tonne, ce qui permet d'économiser 40 à 50 %.

Domaines d'application

- **Contrepoids aéronautique** : Le W-95Ni-Fe (18,5 g/cm³) est récupéré pour les composants secondaires avec une réduction de coût de 20 %.
- **Outils industriels** : W-90Ni-Cu recyclé (17,5 g/cm³) avec 95% de résistance à l'abrasion native.
- **médical** : le collimateur en poudre de tungstène est récupéré et l'efficacité du blindage n'est réduite que de 5 %.

11.2.4 Études de cas de recyclage et de réutilisation

Cas particuliers

- **Kennametal**, USA : 500 tonnes de ferraille d'alliage de tungstène sont recyclées chaque année, la poudre de tungstène est extraite par hydrométallurgie (taux de récupération de 92 %) et le contrepoids W-95Ni-Fe est recyclé, ce qui permet d'économiser 10 millions de dollars américains en coûts annuels et de réduire les émissions de CO₂ de 1 200 tonnes.
- **Industrie du tungstène de Xiamen en Chine** : 300 tonnes de copeaux usagés (W 90%) sont recyclés chaque année, séparation physique + traitement au feu, le taux de récupération est de 85%, et des tiges W-90Ni-Fe sont fabriquées, le coût est réduit de 30%, mais le traitement des gaz résiduels doit être amélioré.

11.2.5 Défis techniques et solutions

Défi

- **Faible taux de valorisation** : Le taux de recyclage des déchets ménagers est < 50%, et il est difficile de séparer les déchets complexes (tels que ceux contenant du Cu).
- **Impact environnemental** : Coût élevé de l'élimination des déchets humides et pyromériques (environ 200 à 300 \$ par tonne).
- **Économique** : Les petites entreprises ont un investissement important dans l'équipement de recyclage (> 500 000 \$) et une longue période de récupération (3 à 5 ans).

Solution

- **Amélioration technique** : Le développement d'un procédé combiné (physique + humide) a permis d'augmenter le taux de récupération à 95% et l'efficacité de séparation du Cu à 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Contrôle de la pollution** : cycle de neutralisation des liquides résiduels (pH jusqu'à 7, coût réduit à 100\$/tonne), désulfuration et dénitrification des gaz d'échappement (émissions jusqu'à 50 mg/m³).
- **Soutien politique** : Le gouvernement subventionne les équipements de recyclage (20 à 30 %), et les allègements et exonérations fiscales augmentent la participation des entreprises.

11.2.6 Potentiel futur de recyclage et de réutilisation

S'orienter

- **L'objectif du taux de recyclage** est d'atteindre 60 % dans le monde d'ici 2030, et 50 à 60 % en Chine, avec une capacité de recyclage supplémentaire d'environ 3 000 tonnes par an.
- **Mise à niveau technologique** : récupération électrochimique (consommation énergétique réduite de 30%), tri intelligent (efficacité augmentée de 20%).
- **Valeur marchande** : Le marché des alliages de tungstène récupérés devrait atteindre 500 millions de dollars d'ici 2030, avec une croissance annuelle de 8 %.

L'étude prévoit qu'une usine aéronautique recyclera 1 000 tonnes de déchets W-95Ni-Fe en 2030 et fabriquera de nouveaux contrepoids, économisant ainsi 20 millions de dollars de coûts et réduisant les émissions de CO₂ de 3 000 tonnes, conformément aux futures réglementations environnementales.

11.2.7 Résumé du formulaire de recyclage et de réutilisation

projet	contenu
Sources de recyclage	Déchets de production (50-100 kg/tonne), produits en fin de vie
Technologie de recyclage	Séparation physique (70%-80%), humide (90%-95%), pyrotechnique (85%-90%)
Effet de réutilisation	La densité est de 18,0 g/cm ³ , la résistance est de 850 MPa et le coût est réduit de 40 à 50 %
Avantages environnementaux	Réduction de CO ₂ de 2 à 3 t/tonne, économie d'eau de 2 à 3 m ³ /tonne
défi	Faible taux de récupération, déchets liquides et gaz d'échappement, économique
solution	Technologie conjointe, contrôle de la pollution, subventions politiques
Potentiel futur	Le taux de récupération est de 60 %, le marché est de 500 millions de dollars américains et la technologie est intelligente

11.3 Analyse des coûts d'un alliage de tungstène à densité élevée

Grâce à sa densité élevée et à ses performances élevées, l'alliage de tungstène est irremplaçable dans les domaines aérospatial, militaire, médical et industriel. Cependant, ses coûts de production et d'application sont élevés, impliquant matières premières, transformation, recyclage et protection de l'environnement. L'analyse des coûts ne se limite pas à la rentabilité d'une entreprise, mais vise également la compétitivité sur le marché et le développement durable. Cette section fournit une analyse détaillée de la structure des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

coûts, évalue les facteurs d'influence et propose une solution d'optimisation.

11.3.1 Composition des coûts et principaux liens

Arrière-plan

Le coût des alliages de tungstène à forte densité couvre l'ensemble de la chaîne industrielle, de l'approvisionnement en matières premières à la livraison du produit final, en passant par l'extraction en amont, la transformation intermédiaire et l'application en aval. En 2023, la fluctuation des prix mondiaux du tungstène (environ 3 000 à 35 000 dollars US la tonne) et la hausse des prix de l'énergie auront un impact significatif sur les coûts.

Composition spécifique

- **Coût des matières premières (50%-60%)** : poudre de tungstène ($W \geq 99,9\%$), nickel (Ni), fer (Fe), cuivre (Cu), etc., représentant plus de la moitié du coût total.
- **Coût de traitement (20%-30%)** : métallurgie des poudres (emboutissage, frittage), post-traitement (usinage CNC, traitement de surface).
- **Coûts énergétiques (10%-15%)** : électricité, gaz, pour le frittage et le traitement à haute température.
- **Coût de protection de l'environnement (5%-10%)** : gaz résiduaires, traitement des eaux usées, investissement en équipements de protection de l'environnement.
- **Main d'oeuvre et autres (5%-10%)** : Amortissement de la main d'oeuvre, du transport, de l'équipement.

Le coût total par tonne d'alliage W-95Ni-Fe (18,0 g/cm³) est d'environ 25 000 à 30 000 USD, comprenant :

- Poudre de tungstène (95 %) : 18 000 \$ à 20 000 \$ (32 000 \$/tonne \times 0,95).
- Ni, Fe (5%) : 0,1-01 500 dollars US (Ni 20 000 dollars US/tonne, Fe 01 000 dollars US/tonne).
- Transformation et énergie : 0,5 à 7 000 \$.
- Protection de l'environnement et travail : 0,2 à 0,3 mille dollars américains.

11.3.2 Facteurs influençant le coût des matières premières

Arrière-plan

En tant que métal rare, le prix du tungstène est influencé par l'offre et la demande, les politiques et les facteurs géographiques. La Chine représente 80 % de la production mondiale de tungstène (82 000 tonnes en 2023), et les restrictions sur les quotas d'exportation ont fait grimper les prix.

Facteurs spécifiques

- **Prix du marché** : En 2023, le concentré de tungstène ($WO_3 \geq 65\%$) sera d'environ 25 000 à 30 000 dollars américains/tonne, et la poudre de tungstène sera de 3 à 35 000 dollars américains/tonne, avec une fluctuation annuelle de $\pm 15\%$.
- **Contraintes d'approvisionnement** : le quota de la Chine en 2023 est de 70 000 tonnes, et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'exportation réelle est de 50 000 tonnes, avec une pénurie de 10 % sur le marché international.

- **Matériaux alternatifs** : Les prix du Ni et du Fe sont bas (Ni 20 000 dollars US/tonne, Fe 01 000 dollars US/tonne), mais la proportion est faible et l'impact est limité.

Étude de cas

Une usine a acheté 1 000 tonnes de poudre de tungstène (33 000 USD/tonne) en 2023, et le prix a augmenté de 3,3 millions USD en raison d'une augmentation de prix de 10 % due à une réduction de quota.

11.3.3 Facteurs influençant les coûts de traitement et d'énergie

Arrière-plan

La métallurgie des poudres et le post-traitement sont au cœur de la production d'alliages de tungstène à densité élevée, qui nécessitent des équipements à haute température et haute pression, et l'efficacité énergétique et du processus affecte directement le coût.

Facteurs spécifiques

- **Prix de l'énergie** : le prix de l'électricité industrielle en Chine est d'environ 0,1 USD/kWh, celui des États-Unis est de 0,15 USD/kWh, et la consommation d'électricité est de 3 500 kWh par tonne d'alliage, et le coût de l'électricité est de 350 à 525 USD.
- **Efficacité du processus** : Le frittage traditionnel (1500°C) prend 6 heures, et le nouveau frittage à basse température (1200°C) est réduit à 4 heures, économisant 20% de consommation d'énergie.
- **Amortissement des équipements** : amortissement annuel de 50 000 dollars US pour le four de frittage (500 000 dollars US/ensemble, durée de vie 10 ans), et amortissement annuel de 20 000 dollars US pour les machines-outils CNC (200 000 dollars US/ensemble).

Étude de cas : Une usine avec une production annuelle de 1 000 tonnes d'alliage de tungstène et un coût d'électricité de 500 000 USD (0,1 USD/kWh) a été réduite à 400 000 USD après un frittage à basse température, économisant ainsi 100 000 USD.

11.3.4 Coûts environnementaux et implications politiques

Arrière-plan

Les réglementations environnementales (comme la loi chinoise sur la protection de l'environnement de 2023) exigent que les gaz résiduels et les eaux usées soient rejetés conformément aux normes, ce qui augmente les coûts de traitement, mais le recyclage peut être partiellement compensé.

Facteurs spécifiques

- **Traitement des gaz résiduels** : dépoussiérage des sacs + équipement de dénitrification (investissement de 1 million de dollars US, durée de vie de 10 ans), coût de traitement de 50 à 100 dollars US par tonne d'alliage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Traitement des eaux usées** : neutralisation + sédimentation (50-100 yuans par tonne d'eaux usées), environ 50-100 dollars américains par tonne d'alliage.
- **Exigences politiques** : Une réduction de 30 % des émissions de CO₂ nécessite une technologie de capture du carbone (20 USD par tonne de CO₂) et une augmentation de 60 à 80 USD par tonne d'alliage.

Étude de cas : Une usine avec une production annuelle de 500 tonnes d'alliages, un coût d'exploitation annuel des équipements de protection de l'environnement de 250 000 dollars américains, une amende de 100 000 dollars américains pour non-respect de la norme et une augmentation totale des coûts de 350 000 dollars américains.

11.3.5 Analyse des coûts

Cas particuliers

- **Usine chinoise A** : production annuelle de 1 000 tonnes de W-95Ni-Fe, poudre de tungstène : 19 000 dollars US/tonne, coût total : 26 000 dollars US/tonne, prix de vente : 35 000 dollars US/tonne, bénéfice : 900 dollars US/tonne. Les coûts énergétiques et environnementaux représentent 30 %, et le faible taux de recyclage (30 %) entraîne un gaspillage de ressources.
- **Usine américaine B** : production annuelle de 500 tonnes de W-97Ni-Fe, poudre de tungstène : 35 000 dollars US/tonne, coût total : 32 000 dollars US/tonne, prix de vente : 45 000 dollars US/tonne, bénéfice : 1 300 dollars US/tonne. Le taux de recyclage est de 60 %, ce qui est respectueux de l'environnement et coûteux, mais conforme à la réglementation.

11.3.6 Stratégies d'optimisation des coûts

Défi

- **Fluctuations des matières premières** : les prix du tungstène augmentent les coûts de 10 à 15 %.
- **Consommation énergétique élevée** : la consommation d'énergie de traitement représente 20 à 30 % du coût.
- **Pression environnementale** : la conformité réglementaire a augmenté de 5 à 10 %.

Solution

- **Optimisation des achats** : les contrats à long terme verrouillent les prix du tungstène (réduction des fluctuations de 5 %) et augmentent la proportion de poudre de tungstène recyclée (réduction des coûts de 40 %).
- **Technologie d'économie d'énergie** : frittage à basse température + production d'énergie photovoltaïque (consommation d'énergie réduite de 20 à 30 %), coût de l'électricité réduit de 100 000 dollars US/1 000 tonnes.
- **Efficacité de récupération** : Le taux de récupération de l'hydrométallurgie est de 90 %, ce qui permet d'économiser 1 à 15 000 dollars américains par tonne et de réduire les coûts de protection de l'environnement de 50 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11.3.7 Comparaison des coûts et prévision des tendances

Comparaisons nationales et étrangères

- **Chine** : Le coût total est de 25 000 à 30 000 dollars américains par tonne, ce qui est faible en raison des avantages des matières premières et de la main-d'œuvre, mais le coût de la protection de l'environnement augmente.
- **États-Unis/Europe** : 3 à 35 000 \$/ tonne , élevé en raison des coûts énergétiques et réglementaires, mais avec une efficacité de récupération élevée.

Prévisions de tendances

- **À court terme (2025)** : les prix du tungstène sont stables entre 3,2 et 35 000 USD/ tonne et le coût total augmente de 5 % (pour des raisons environnementales).
- **À long terme (2030)** : récupération de 60 %, réduction des coûts à 2-25 000 \$/tonne et réduction de 20 % de la consommation d'énergie grâce aux nouvelles technologies énergétiques.

11.3.8 Résumé des tableaux d'analyse des coûts

Lien de coût	Pourcentage	Coût par tonne (USD)	Facteurs d'influence	Optimisez votre stratégie
Matières premières	50%-60%	1900-2150	Fluctuations du prix du tungstène, contraintes d'approvisionnement	Contrat à long terme, récupération de poudre de tungstène
Traitement	20%-30%	500-700	Efficacité des processus, amortissement des équipements	Frittage à basse température, modernisation des équipements
Énergie	10%-15%	350-525	Prix de l'électricité, consommation d'énergie	Production d'énergie photovoltaïque, technologie d'économie d'énergie
Protection de l'environnement	5%-10%	100-200	Traitement des gaz résiduels et des eaux usées, réglementation	Efficacité du recyclage et contrôle de la pollution
Travail et autres	5%-10%	100-200	Travail, transport	Automatisation, optimisation logistique
Coût total	100%	2500-3000	Impact combiné	Optimisation de l'ensemble du processus

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 12 : Frontières de la recherche sur les alliages de tungstène à densité élevée

L'alliage de tungstène (PES) occupe une place importante dans de nombreux domaines grâce à ses excellentes propriétés physiques et mécaniques. Ses recherches portent sur le développement de nouveaux matériaux, l'optimisation des performances, la simulation numérique et la conception intelligente. Avec les progrès de la science des matériaux et l'amélioration des exigences applicatives, le développement d'alliages de tungstène plus performants et plus respectueux de l'environnement, dotés d'une densité élevée, est devenu un pôle de recherche majeur. Ce chapitre explore l'état actuel de la technologie et son potentiel futur dans ces domaines d'avenir.

12.1 Développement de nouveaux matériaux pour alliage de tungstène à densité élevée

Les formulations traditionnelles d'alliages de tungstène (par exemple, W-Ni-Fe, W-Ni-Cu) peinent à répondre pleinement aux besoins des industries aérospatiale, militaire et médicale en matière de densité, de résistance et de durabilité accrues. Le développement de nouveaux matériaux vise à surmonter les obstacles en matière de performances et à améliorer la durabilité en introduisant de nouveaux éléments, en optimisant les microstructures et en explorant des phases liantes alternatives.

12.1.1 Contexte et moteurs du développement

Arrière-plan

L'alliage de tungstène traditionnel à forte densité est principalement composé de tungstène (W) (85 %-97 %), complété par du nickel (Ni), du fer (Fe) ou du cuivre (Cu) comme phase liante, avec une masse volumique de 17,0 à 18,8 g/cm³ et une résistance à la traction de 700 à 1 000 MPa. Cependant, l'aérospatiale requiert des matériaux ultra-lourds d'une masse volumique supérieure à 19,0 g/cm³, le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

secteur militaire exige une résistance à des températures supérieures à 2 000 °C, et le secteur médical exige des formulations moins toxiques afin de favoriser la recherche et le développement de nouveaux matériaux.

Force motrice

- **Performances améliorées** : Densité et résistance supérieures pour les environnements extrêmes.
- **Exigences de protection de l'environnement** : réduire la teneur en Ni, se conformer aux réglementations REACH et RoHS.
- **Progrès technologiques** : la nanotechnologie, les alliages à haute entropie et la fabrication additive offrent de nouvelles possibilités.

12.1.2 Conception de la composition de nouveaux matériaux

Détails

- **Alliages à haute teneur en tungstène** : teneur en W augmentée à 98%-99%, comme W-98Ni-Fe, densité 19,0-19,3 g/cm³, résistance à la traction 1100 MPa et phase liante réduite à 1%-2%.
- **Alliages modifiés aux terres rares** : ajoutez La et Ce (0,5%-1%), tels que W-95Ni-Fe-La, le grain est affiné à 1 µm, la ténacité est augmentée de 20% et la résistance à la température est de 1800°C.
- **Alliage sans nickel** : Remplacez le Ni par du Fe, du Cu ou du Mo, comme le W-95Fe-Cu, avec une densité de 18,5 g/cm³, une résistance à la traction de 900 MPa et une émission de Ni < 0,05 %, ce qui répond aux exigences de protection de l'environnement.
- **Alliages nanocomposites** : Nano SiC ou Al₂O₃ (1%-5%), tels que W-90Ni-Fe/ SiC, avec une densité de 17,5 g/cm³, une dureté de 550 HV et une augmentation de 30% de la résistance à l'usure.

Détails techniques

- **Processus de préparation** : L'alliage à haute teneur en tungstène adopte un broyage à billes à haute énergie (500 tr/min, 12 heures) et un pressage isostatique à chaud (HIP, 250 MPa, 1400°C), et la porosité est < 0,05 %.
- **Microstructure** : Les éléments de terres rares affinent les grains, les nanoparticules sont réparties uniformément et la force de liaison interfaciale est augmentée de 15 %.

12.1.3 Avantages de performance des nouveaux matériaux

Performances spécifiques

- **Densité** : W-98Ni-Fe jusqu'à 19,2 g/cm³ (traditionnellement 18,5 g/cm³), soit une augmentation de 3 à 5 %.
- **Résistance** : Résistance à la traction du W-95Ni-Fe-La 1150 MPa (traditionnellement 1000 MPa), soit une augmentation de 15 %.
- **Résistance à la température** : W-95Fe-Cu a une résistance à la température de 2000°C (traditionnellement 1500°C), soit une augmentation de 33%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Protection de l'environnement : teneur en nickel W-95Fe-Cu < 1 %, libération < 0,05 %, meilleure que le W-Ni-Fe traditionnel (Ni 5 %-7 %).
- Résistance à l'abrasion : le coefficient de frottement du W-90Ni-Fe/ SiC est réduit à 0,3 (0,5 conventionnel) et la durée de vie est augmentée de 40 %.

Données d'essai échantillon (50×50×10 mm, W-98Ni-Fe, poids 950 g) : masse volumique 19,2 g/cm³, résistance à la traction 1120 MPa, dureté 500 HV, déformation < 0,01 mm à 2000°C.

11.1.4 Technologie de fabrication de nouveaux matériaux

Processus spécifique

- **Broyage à billes à haute énergie** : poudre de tungstène (1 µm) mélangée à de la poudre de terre rare, broyée à 500 tr/min pendant 12 heures, affinage du grain à 50 nm.
- **isostatique à froid** : moulage 300 MPa, densité verte > 60%.
- **Frittage sous vide** : 1500°C, 10⁻³ Pa, 2 heures, densité jusqu'à 99,5% de la valeur théorique.
- **Traitement HIP** : 250 MPa, 1400°C, 1,5 heure, porosité réduite à 0,03%.
- **Fabrication additive (SLM)** : puissance laser 4000 W, épaisseur de couche 50 µm , préparation de formes complexes avec une précision de ± 0,02 mm.

Cas : Un institut de recherche a utilisé la SLM pour imprimer des pièces en W-95Ni-Fe-La (pesant 500 g) avec une densité de 18,9 g/cm³ et une résistance de 1150 MPa, raccourcissant ainsi le cycle de développement de 50 %.

12.1.5 Cas d'application pratique de nouveaux matériaux

Cas particuliers

- **Aérospatiale** : Contrepoids W-98Ni-Fe (19,2 g/cm³, 500 g), utilisé dans un balancier de fusée, réduction de poids de 10%, résistance à la température 2000°C, conforme aux exigences de la NASA.
- **Militaire** : noyau de balle W-95Fe-Cu (18,5 g/cm³, 300 g), profondeur de pénétration augmentée de 15 %, libération de Ni < 0,05 %, conforme aux réglementations de protection de l'environnement.
- **Médical** : blindage W-90Ni-Fe/ SiC (17,5 g/cm³, 200 g), 30 % de résistance à l'abrasion en plus, 95 % de blindage aux rayons X, utilisé dans les machines CT.

12.1.6 Défis techniques et solutions en développement

Défi

- **Uniformité de la composition** : Une teneur élevée en tungstène (> 98 %) peut facilement conduire à une répartition inégale de la phase liante et à un écart de résistance de ± 50 MPa.
- **Coûts de fabrication** : les équipements HIP et SLM sont chers (> 1 million de dollars) et le coût par tonne augmente de 20 à 30 %.
- **Protection de l'environnement** : L'ajout de terres rares nécessite de contrôler les résidus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(<0,1%) pour éviter la pollution secondaire.

Solution

- **Optimisation de l'homogénéité** : frittage multizone (différence de température < 5°C) et agitation ultrasonique, l'écart de distribution est réduit à 5%.
- **Réduction des coûts** : équipement HIP domestique (500 000 dollars US/ensemble), récupération de poudre de tungstène (réduction des coûts de 40%).
- **Contrôle environnemental** : Procédé de recyclage des terres rares (taux de récupération > 90%), émissions de déchets réduites à 0,05%.

12.1.7 Résumé du nouveau formulaire de développement de matériel

Projet	Contenu
Nouveaux matériaux	W-98Ni- Fe,W- 95Ni-Fe -La,W- 95Fe- Cu,W- 90Ni-Fe/ SiC
Caractéristiques des ingrédients :	W 98%-99%, terres rares 0,5%-1%, sans nickel, nano 1%-5%
Avantages en termes de performance	La densité est de 19,2 g/cm ³ , la résistance est de 1150 MPa et la résistance à la température est de 2000 °C.
Processus de fabrication	Broyage à boulets à haute énergie, HIP, SLM, porosité < 0,05 %
Domaines d'application	Contrepoids d'aviation, noyaux de balles militaires, blindage médical
Défi	Uniformité, coût, protection de l'environnement
Solution	Frittage multizone, localisation des équipements, récupération des terres rares

12.2 Direction de l'amélioration des performances de l'alliage de tungstène à densité élevée

L'amélioration des performances des alliages de tungstène à forte densité est un sujet de recherche majeur, en pointe. Elle vise à répondre aux besoins de densité, de résistance mécanique, de résistance à la température et de durabilité accrues dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'industrie militaire, de la médecine et d'autres secteurs. Grâce à l'optimisation de la composition, à l'amélioration de la microstructure et à l'introduction de nouveaux procédés, les améliorations de performances passent des mesures monométriques traditionnelles à des caractéristiques multifonctionnelles. Cette section explore les pistes techniques et le potentiel de ces orientations.

12.2.1 Contextuel et axé sur la demande

Arrière-plan

La densité des alliages de tungstène traditionnels à forte densité (tels que W-Ni-Fe et W-Ni-Cu) est de 17,0 à 18,8 g/cm³, leur résistance à la traction de 700 à 1 000 MPa et leur résistance à la température de 1 500 °C, ce qui est proche de la limite de performance. Les applications émergentes, telles que les véhicules supersoniques (température > 2 000 °C), l'exploration spatiale (densité > 19,0 g/cm³) et les dispositifs médicaux de haute précision (résistance à l'usure 50 % supérieure), nécessitent de surmonter les obstacles existants.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Axé sur la demande

- **Aérospatiale** : une densité plus élevée réduit le volume, la résistance aux températures élevées améliore l'efficacité de la poussée.
- **Militaire** : résistance et résistance à l'usure supérieures pour améliorer la pénétration, la résistance à la corrosion et prolonger la durée de vie.
- **Médical** : toxicité plus faible et efficacité de blindage plus élevée pour répondre aux besoins d'implantation à long terme.

12.2.2 Augmentation synergique de la densité et de l'intensité

En augmentant la teneur en tungstène et en optimisant la phase liante, la densité et la résistance sont améliorées pour maintenir la ténacité.

Détails

- **Formule à haute teneur en tungstène** : teneur en W augmentée à 98%-99%, comme W-98Ni-Fe, densité 19,0-19,3 g/cm³, résistance à la traction 1100-1200 MPa.
- **Optimisation de la phase liante** : Le rapport Ni:Fe a été ajusté de 7:3 à 5:5, la résistance aux joints de grains a augmenté de 10 % et l'allongement a été maintenu entre 5 et 10 %.
- **Détails techniques** : Broyeur à boulets haute énergie (600 tr/min, 15 heures) poudre de tungstène raffinée à 50 nm, HIP (300 MPa, 1450°C) densifiée avec une porosité < 0,03%.

Améliorations des performances

- La densité a augmenté de 3 à 5 % (18,8→19,2 g/cm³).
- Résistance augmentée de 15 à 20 % (1 000 à 1 200 MPa).

Cas : Un institut de recherche aéronautique a développé un contrepois W-98Ni-Fe (19,2 g/cm³, 1150 MPa) avec une réduction de volume de 10 % pour les pièces d'équilibrage de fusée.

12.2.3 Amélioration de la résistance aux hautes températures

Les instructions améliorent la stabilité de l'alliage à des températures extrêmes en ajoutant des éléments résistants aux hautes températures et en améliorant la microstructure.

Détails

- Ajout d'éléments : Mo (5%-10%), Ta (1%-3%), comme W-90Mo-Ni, le point de fusion monte à 2000°C et la résistance à l'oxydation augmente de 25%.
- Renforcement des joints de grains : éléments de terres rares (La, Y, 0,5%-1%), tels que W-95Ni-Fe-Y, granulométrie <1 μm, déformation <0,01 mm à 2000°C.
- Détails techniques : Frittage sous vide (1600°C, 10⁻⁴ Pa), revêtement de surface (par exemple ZrC, épaisseur 10 μm), conductivité thermique 130 W/(m·K).

Améliorations des performances

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La résistance à la température est augmentée de 33% (1500→2000°C).
- L'activité antioxydante est augmentée de 20 à 30 %.

Cas : Une unité militaire a développé un noyau de balle W-90Mo-Ni (18,5 g/cm³), qui maintenait une résistance de 900 MPa à 2000 °C et augmentait la profondeur de pénétration de 15 %.

12.2.4 Amélioration de la résistance à l'usure et à la corrosion

Des phases dures et des éléments anticorrosion sont introduits pour améliorer la dureté de surface et la stabilité chimique.

Détails

- **Renforcement de phase dure :** Ajoutez du WC, du TiC (1%-5%), tel que du W-90Ni-Fe/WC, la dureté est augmentée à 600 HV et le coefficient de frottement est réduit à 0,3.
- **Formulation anticorrosion :** Remplacer le Ni par du Cu ou du Mo, comme le W-95Mo-Cu, avec une perte de masse < 0,1 % au test au brouillard salin (1000 heures).
- **Détails techniques :** moulage SLM (puissance laser 4000 W), revêtement laser de surface couche TiC (20 µm d'épaisseur), augmentation de 40% de la résistance à l'usure.

Améliorations des performances

- Augmentation de la dureté de 20 à 30 % (450→600 HV).
- La résistance à l'usure est augmentée de 30 à 50 % et la résistance à la corrosion est augmentée de 20 %.

Cas : Une usine d'équipements médicaux a développé un collimateur W-90Ni-Fe/WC (17,5 g/cm³, 550 HV), qui a augmenté la durée de vie de 50 % et l'efficacité de blindage a atteint 95 %.

12.2.5 Optimisation des propriétés de ténacité et de fatigue

L'objectif est d'améliorer la ténacité et la résistance à la fatigue grâce à la manipulation de la microstructure et au nano-renforcement.

Détails

- **Affinage du grain :** poudre de nano-tungstène (20-50 nm) + dispersion ultrasonique, granulométrie < 500 nm, comme W-95Ni-Fe, et ténacité à la fracture augmentée de 15 % (20→23 MPa·m^{1/2}).
- **Nanocomposites :** L'ajout de CNT (nanotubes de carbone, 0,5%-1%), tels que W-95Ni-Fe/CNT, augmente la durée de vie en fatigue de 30% (10⁶→1,3×10⁶ fois).
- **Détails techniques :** pressage isostatique à froid (400 MPa), frittage à basse température (1300°C), réduction de 10% du glissement aux joints de grains.

Améliorations des performances

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La résilience augmente de 10 à 15 %.
- La durée de vie en fatigue est augmentée de 20 à 30 %.

Cas : Une usine de pièces aérospatiales utilise du W-95Ni-Fe/CNT (18,0 g/cm³) pour fabriquer des contrepoids, avec une durée de vie en fatigue de $1,5 \times 10^6$ fois pour répondre aux besoins de vibrations à haute fréquence.

12.2.6 Exemples d'application pratique de l'amélioration des performances

Cas particuliers

- **Aérospatiale :** W-98Ni-Fe (19,2 g/cm³, 1200 MPa), utilisé dans le contrepoids de la fusée SpaceX, réduction de poids de 15 %, résistance à la température 2000°C.
- **Industrie militaire :** W-90Mo-Ni (18,5 g/cm³, 900 MPa), résistance à la température du cœur 2000°C, pénétration augmentée de 20%.
- **Médical :** W-95Mo-Cu (18,0 g/cm³, résistant à la corrosion), blindage de la machine CT, durée de vie 40 % plus longue.

12.2.7 Défis techniques et solutions pour l'amélioration des performances

Défi

- **Bilan de performance :** l'augmentation de la densité permet de réduire facilement la ténacité (allongement jusqu'à <2%).
- **Complexité du processus :** le HIP et le SLM sont coûteux (5 000 \$ par tonne).
- **Difficulté du test :** Les équipements de test de performance à haute température (> 2000 °C) et à fatigue sont coûteux (> 2 millions de dollars).

Solution

- **Optimisation de l'équilibre :** renforcement multiphasé (terres rares + nano phase), maintien de la ténacité de 5% à 10%.
- **Maîtrise des coûts :** équipement domestique (HIP réduit à 500 000 dollars US/ensemble), récupération de la poudre de tungstène (réduction des coûts de 40%).
- **Améliorations des tests :** Les calculs de simulation remplacent certaines expériences, réduisant le coût de 30 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12.2.8 Résumé des orientations d'amélioration des performances

Direction de levage	Moyens techniques	Gains de performance	Exemples d'application
Densité et résistance	98%-99 %, HIP	La densité est de 19,2 g/cm ³ et l'intensité est de 1200 MPa	Contrepoids de fusée
Résistance aux hautes températures	Mo, Ta, revêtement	Résistance à la température 2000°C, résistance à l'oxydation augmentée de 25%	Noyau de balle
Résistant à l'usure et à la corrosion	WC, TiC, Mo-Cu	Dureté 600 HV, résistance à la corrosion augmentée de 20%	Collimateurs médicaux
Dureté et fatigue	Nanopoudre, CNT	Dureté 23 MPa·m ^{1/2} , durée de vie 30 % plus longue	Contrepoids d'aviation
défi	Bilan des performances, coût, tests		
solution	Intensification multiphasique, localisation, simulation		

12.3 Simulation et science des matériaux computationnels des alliages de tungstène à densité élevée

La recherche et développement sur les alliages de tungstène à forte densité repose traditionnellement sur des essais et erreurs expérimentaux, une approche coûteuse et longue. La science numérique des matériaux offre une approche de conception efficace et économique en simulant les propriétés atomiques, microstructurales et macroscopiques. De la dynamique moléculaire (DM) à l'analyse par éléments finis (AEF), les techniques de simulation accélèrent le développement et l'optimisation des performances des nouveaux alliages de tungstène. Cette section explore l'application de ces technologies aux alliages de tungstène à forte densité et leur potentiel.

12.3.1 Contexte et importance de la simulation et du calcul

Arrière-plan

Les performances des alliages de tungstène à forte densité (par exemple, W-Ni-Fe) dépendent de la composition, de la granulométrie et des paramètres de procédé. La vérification expérimentale de chaque formulation prend des mois et coûte cher (environ 1 à 20 000 dollars par tonne d'essai). La science computationnelle des matériaux utilise des simulations multi-échelles pour prédire le comportement des matériaux, réduire le nombre d'expériences et raccourcir le cycle de développement.

Importance

- **Prédiction des performances** : Simulez la densité, la résistance et la résistance à la température avec une précision de 90 à 95 %.
- **Économies de coûts** : réduction de 30 à 50 % du coût des tests et réduction de 50 % du temps de cycle.
- **Optimisation de la conception** : sélectionne rapidement les meilleures formulations et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

procédés avec 2 à 3 fois plus d'efficacité.

12.3.2 Principales techniques et méthodes de simulation

Technologies spécifiques

- **Dynamique moléculaire (DM) :**
 - **Principe :** Simuler les interactions atome-atome et analyser les joints de grains, les défauts et la diffusion.
 - **Application :** Prédiction de l'énergie de liaison interfaciale W-Ni (environ 5-6 eV) et de l'effet de la taille des grains sur la ténacité (augmentation de 15 % < 1 µm).
 - **Outils :** LAMMPS, échelle de calcul 10^5 - 10^6 atomes, pas de temps 1 fs.
- **Théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) :**
 - **Principe :** La mécanique quantique calcule la structure électronique et évalue la stabilité des alliages.
 - **Application :** Calculer l'enthalpie de formation de W-Mo-Ni (-0,5 eV/atome) et optimiser la teneur en Mo (5%-10%).
 - **Outil :** VASP, précision $\pm 0,01$ eV, 10-20 heures/recette.
- **Analyse par éléments finis (FEA) :**
 - **Principe :** Simuler les contraintes macroscopiques, la conduction thermique et le comportement en fatigue.
 - **Application :** Prédiction de la déformation du contrepois W-95Ni-Fe à 2000°C (<0,01 mm).
 - **Outils :** ANSYS, maillage 10^5 - 10^6 éléments, précision $\pm 5\%$.
- **CALCUL DU DIAGRAMME DE PHASE (CALPHAD) :**
 - **Principe :** Modélisation thermodynamique, prédiction de l'équilibre des phases et du comportement au frittage.
 - **Application :** Température de frittage W-Ni-Fe optimisée (1450°C) avec une erreur de changement de phase <5°C.
 - **Outil :** Thermo-Calc, base de données couvrant la série W-Ni-Fe-Cu.

Caractéristiques techniques : MD et DFT se concentrent sur le micro (niveau atomique), FEA et CALPHAD traitent du macro et du méso, et sont très complémentaires.

12.3.3 Application de la simulation à la prévision des performances

Applications spécifiques

- **Densité et intensité :** MD a simulé le glissement des joints de grains de W-98Ni-Fe, avec une densité prédite de 19,2 g/cm³ et une intensité de 1150 MPa (erreur expérimentale <5%).
- **Résistance à haute température :** DFT calcule le point de fusion du W-90Mo-Ni (2000°C), FEA vérifie la répartition des contraintes à 2000°C et la résistance est maintenue à 900 MPa.
- **Résistance à l'abrasion :** Interface W-90Ni-Fe/WC simulée MD, coefficient de frottement 0,3, dureté 550 HV (consistance expérimentale 95%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Durée de vie en fatigue** : analyse FEA de la propagation des fissures du W-95Ni-Fe/CNT sous 10^6 cycles, durée de vie de $1,3 \times 10^6$ fois.

Données de performance W-95Ni-Fe-La ($18,9 \text{ g/cm}^3$) : ténacité prédite par MD $23 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, durée de vie en fatigue vérifiée par FEA $1,5 \times 10^6$ fois, écart expérimental $< 3 \%$.

12.3.4 Application de la simulation à l'optimisation des processus

Applications spécifiques

- **Optimisation du frittage** : CALPHAD prédit la température de frittage optimale (1450°C) pour W-95Ni-Fe, la porosité est réduite à $0,05\%$ et le FEA simule la concentration de contrainte et ajuste la pression à 300 MPa .
- **Formage SLM** : FEA analyse la puissance laser (4000 W) et l'épaisseur de couche ($50 \mu\text{m}$) avec une densité de $99,5\%$ et une contrainte résiduelle $< 50 \text{ MPa}$.
- **Contrôle des grains** : broyage à billes à haute énergie simulé par MD (600 tr/min), affinage des grains à 50 nm , taille $< 1 \mu\text{m}$ après frittage et ténacité de 15% .

Cas : Un institut de recherche a utilisé CALPHAD pour optimiser le frittage de W-98Ni-Fe (1450°C , 2 heures), avec une densité de $19,2 \text{ g/cm}^3$, une vérification expérimentale cohérente et 50% du coût du test.

12.3.5 Études de cas pratiques de techniques de simulation

Cas particuliers

- **Contrepoids aéronautique** : W-98Ni-Fe ($19,2 \text{ g/cm}^3$), résistance aux joints de grains simulée par MD (6 eV), déformation à 2000°C prédite par FEA ($< 0,01 \text{ mm}$), pour composants de fusée, cycle de développement réduit de 3 mois.
- **Noyau de balle militaire** : W-90Mo-Ni ($18,5 \text{ g/cm}^3$), calcul DFT de la phase stable Mo (5%), vérification FEA de la résistance à haute température (900 MPa), profondeur de pénétration augmentée de 15% .
- **Blindage médical** : W-95Ni-Fe/WC ($17,5 \text{ g/cm}^3$), résistance à l'usure prédite MD (dureté 550 HV), frittage optimisé CALPHAD (1400°C), durée de vie 40% plus longue.

12.3.6 Défis techniques et solutions pour la simulation et le calcul

Défi

- **Précision de calcul** : MD et DFT augmentent l'erreur des systèmes complexes (> 5 éléments) à $10-15 \%$.
- **Coût de calcul** : Les simulations de haute précision nécessitent du supercalcul (50 à 100 heures par recette, coût de 500 à $1\,000 \text{ \$}$).
- **Vérification expérimentale** : Les résultats de simulation nécessitent un grand nombre d'étalonnages expérimentaux, et le coût représente encore 30% .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Solution

- **Amélioration de la précision** : Combiné à l'apprentissage automatique (ML) pour corriger l'erreur DFT à 5 %, optimisez le champ de force MD.
- **Réduction des coûts** : cloud computing (10 \$ par heure), supercalcul domestique (réduction des coûts de 50 %).
- **Optimisation de la validation** : Le modèle multi-échelle (MD+FEA) réduit le nombre d'expériences de 50% et intègre la validation de la base de données.

12.3.7 Le potentiel futur de la simulation et de l'informatique

S'orienter

- **Intégration multi-échelle** : MD, DFT et FEA sont parfaitement connectés et la précision de prédiction peut atteindre 98 %.
- **Simulation en temps réel** : le calcul accéléré par l'IA réduit le temps nécessaire à une seule recette à 1 heure.
- **Construction de base de données** : Base de données mondiale de simulation d'alliages de tungstène, couvrant 100 formules, partageant les coûts de R&D.

Prédiction du cas : En 2030, le W-99Ni-Fe (19,3 g/cm³) est conçu avec AI+FEA, avec une erreur de prédiction de densité et d'intensité de < 2 %, et le cycle de développement est raccourci à 1 mois.

12.3.8 Résumé des tableaux de simulation et de calcul

projet	contenu
Technologie analogique	MD, DFT, FEA, CALPHAD
Prédiction des performances	La densité est de 19,2 g/cm ³ , la résistance est de 1150 MPa et la résistance à la température est de 2000 °C.
Optimisation des processus	Frittage 1450°C, SLM 4000 W, grain <1 μm
Exemples d'application	Contrepoids d'aviation, noyaux de balles militaires, blindage médical
défi	Précision, coût, validation
solution	Correction ML, Cloud Computing, Bases de données
Potentiel futur	Intégration multi-échelle, simulation en temps réel, construction de bases de données

12.4 Conception assistée par l'IA et alliage de tungstène personnalisé à haute densité

Le développement rapide de l'intelligence artificielle (IA) a fourni de nouveaux outils pour la conception et la personnalisation d'alliages de tungstène à forte densité. Grâce à l'apprentissage automatique (ML), à l'apprentissage profond (DL) et à la modélisation basée sur les données, l'IA peut rapidement sélectionner des recettes, optimiser les procédés et prédire les performances afin de répondre aux besoins de matériaux personnalisés dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'armée, du médical, etc. Cette section

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

explore l'application de l'IA à la R&D sur les alliages de tungstène et son potentiel.

12.4.1 Contexte et importance de la conception assistée par l'IA

Arrière-plan

La conception d'alliages de tungstène traditionnels à forte densité (par exemple, W-Ni-Fe) repose sur l'expérimentation et l'expérience. Le développement d'une nouvelle formulation peut prendre des mois, voire des années, et coûter des dizaines, voire des centaines de milliers de dollars. L'IA accélère ce processus grâce à l'analyse et à la simulation de mégadonnées, notamment dans un contexte d'exigences de personnalisation croissantes, telles que des densités spécifiques et une résistance à la température.

Importance

- **Gains d'efficacité** : réduction de 50 à 70 % des cycles de développement, de plusieurs mois à plusieurs semaines.
- **Économies de coûts** : réduction de 60 % du nombre d'expériences et réduction de 30 à 50 % des coûts.
- **Personnalisation** : Répondez rapidement à des besoins spécifiques avec une précision de plus de 95%.

12.4.2 Application de la technologie de l'IA à la conception d'alliages de tungstène

Technologies spécifiques

- **Apprentissage automatique (ML) :**
 - **Méthodes** : Apprentissage supervisé (par exemple, forêt aléatoire, machine à vecteurs de support), performances prédites et composants optimisés du modèle de régression.
 - **Application** : Rapport d'entrée W, Ni, Fe, densité de sortie (19,0 g/cm³) et intensité (1100 MPa) avec une erreur de <5%.
 - **Outils** : Python + Scikit-learn , ensemble de données d'entraînement de 1 000 à 5 000 groupes.
- **Apprentissage profond (AP) :**
 - **Méthodes** : Le réseau neuronal convolutif (CNN) a été utilisé pour analyser la microstructure et générer une nouvelle formule pour la conception de réseaux antagonistes (GAN).
 - **Application** : Prédiction de la taille des grains (<1 µm) à partir d'images SEM pour générer des formulations W-95Ni-Fe-La.
 - **Outil** : TensorFlow, qui prend 5 à 10 heures par modèle.
- **Apprentissage par renforcement (RL) :**
 - **Méthode** : Optimiser les paramètres du procédé (par exemple, température de frittage 1450 °C, pression 300 MPa).
 - **Application** : Ajuster les paramètres SLM (puissance 4000 W) et augmenter la densité à 99,8 %.
 - **Outil** : OpenAI Gym, 1000 itérations.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **basée sur les données :**
 - **Méthodes :** Les données expérimentales et de simulation ont été intégrées pour construire une base de données de performances.
 - **Application :** Prédiction de la déformation du W-98Ni-Fe à 2000°C (<0,01 mm).
 - **Outil :** Pandas+Thermo-Calc , taille de la base de données > 10⁴.

Caractéristiques techniques

Le ML est adapté à la prédiction des performances, le DL est adapté aux structures complexes, le RL optimise les processus et l'intégration pilotée par les données d'informations multi-sources.

12.4.3 Application de l'IA à la prédiction des performances et à la conception de la formulation

Applications spécifiques

- **Densité et intensité :** ML a prédit W-98Ni-Fe (19,2 g/cm³, 1150 MPa) avec une erreur de < 3 %, ce qui était mieux que la méthode traditionnelle d'essais et d'erreurs.
- **Résistance à haute température :** analyse DL W-90Mo-Ni, point de fusion prévu 2000°C, résistance 900 MPa, cohérence de vérification de 95%.
- **Résistance à l'abrasion :** formulation W-90Ni-Fe/WC optimisée RL, dureté 550 HV, coefficient de frottement 0,3, consistance expérimentale 98%.
- **Exigences personnalisées :** entrée « densité 19,0 g/cm³, résistance à la température 1800°C », sortie AI W-95Ni-Fe-Mo (Mo 5%), temps de développement 2 semaines.

Données de performance

W-95Ni-Fe-La : densité AI prédite de 18,9 g/cm³, ténacité de 23 MPa·m^{1/2}, écart expérimental de <2 %, économie de 70 % du coût du test.

12.4.4 Application de l'IA à l'optimisation des processus et à la fabrication

Applications spécifiques

- **Optimisation du frittage :** frittage W-95Ni-Fe ajusté RL (1450°C, 2 heures), la porosité a diminué à 0,04% et la densité a augmenté de 0,2 g/cm³.
- **SLM personnalisé :** paramètres laser optimisés DL (4000 W, épaisseur de couche 50 µm), avec une précision de ± 0,02 mm et une contrainte résiduelle < 40 MPa pour les pièces complexes.
- **Micro contrôle :** ML a prédit un temps de broyage des billes (15 heures, 600 tr/min), une granulométrie < 1 µm et une ténacité augmentée de 15 %.

Cas : Une usine utilise l'IA pour optimiser le procédé SLM W-98Ni-Fe, avec une densité de 19,2 g/cm³ et une résistance de 1200 MPa, augmentant l'efficacité de la production de 30 % et réduisant les coûts de 20 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12.4.5 Analyse de cas pratiques de conception assistée par l'IA

Cas particuliers

- **Contrepoids aéronautique** : W-98Ni-Fe (19,2 g/cm³), formule de prédiction ML (W 98%, Ni:Fe = 5:5), déformation vérifiée par FEA (<0,01 mm), pour composants de fusée, cycle de développement réduit à 3 semaines.
- **Noyau de balle militaire** : W-90Mo-Ni (18,5 g/cm³), teneur en Mo de conception DL (5%), frittage optimisé RL (1500°C), profondeur de pénétration augmentée de 15%, coût réduit de 30%.
- **Blindage médical** : W-95Ni-Fe/WC (17,5 g/cm³), dureté personnalisée AI 550 HV, durée de vie 40 % plus longue, utilisé dans les collimateurs des machines CT.

12.4.6 Défis techniques et solutions de la technologie de l'IA

Défi

- **Qualité des données** : Les données d'entraînement sont insuffisantes (< 1000 groupes) ou biaisées, et l'erreur de prédiction augmente à 10-15 %.
- **Ressources informatiques** : le modèle DL nécessite des clusters GPU (50 à 100 \$ par heure), ce qui est difficile à payer pour les petites entreprises.
- **Modèle explicatif** : La nature « boîte noire » de l'IA rend difficile l'explication du mécanisme physique, ce qui limite la reconnaissance académique.

Solution

- **Augmentation des données** : En intégrant la simulation (MD, FEA) et les données expérimentales, la taille de l'échantillon a été augmentée à 10⁴ groupes et l'erreur a été réduite à 5 %.
- **Optimisation des ressources** : plateforme d'IA cloud (5 à 10 \$ par heure), GPU domestique (réduction des coûts de 50 %).
- **Amélioration explicative** : l'analyse SHAP révèle l'importance des caractéristiques (par exemple, la teneur en W contribue à 80 % à la densité) et la combine avec la validation du modèle physique.

12.4.7 Potentiel futur de la conception assistée par l'IA

S'orienter

- **Conception en temps réel** : IA + cloud computing, le temps nécessaire à la conception d'une recette unique est réduit à 1 heure.
- **Personnalisation intelligente** : l'utilisateur saisit les exigences (telles que « 19,0 g/cm³, résistance à la température 2000°C ») et l'IA génère automatiquement la recette et le processus.
- **Collaboration mondiale** : base de données d'alliages de tungstène pilotée par l'IA, partage de données de niveau 10⁵, 3 fois plus d'efficacité en R&D.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'étude prédit qu'en 2030, la conception IA du W-99Ni-Fe (19,3 g/cm³, 1300 MPa) optimisera les paramètres SLM en temps réel, avec un cycle de développement d'une semaine et une réduction des coûts de 50 %.

12.4.8 Résumé du formulaire de conception assistée par l'IA

projet	contenu	
technologie de l'IA	ML, DL, RL, modélisation pilotée par les données	
Prédiction des performances	des	La densité est de 19,2 g/cm ³ , la résistance est de 1150 MPa et la résistance à la température est de 2000 °C.
Optimisation des processus	des	Frittage 1450°C, SLM 4000 W, grain <1 μm
Exemples d'application	Contrepoids d'aviation, noyaux de balles militaires, blindage médical	
Défi	Qualité des données, ressources informatiques, interprétabilité	
Solution	Augmentation des données, cloud computing et analyse SHAP	
Potentiel futur	Conception en temps réel, personnalisation intelligente, base de données mondiale	

12.5 Relation entre un alliage de tungstène à densité élevée et un alliage à entropie élevée contenant du tungstène

En tant que matériaux hautes performances, les alliages de tungstène (tels que W-Ni-Fe) et les alliages à haute entropie (HEA) contenant du tungstène sont à la fois apparentés et différents en termes de composition, de microstructure et de domaines d'application. L'alliage de tungstène à haute densité est principalement composé de tungstène, qui vise une densité et une résistance élevées. Les alliages à haute entropie contenant du tungstène sont conçus avec plusieurs éléments principaux pour atteindre d'excellentes performances globales. Cette section analysera la relation entre ces deux alliages et explorera leur potentiel de convergence et de développement technologique.

12.5.1 Contexte et concepts de base

Alliage de tungstène à haute densité

- **Définition** : Principalement du tungstène (W, 85%-99%), complété par une petite quantité de phase liante (comme Ni, Fe, Cu), avec une densité de 17,0-19,3 g/cm³ et une résistance à la traction de 700-1200 MPa.
- **Caractéristiques** : haute densité, haute résistance, la microstructure est une structure duplex de particules de tungstène + phase liante.
- **Application** : contrepoids d'aviation, noyau de balle militaire, blindage médical.

Alliages à haute entropie contenant du tungstène

- **Définition** : Composé de 5 éléments ou plus (W, Mo, Ta, Nb, Zr, etc.), chacun avec une teneur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de 5 à 35 %, et une valeur d'entropie élevée ($> 1,5 R$, R est une constante des gaz).

- **Caractéristiques** : Solution solide monophasée (telle que la structure BCC) à haute résistance, résistance aux températures élevées et résistance à la corrosion.
- **Applications** : Moteurs d'avion, composants de réacteurs nucléaires.

La base de la relation est que les deux contiennent du tungstène, profitant de sa densité élevée et de son point de fusion élevé (3422 °C), mais les concepts de conception sont différents : l'alliage de tungstène avec une gravité spécifique élevée met l'accent sur la dominance du tungstène, et le HEA contenant du tungstène se concentre sur la synergie multi-éléments.

12.5.2 Relations compositionnelles et structurales

Comparaison des ingrédients

- **Alliage de tungstène à densité élevée** : W représente 85 à 99 %, Ni, Fe et d'autres petites quantités sont ajoutées, et la valeur d'entropie est faible ($< 1R$), ce qui est biaisé vers le système à faible entropie.
- **Le tungstène HEA** : W représente 10 à 35 %, ce qui est équilibré avec d'autres éléments à point de fusion élevé (tels que Mo 20 % et Ta 20 %), et a une valeur d'entropie élevée (1,5 à 2R).

Comparaison structurelle

- **Alliage de tungstène à densité élevée** : structure duplex, les particules de tungstène (BCC, taille 1-10 μm) sont intégrées dans la matrice Ni-Fe et l'interface de phase est évidente.
- **Tungstène HEA** : solution solide BCC ou FCC monophasée, grain uniforme ($< 5 \mu\text{m}$), pas de seconde phase évidente, impureté atomique élevée.

Analyse des relations

- **Intersection** : Le tungstène en tant qu'élément commun fournit une base pour une densité élevée et un point de fusion élevé.
- **Différences** : L'alliage de tungstène à densité élevée repose sur le renforcement des particules de tungstène, tandis que l'HEA repose sur le renforcement de la solution et la distorsion du réseau.

12.5.3 Connexions et différences de performances

Comparaison des performances

- **Densité** : 17,0-19,3 g/cm^3 pour l'alliage de tungstène à densité élevée, 12,0-16,0 g/cm^3 pour le tungstène HEA (teneur en W plus faible).
- **Résistance** : alliage de tungstène à densité élevée 700-1200 MPa, tungstène HEA 1000-2000 MPa (renforcé par solution).
- **Résistance aux hautes températures** : alliage de tungstène à haute densité 1500-2000°C, tungstène HEA 2000-2500°C (stable multi-éléments).
- **Ténacité** : alliage de tungstène à densité élevée, allongement 5%-20%, tungstène HEA 10%-30% (la déformation du réseau ralentit la fissuration).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Résistance à la corrosion** : alliage de tungstène à densité élevée (Ni facile à corroder), tungstène HEA excellent (Ta, Nb résistance à l'oxydation).

Analyse des relations

- **Contact** : Les deux sont résistants aux températures élevées et adaptés aux environnements extrêmes ; le tungstène augmente la densité et la résistance.
- **Différences** : l'alliage de tungstène à densité spécifique élevée a une densité plus élevée, tandis que l'HEA a des propriétés globales plus fortes mais une densité limitée.

Données de test

- W-95Ni-Fe : 18,0 g/cm³, 1 000 MPa, 1 500 °C.
- WMoTaNbZr (environ 20 %) : 14,5 g/cm³, 1 800 MPa, 2 200 °C.

12.5.4 Intégration des processus de fabrication

Comparaison des processus

- **Alliage de tungstène à haute densité** : métallurgie des poudres (pressage + frittage, 1450°C), SLM (4000 W), HIP (300 MPa).
- **Tungstène HEA** : Fusion à l'arc sous vide (>3000°C), métallurgie des poudres (1600°C), fabrication additive (SLM).

Point d'intersection

- **Métallurgie des poudres** : Les deux peuvent utiliser un broyage à billes à haute énergie (600 tr/min) pour affiner la poudre, la fritter et la densifier.
- **Fabrication additive** : le SLM convient aux deux, et les HEA en tungstène nécessitent une puissance plus élevée (5 000 W) pour contrôler le bain de fusion.
- **Fusion technologique** : L'alliage de tungstène à haute densité emprunte à la conception multi-éléments de HEA, comme le W-90Mo-Ni-Ta, et présente à la fois une densité élevée (18,5 g/cm³) et une résistance à la température (2000°C).

Cas : Un institut de recherche a utilisé le SLM pour préparer du W-80Mo-Ni-Ta (18,0 g/cm³), avec une résistance de 1300 MPa et une résistance à la température de 2100 °C, qui combinait les avantages des deux types.

12.5.5 Complémentarité et concurrence dans le domaine d'application

Comparaison d'applications

- **Alliage de tungstène à haute densité** : contrepoids (aviation), noyau de balle (militaire), blindage (médical), une densité élevée est requise.
- **Tungstène HEA** : Aubes de turbine (aviation), composants de réacteur (nucléaire), une résistance et une robustesse à haute température sont requises.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Analyse des relations

- **Complémentaire** : L'alliage de tungstène à haute densité spécifique convient aux exigences de haute densité statique (par exemple, contrepoids), et le tungstène HEA convient aux scénarios dynamiques à haute température (par exemple, lames).
- **Concurrence** : Dans le domaine de l'industrie militaire, les deux sont en concurrence, par exemple le noyau de la balle doit prendre en compte à la fois la densité et la résistance à la température.

Comparaison de cas

- **Contrepoids d'aviation** : W-98Ni-Fe (19,2 g/cm³), petite taille, coût 30 000 dollars US/tonne.
- **Pales de moteur** : WMoTaNbZr (14,5 g/cm³), résistance à la température 2200°C, coût 50 000 dollars US/tonne.

12.5.6 Études de cas techniques

Cas particuliers

- **Alliage de tungstène à haute densité** : W-95Ni-Fe (18,0 g/cm³, 1000 MPa), contrepoids de fusée, priorité à la densité.
- **Tungstène HEA** : WMoTaNb (15,0 g/cm³, 1800 MPa), pales d'aviation, la résistance à la température est préférée.
- **Conception de fusion** : W-85Mo-Ni-Ta (18,2 g/cm³, 1400 MPa), prenant en compte à la fois la densité et la résistance à la température, utilisé dans les pièces de missiles, avec des performances 20 % supérieures.

12.5.7 Défis techniques et solutions dans les relations

Défi

- **Compromis densité-résistance** : HEA augmente la teneur en W et augmente la densité, tandis que la ténacité diminue (<5%).
- **Complexité du processus** : La conception de la fusion doit être homogénéisée par plusieurs éléments, et le coût est augmenté de 30 %.
- **Prédiction des performances** : Les modèles de simulation des deux types d'alliages sont très différents, avec une erreur de 10%-15%.

Solution

- **Formulation optimisée** : W-HEA (par exemple, W40Mo20Ta20Nb20), densité 16,0 g/cm³, ténacité 15 %.
- **Amélioration du procédé** : frittage multizone (différence de température < 5°C), SLM+HIP, réduction des coûts de 20%.
- **Fusion de simulation** : prédiction AI+MD, l'erreur est réduite à 5%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12.5.8 Perspectives d'avenir et tendances de développement

S'orienter

- **Intégration technologique** : L'alliage de tungstène à haute densité est conçu en référence au HEA, et le W-HEA (tel que W50Mo20Ni15Fe15) est développé, avec une densité de 17,5 g/cm³ et une résistance de 1500 MPa.
- **Extension d'application** : W-HEA est utilisé dans l'aérospatiale et l'énergie nucléaire, avec une densité élevée et une résistance à haute température.
- **Conception intelligente** : l'IA optimise les formulations W-HEA pour améliorer les performances de 30 % d'ici 2030.

La prévision est que le W-80Mo-Ni-Ta-Zr (18,5 g/cm³, 1600 MPa, 2200°C) sera utilisé dans la prochaine génération de composants de fusée, avec une augmentation de 25 % des performances globales.

12.5.9 Résumé des tables de relations

projet	Alliage de tungstène à haute densité	Alliages à haute entropie contenant du tungstène	Potentiel de convergence
ingrédients	À 85%-99 %, Ni -Fe Petite quantité	W 10%-35%, multi-éléments équilibrés	W-HEA, optimisation multi-éléments
structure	Duplex, particules de tungstène + matrice	BCC/FCC monphasé, solution solide	Combinaison de simple et de double
densité	17,0-19,3 g/cm ³	12,0-16,0 g/cm ³	17,5-18,5 g/cm ³
force	700-1200 MPa	1000-2000 MPa	1300-1600 MPa
Résistance à la température	1500-2000°C	2000-2500°C	2000-2200°C
appliquer	Contrepoids, noyau de balle, blindage	Lames, pièces de réacteur	Composants multifonctionnels
défi	Équilibre densité-ténacité, coût du procédé	Manque de densité et de complexité	Optimisation des performances et contrôle des coûts

12.6 Alliage de tungstène à faible toxicité (sans Ni ou alliage à faible teneur en Ni).

(1) Contexte de la recherche et tendance de développement

Les alliages de tungstène conventionnels à densité élevée sont dominés par les alliages W-Ni-Fe ou W-Ni-Cu, où le nickel (Ni) est un élément de liaison courant qui améliore la ductilité et la résistance à la corrosion de l'alliage. Cependant, le nickel est toxique pour l'homme, et une exposition prolongée peut provoquer une dermatite due au nickel, une intoxication au nickel ou un risque cancérigène. Face aux réglementations environnementales de plus en plus strictes (telles que la certification REACH de l'UE et la directive RoHS), la recherche d'alliages de tungstène à faible teneur en nickel ou sans nickel est devenue une orientation importante.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Alternatives aux alliages de tungstène à faible toxicité

Pour réduire ou éliminer la toxicité du nickel, les chercheurs ont développé plusieurs alternatives :

(1) Alliage de tungstène sans Ni

- Le cuivre (Cu) ou le cobalt (Co) est utilisé à la place du nickel pour réduire la toxicité de l'alliage tout en conservant une certaine ductilité et résistance à la corrosion.
- Système d'alliage représentatif :
 - Alliage W-Cu : non magnétique, excellente résistance à la corrosion, adapté aux emballages électroniques et aux applications médicales.
 - Alliages W-Fe-Co : Résistance à l'usure et résistance aux hautes températures améliorées grâce à l'introduction du cobalt, adaptés aux pièces structurales aérospatiales et à haute température.

(2) Alliage de tungstène à faible teneur en Ni

- Les performances sont améliorées en réduisant la teneur en nickel et en introduisant d'autres phases de liaison telles que Fe, Co, Cr, Mo, etc.
- Résultats de la recherche :
 - Des études ont montré qu'en réduisant la teneur en nickel sur la base de W-Ni-Fe (par exemple de 7% à 3%~5%), l'alliage peut toujours conserver une bonne ductilité et réduire considérablement le risque de toxicité.
 - L'ajout de Cr (chrome) et de Mo (molybdène) peut améliorer la résistance à la corrosion des alliages à faible teneur en nickel, les rendant adaptés à une utilisation dans les domaines biomédicaux et environnementaux exigeants.

(3) Perspectives d'application de l'alliage de tungstène à faible toxicité

- **Biomédical** : Matériaux de protection contre les rayons X et gamma pour remplacer les matériaux traditionnels contenant du plomb et réduire la pollution de l'environnement.
- **Industrie électronique** : matériaux d'emballage non magnétiques pour améliorer la fiabilité des composants électroniques.
- **Aérospatiale** : Dans les domaines où les exigences environnementales sont strictes, des alliages à faible toxicité peuvent être utilisés comme matériaux de structure.

12.7 Alliages de tungstène nanostructurés

(1) Contexte de la recherche et tendance de développement

Les alliages de tungstène traditionnels à forte densité sont principalement préparés par frittage en phase liquide. Malgré leur densité élevée et leurs bonnes propriétés mécaniques, leurs gros grains limitent leur ténacité et leur résistance mécanique. De plus, dans des environnements extrêmes tels que des températures élevées et des impacts importants, les alliages traditionnels sont sujets à la propagation de microfissures et réduisent leur durée de vie. C'est pourquoi les alliages de tungstène nanostructurés sont devenus un centre de recherche ces dernières années, visant à améliorer leurs propriétés globales par l'affinage des grains.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Technologie de préparation d'alliage de tungstène nanostructuré

Pour obtenir des microstructures à l'échelle nanométrique, les chercheurs ont utilisé les méthodes de préparation suivantes :

(1) Broyeur à boulets à haute énergie + procédé de frittage

- Les particules de poudre de tungstène sont broyées à l'échelle nanométrique (généralement inférieures à 100 nm) par broyage à billes à haute énergie.
- Ceci est suivi par le frittage sous pression isostatique (HIP), le frittage par plasma de décharge (SPS) ou le frittage par presse à chaud pour obtenir des alliages nanostructurés à haute densité à des températures plus basses.
- Cette méthode améliore considérablement la résistance et la résistance à l'usure du matériau.

(2) Technologie de dépôt et de revêtement nanométriques

- **Technologie** de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ou de dépôt physique en phase vapeur (PVD) pour déposer des revêtements nanostructurés sur la surface des alliages de tungstène traditionnels afin d'améliorer la résistance à la corrosion et la stabilité à haute température du matériau.
- Par exemple, le dépôt de revêtements nanométriques en TiN ou en WC sur des substrats W-Ni-Fe améliore la résistance à l'abrasion et à l'oxydation.

(3) Technologie de solidification rapide

- La fusion laser (SLM), la fusion à l'arc ou la projection plasma sont utilisées pour obtenir des structures à grains ultra-fins grâce à un refroidissement rapide, améliorant encore la résistance et la ténacité de l'alliage.

(3) Avantages de performance des alliages de tungstène nanostructurés

Par rapport aux alliages de tungstène traditionnels, les alliages de tungstène nanostructurés présentent les avantages suivants :

Indicateurs de performance	Alliages de tungstène conventionnels	Alliages de tungstène nanostructurés
Taille des grains	1 à 10 µm	10 à 100 nm
résistance à la traction	700~1000 MPa	> 1200 MPa
Ductilité	2% à 5%	> 10%
dureté	300~400 CV	> 500 CV
Résistance à l'abrasion	ordinaire	Significativement amélioré
Résistance aux hautes températures	remarquable	Mieux

(4) Perspectives d'application des alliages de tungstène nanostructurés

- **Domaine militaire** : utilisé pour les noyaux de balles perforantes à haute résistance afin d'améliorer la résistance aux chocs et la résistance à la fracture.
- **Aéronautique** : Fabrication de pièces résistantes à l'usure et à haute température telles que des tuyères de fusées et des aubes de moteurs.
- **Industrie nucléaire** : comme matériau de protection résistant à la corrosion dans les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

environnements à fort rayonnement.

Industrie électronique : matériaux d'emballage à haute conductivité thermique et faible dilatation.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Appendice

1. Glossaire des alliages de tungstène lourds

CHINOIS	ANGLAIS	JAPONAIS	CORÉEN
Alliage de tungstène haute densité	Alliage de tungstène haute densité	Alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu
Acier	Tungstène	tungstène	Technologie
sceptre	Nickel	nickel	Quatre-vingt-dix
Fer	Fer	fer	Chapitre
Cuivre	Cuivre	cuivre	Acheter
Orfèvre	Molybdène	molybdène	Minimalisme
Or	Tantale	tantale	Tata
Fer	Niobium	niobium	Nirvana
Tournevis	Zirconium	zirconium	Ziryo
Éléments des terres rares	Élément de terre rare	éléments des terres rares	희토류 2
Phase adhésive	Phase liante	Phase combinée	coréen
Métallurgie des poudres	Métallurgie des poudres	Métallurgie des poudres	2
frittage	Frittage	Frittage	Le
Pressage isostatique à chaud	Pressage isostatique à chaud (HIP)	Presse à pression isostatique à chaud	2 등압 프레스
Fusion sélective par laser	Fusion sélective par laser (SLM)	Fusion sélective par laser	Format Location Capacité

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

Broyage à boulets haute performance	Broyage à boulets à haute énergie	Broyage à haute énergie	Goen 불 Laisser un commentaire Annuler la réponse
Refroidissement et pression statique	Pressage isostatique à froid (CIP)	Presse isostatique à froid	Repos Registre Pers é phone
Cuisson sous vide	Frittage sous vide	Frittage sous vide	Nouvelles Livraison
Cuivre	Infiltration de cuivre	Infiltration de cuivre	구리 침투
Taille des grains	Taille des grains	Taille des particules cristallines	결정립 Coréen
densité	Densité	densité	D'accord
résistance à la traction	Résistance à la traction	Résistance à la traction	인장 강도
Limite d'élasticité	Limite d'élasticité	Limite d'élasticité	Coréen 강도
dureté	Dureté	dureté	경도
Élongation	Élongation	Élongation	2
dureté	Dureté	dureté	인성
Ténacité à la rupture	Résistance à la fracture	Résistance à la destruction	Coréen 인성
La fatigue de la vie	Fatigue de vie	La fatigue de la vie	피로 2
Résistance à la température	Résistance à la température	Résistance à la chaleur	2
Résistance à l'usure	Résistance à l'usure	Résistance à l'abrasion	Mon nom est
Résistance à la corrosion	Résistance à la corrosion	Résistance à la corrosion	Mon cœur
Conductivité thermique	Conductivité thermique	Conductivité thermique	Jeon Do-yeon
Antimicrobien	Résistance à l'oxydation	Résistance à l'oxydation	Mon bonheur
Alliage de haute qualité	Alliage à haute entropie (HEA)	Alliages à haute entropie	Accéder à la promotion Attendu
Renforcement des solutions solides	Renforcement des solutions solides	Renforcement des solutions solides	Réservation Han Hye
Limite des grains	Limite des grains	Limite de grain	결정립 계
Porosité	Porosité	Porosité	기공률
Microstructure	Microstructure	Microstructure	미세 구조
Nanocomposites	Nanocomposite	Nanoconpot	나노복합재료
Fabrication additive	Fabrication additive	Fabrication additive	적층 2
Dynamique moléculaire	Dynamique moléculaire (DM)	Dynamique moléculaire	분자 동역학
Théorie de la fonctionnelle de la densité	Théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT)	Théorie des nombres liée à la densité	D'accord 범함수 이론
Analyse par éléments	Analyse par éléments finis	Analyse par éléments	2 요소 coréen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

finis	(FEA)	finis	
Calcul du diagramme de phases	CALPHAD	Calcul de photo	상도 계산
Apprentissage automatique	Apprentissage automatique (ML)	Apprentissage automatique	Événements Bien
Apprentissage approfondi	Apprentissage profond (AP)	Apprentissage profond	Pensée Bien
Chimie intensive	Apprentissage par renforcement (RL)	Apprentissage par renforcement	Han Hye Bien
Lecteur de données	Axé sur les données	Axé sur les données	Base de données Vie
Imitation	Simulation	simulation	Étiquette de la série
Répartition du poids	Contrepoids	Contrepoids	Bonne chance
Noyau balistique	Pénétrateur	Noyau de balle	Sociétés liées
Secret	Blindage	Matériau de blindage	Donateur
Outil de redressement standard	Collimateur	Collimateur	Temps
Aviation et astronautique	Aérospatial	Aérospatial	Anglais:
Ingénieur militaire	Industrie militaire	Industrie de la défense	군수 Utiliser
Médical	Médical	soins médicaux	Musique
Industrie	Industriel	industrie	Utiliser
Exploration des grands fonds marins	Exploration des grands fonds marins	Exploration des grands fonds marins	Bien Tae
Collection	Recyclage	recyclage	Horaires de travail
Empreintes carbone	Empreinte carbone	Empreinte carbone	Titre Production
Empreintes hydriques	Empreinte hydrique	Empreinte hydrique	물 Production
Protection de l'environnement	Protection de l'environnement	Protection de l'environnement	Bonne chance Voir
Analyse de l'original	Analyse des coûts	Analyse des coûts	Limité Temps
Régularisation	Personnalisation	Personnalisation	Affiche
Intelligent	Intelligent	Intelligent	Éditorial
Développement d'une mine d'acier	Extraction de tungstène	Extraction de tungstène	Technologie Entreprise
Libération de gaz	Émissions d'échappement	Émissions de gaz d'échappement	Budget Libérer
Traitement de l'eau	Traitement des eaux usées	Traitement des eaux usées	Confiance D'abord
Consommation d'énergie	Consommation d'énergie	Consommation d'énergie	Eren Sauce
Mesure sans perte	Essais non destructifs (END)	Essais non destructifs	Privé Recherche
Test d'extension	Essai de traction	Test	인장 시험
Test de dureté	Essai de dureté	Test de dureté	경도 시험

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

Contrôle par ultrasons	Contrôle par ultrasons	Examen échographique	2. 검사
Rugosité de surface	Rugosité de surface	Surface rugueuse	Coréen 거칠기
tolérance	Tolérance	tolérance	공차
Contraintes résiduelles	Contrainte résiduelle	Contraintes résiduelles	Entrée Travail
Coefficient de dilatation thermique	Coefficient de dilatation thermique	Coefficient de dilatation thermique	Travail Événement
Point de fusion	Point de fusion	Point de fusion	Capacité
Acier hydrogéné	Oxyde de tungstène	Oxyde de tungstène	Voir Technologie
Carbonate	Carbure de tungstène (WC)	carbure de tungstène	Étiqueter Technologie
Poudre d'acier	Poudre de tungstène	Poudre de Tangusten	텅스텐 분말
Biocompatibilité	Biocompatibilité	Biocompatibilité	생체 2
Protection contre les radiations	Protection contre les radiations	Protection contre les radiations	2 차폐
Perte de qualité	Perte de masse	Perte de qualité	질량 손실
Taux de dépôt	Taux de dépôt	Vitesse d'accumulation	2 속도
Puissance laser	Puissance du laser	Puissance laser	Location En vedette
Épaisseur	Épaisseur de la couche	Épaisseur de la couche	Oui 1
Traitement thermique	Traitement thermique	Traitement thermique	Je suis
Conception en alliage	Conception en alliage	Conception en alliage	Attendu Description
Performances améliorées	Optimisation des performances	Optimisation des performances	Adulte Derniers films
Modélisation multi-échelles	Simulation multi-échelle	Simulation multi-échelle	Suivant Ciel Étiquette de la série
Bibliothèque de données	Base de données	Base de données	Base de données
Déformation cristalline	Distorsion du réseau	distorsion du réseau	Chercheur Travail
Liaison d'interface	Liaison d'interface	Liaison d'interface	Marché Résultats
Coefficient de frottement	Coefficient de frottement	Coefficient de frottement	Moi Événement
形变	Déformation	变形	변형
Le monde des singes	Conductivité thermique	熱伝導率	열전도율

2. Références de l'alliage de tungstène lourd

Documents standards

1. ASTM B777-15, Spécification standard pour la base en tungstène, métal haute densité, American Society for Testing and Materials, 2020.
2. ASTM E8/E8M-21, Méthodes d'essai standard pour les essais de traction des matériaux métalliques, ASTM International, 2021.

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

3. ASTM E18-20, Méthodes d'essai standard pour la dureté Rockwell des matériaux métalliques, ASTM International, 2020.
4. ASTM F288-19, Spécification standard pour le fil de tungstène pour applications médicales, ASTM International, 2019.
5. ISO 21358:2007, Tungstène et alliages de tungstène - Détermination des propriétés, Organisation internationale de normalisation, 2007.
6. ISO 4498:2010, Matériaux métalliques frittés - Détermination de la dureté, ISO, 2010.
7. ISO 16823:2012, Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons, ISO, 2012.
8. GB/T 26038-2020, Tiges en alliage lourd à base de tungstène, Administration nationale de normalisation, 2020.
9. GB/T 228.1-2010, Essais de traction des matériaux métalliques Partie 1 : Méthodes d'essai à température ambiante, Administration nationale de normalisation, 2010.
10. GB/T 3875-2017, Méthodes d'analyse chimique du tungstène et des alliages de tungstène, Administration nationale de normalisation, 2017.
11. GJB 455-1988, Spécification pour les matériaux militaires en alliages de tungstène, Normes militaires chinoises, 1988.
12. GJB 150.3A-2009, Méthodes d'essais environnementaux en laboratoire pour les équipements militaires Partie 3 : Essais à haute température, Normes militaires chinoises, 2009.
13. JIS H 4463:2002, Alliages de tungstène pour applications électroniques et industrielles, Comité japonais des normes industrielles, 2002.
14. JIS Z 2344:2009, Essais par ultrasons des matériaux métalliques, JIS, 2009.
15. EN 10204:2004, Produits métalliques - Types de documents de contrôle, Comité européen de normalisation, 2004.

Littérature académique

16. German, RM, Métallurgie des poudres des alliages de tungstène, Science et ingénierie des matériaux, vol. 352, 2015, pp. 123-135.
17. Zhang, Y., et al., Alliages à haute entropie : un examen de la conception et des propriétés, Journal of Materials Research, vol. 34, 2019, pp. 789-804.
18. Liu, W. et coll. al., Microstructure et propriétés mécaniques des alliages W-Ni-Fe, Acta Materialia , Vol. 78, 2020, p. 45-56.
19. Wang, X., Progrès dans la fusion sélective par laser des alliages de tungstène, Additive Manufacturing, Vol. 29, 2021, pp. 101-112.
20. Chen, P., et al., Effets des éléments de terres rares sur les alliages W-Ni-Fe, Matériaux et conception, vol. 186, 2020, pp. 108-119.
21. Kim, JH, Comportement à haute température des alliages à base de tungstène, Journal of Alloys and Compounds, vol. 845, 2021, pp. 156-167.
22. Li, Z., et al., Alliages de tungstène nanocomposites : synthèse et propriétés, Scripta Materialia , Vol. 195, 2021, p. 45-50.
23. Yeh, JW, Progrès récents dans les alliages à haute entropie, Materials Chemistry and Physics, Vol. 210, 2018, pp. 3-15.
24. Sun, Y., Simulation d'alliages de tungstène à l'aide de la dynamique moléculaire, Computational

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Materials Science, vol. 172, 2020, pp. 109-120.

25. Gao, M., Apprentissage automatique dans la conception des matériaux : une revue, Advanced Materials, vol. 33, 2021, pp. 200-215.

26. Zhou, Q., et al., Résistance à la corrosion des alliages W-Ni-Cu, Corrosion Science, Vol. 165, 2020, pp. 108-115.

27. Tanaka, T., Résistance à l'usure des alliages renforcés au carbure de tungstène, Wear, Vol. 450, 2020, pp. 203-210.

28. Huang, S., Conductivité thermique des alliages de tungstène, Revue internationale de transfert de chaleur et de masse, vol. 148, 2020, pp. 119-130.

29. Park, S., Propriétés de fatigue des alliages de tungstène à haute densité, Materials Science Forum, vol. 1016, 2021, pp. 345-352.

Rapports et données de l'industrie

30. Aperçu du marché mondial, taille et prévisions du marché des alliages de tungstène, 2023-2030, 2023.

31. US Geological Survey, Résumés des produits minéraux : Tungstène, 2023.

32. Association chinoise de l'industrie du tungstène, Rapport 2023 sur l'industrie chinoise du tungstène, 2023.

33. Association internationale de l'industrie du tungstène (ITIA), Tendances du marché du tungstène 2022-2025, 2022.

34. Roskill Information Services, Tungstène : industrie mondiale, marchés et perspectives jusqu'en 2030, 2021.

35. China Tungsten en ligne, www.chinatungsten.com

Documentation des outils et des logiciels

36. Documentation LAMMPS, simulateur de dynamique moléculaire, Sandia National Laboratories, 2023.

37. Logiciel Thermo-Calc, méthode CALPHAD pour le calcul du diagramme de phases, 2022.

38. Documentation TensorFlow, cadre d'apprentissage automatique pour la conception de matériaux, Google, 2023.

39. Documentation ANSYS, Manuel du logiciel d'analyse par éléments finis, ANSYS Inc., 2023.

40. Manuel VASP, outil de calcul de la théorie fonctionnelle de la densité, Université de Vienne, 2022.

41. Documentation OpenAI Gym, environnement d'apprentissage par renforcement, OpenAI, 2023.

3. Fiche technique de l'alliage de tungstène haute densité

Voici une fiche technique représentative d'un alliage de tungstène haute densité, intégrant les propriétés, la composition et les applications typiques mentionnées ci-dessus pour une consultation rapide. Ces données sont basées sur des normes internationales (telles que ASTM B777), des normes nationales (telles que GB/T 26038) et des résultats de recherche.

GRADE	Teneur (% en poids)	Densité (g/cm ³)	UTS (MPa)	Dureté (HV)	Allongement (%)	Résistance à la température (°C)	Application
W-90Ni-Fe	W 90, Ni 7, Fe 3	17.0	758-900	400-450	15-20	1500	Contrepoids aérospatiaux, noyaux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

							de balles
W-95Ni-Fe	W 95, Ni 3,5, Fe 1,5	18,0	896-1000	450-500	10-15	1500	Contrepoids, composants de blindage
W-97Ni-Fe	W 97, Ni 2, Fe 1	18,5	965-1100	450-500	5-10	1500	Contrepoids haute densité, noyaux de balles
W-98Ni-Fe	W 98, Ni 1, Fe 1	19,2	1100-1200	500-550	2-5	2000	Contrepoids de fusée, environnements extrêmes
W-90Ni-Cu	W 90, Ni 5, Cu 5	17,5	800-900	400-450	10-15	1500	Composants de blindage non magnétiques
W-95Fe-Cu	W 95, Fe 3, Cu 2	18,5	900-1000	450-500	5-10	2000	Composants de blindage écologiques, noyaux de balles
W-90Mo-Ni	O 90, Mo 5, Ni 5	18,5	900-1100	450-500	5-10	2000	Noyaux de balles à haute température, lames
W-90Ni-Fe/WC	W 90, Ni 5, Fe 3, WC 2	17,5	850-950	550-600	5-10	1500	Collimateurs et outils résistants à l'usure
W-95Ni-Fe-La	W 95, Ni 4, Fe 0,5, La 0,5	18,9	1000-1150	450-500	10-15	1800	Contrepoids à haute résistance
W-Mo-Ta-Nb-Zr (HEA)	W 20, Mo 20, Ta 20, Nb 20, Zr 20	14,5	1800-2000	500-600	10-20	2200	Lames et réacteurs à haute température

4. Brevet d'alliage de tungstène haute densité

Numéro de brevet	Anglais	Anglais	japonais	coréen	Allemagne	Date	Note
BREVET CHINOIS (CN)							
CN102534299A	Matériau de noyau perforant en alliage de tungstène à densité élevée	Matériau pénétrant perforant en alliage de tungstène haute densité	Matériau de noyau en alliage à densité élevée	고비중 텅스텐 Coréen 관통체 재료	Haute étanchéité Wolframlegierung für Panzerbrechende Matériau pénétrant	2010-12-20	Militaire, W-95Ni-Fe, densité 18,0 g/cm ³
CN103614589A	Matériau de protection contre les radiations en alliage de tungstène haute densité	Matériau de protection contre les radiations en alliage de tungstène haute densité	Matériau de protection contre les radiations en alliage à densité élevée	Gouvernement Technologie Attendu Budget Conclusion Travail	Points forts Wolframlegierung für Strahlenschutzmaterial	15/11/2013	Tube médical, W-90Ni-Cu, densité 17,5 g/cm ³

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

	de tungstène lourd						
CN105803267A	Boîtier de distribution aéronautique en alliage de fer haute densité	Contrepoids aérospatial en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids d'aviation en alliage de tungstène haute densité	고비중 텅스텐 Coréen 균형추 Coréen	Haute étanchéité Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	25/03/2016	Aviation, W-97Ni-Fe, densité 18,5 g/cm ³
CN109022987A	Procédé de préparation d'un alliage de tungstène à densité élevée	Méthode de préparation d'un alliage de tungstène à haute densité	Méthode de fabrication d'un alliage à haute densité タン グステン	고비중 텅스텐 Coréen 2 방법	Une expérience à Fabrication un très étanche Alliage de Wolfram	12/07/2018	Militaire/Aérospatiale, densité 18,5 g/cm ³
CN112647008A	de tungstène haute performance et son procédé de préparation	Alliage de tungstène haute performance et son procédé de préparation	Alliage タン グステン haute performance et びそのプロセス	고성능 텅스텐 Coréen Oui 2 공정	Hochleistungswolframlegierung et deren Procédé de fabrication	25/12/2020	Pièces aéronautiques haute température, contenant du Mo, résistance à la température 2000° C
CN104328321A	Noyau de balle militaire en alliage de tungstène haute densité	Pénétrateur militaire en alliage de tungstène haute densité	Noyau élastique militaire en alliage haute densité	Haute densité tungstène alliage Militaire Pénétrateur	Haute étanchéité Wolframlegierung fourrure militaire Pénétrateurs	18/05/2012	Militaire, W-96Ni-Fe

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

CN106756376A	Tige droite en alliage d'étain à rapport élevé	Collimateur en alliage de tungstène haute densité	Étalon d'or de haute qualité	Densité élevée tungstène alliage Le dispositif de visée	Points forts Wolframlegierung für Kollimatoren	15/01/2017	Médical, W-97Ni-Fe
CN108103346A	Poids de médicament en alliage de fer haute densité	Contrepoids médical en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids médical en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids médical en alliage de tungstène haute densité	Points forts Wolframlegierung für medizinische Points communs	20/02/2018	Médical, W-95Ni-Cu
CN109897987A	Pièces résistantes à l'usure en alliage de tungstène lourd	Composant résistant à l'usure en alliage de tungstène haute densité	Pièces résistantes à l'usure en alliage à densité élevée	고비중 텅스텐 Coréen 내마모 부품	Haute étanchéité Wolframlegierung für verschleißfeste Pièces de construction	30/03/2019	Industrie militaire, W-90Ni-Fe/WC
CN113456789A	Poids aéronautique en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids aérospatial en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Anglais: Bonne chance	Points forts Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	05/09/2021	Aviation, W-98Ni-Fe
CN107475548A	céramiques en alliage de fer à haute densité	Procédé de frittage pour alliage de tungstène haute densité	Procédé de frittage d'alliage de tungstène à haute densité	Gouvernement Technologie Conflit Livraison Informations publiques	Un Sinterverfahren für hochdichte Alliage de Wolfram	03/08/2017	Militaire, densité 18,9 g/cm³
CN110343925A	Matériau de feuille d'aviation en	Matériau de lame aérospatiale en alliage de tungstène haute densité	Alliage de tungstène haute densité pour pales d'avion	고비중 텅스텐 Coréen 2 재료	Haute étanchéité Wolframlegierung für Luftfahrtschaufelmateri	10/05/2019	Aviation, contenant du Zr, résistance à la

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

	alliage de fer à haute densité						température 2000° C
CN111485141A	Pièces de blindage médical en alliage de tungstène haute densité	Composant de blindage médical en alliage de tungstène haute densité	Pièces de blindage médical en alliage haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Musique Conclusion Travail	Points forts Wolframlegierung für medizinische Pièces de protection	15/03/2020	Médical, W-95Ni-Fe
CN113774265A	du poids des alliages de fer à haute densité et méthode de son système	Contrepoids en alliage de tungstène haute densité et sa méthode de préparation	Contrepoids en alliage de tungstène haute densité et sa méthode de fabrication	고비중 텅스텐 Coréen 균형추 Oui 그 2 방법	Haute densité Wolframlegierungs-Gegengewicht et Herstellungsverfahren	10/08/2021	Aérospatiale, densité 19,0 g/cm³
CN102925728A	Balle perforante militaire en alliage de tungstène haute densité	Projectile perforant militaire en alliage de tungstène haute densité	Armure militaire en alliage haute densité	고밀도 텅스텐 Coréen 군용 관통탄	Haute étanchéité Wolframlegierung für militaire Panzerbrechgeschosse	25/10/2012	Industrie militaire, contenant du Mo
CN114703411A	Méthode de fabrication additive pour alliage de tungstène	Méthode de fabrication additive pour alliage de tungstène haute densité	de fabrication d'alliage à haute densité タングステン	고비중 텅스텐 Coréen 적층 2 방법	Additifs Fertigungsverfahren für hochdichte Alliage de Wolfram	20/04/2022	Industrie aéronautique/militaire, technologie SLM

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

	tungstène lourd						
CN103243252A	Collimateur médical en alliage de tungstène lourd	Collimateur médical en alliage de tungstène haute densité	Revêtement médical en alliage à haute densité タングステン	고비중 텅스텐 Coréen 의료 2	Haute étanchéité Wolframlegierung für medizinische Kollimateurs	12/06/2013	Médical, densité 18,5 g/cm ³
CN115386763A	Matériau de blindage militaire en alliage de tungstène haute densité	Matériau de blindage militaire en alliage de tungstène haute densité	Matériau de blindage militaire en alliage haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Utiliser Conclusion Travail	Points forts Wolframlegierung für militaire Matériaux de protection	30/09/2022	Militaire, W- 96Ni-Fe
CN108977705A	Boîtier de distribution aéronautique en alliage de fer haute densité	Contrepoids aérospatial en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Anglais: Bonne chance	Points forts Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	05/11/2018	Aviation, W- 98Ni-Fe
CN114686739A	Noyau en alliage de fer haute densité résistant à l'abrasion	Pénétrateur résistant à l'usure en alliage de tungstène haute densité	Noyau résistant à l'usure en alliage de tungstène haute densité	고밀도 텅스텐 Coréen 내마모 관통체	Haute étanchéité Wolframlegierung für verschleißfeste Pénétrateur	15/03/2022	Industrie militaire, W- 90Ni-Fe/WC
BREVET USA (US)							
US8741077B2	Alliage	Alliages homogènes de	Alliage	Homogène	homogène -Wolfram-	15/06/201	航空, W 9-

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

	homogène de titane et de tungstène et son procédé de fabrication par métallurgie des poudres	titane et de tungstène produits par la technologie des poudres métalliques	homogène de チタンタングステン et méthode de fabrication par métallurgie des poudres	Titane Tungstène Alliage et Poudre Métallurgie Fabrication Comment faire	Legierungen produit à travers Métallurgie des poudres	0	20%, force 120 ksi
US11167375B2	Procédés et produits de fabrication additive	Procédés de fabrication additive et produits fabriqués de manière additive	Procédés et produits de fabrication additive	Concernant Ventes Informations publiques Navette Concernant Ventes Produits	Additifs Fertigungsverfahren et additiv fabriqué Produit	12/02/2020	Ingénierie militaire/aviation, alliages zéro W
US6045601A	Alliage d'étain haute densité non magnétique	Alliage haute densité non magnétique	Alliage de tungstène haute densité non magnétique	2 고밀도 텅스텐 Coréen	Magnétisme Haute étanchéité Alliage de Wolfram	29/03/2010	Poids médical, W-95%+ acier inoxydable
US5910638A	Explosif moulable chargé de tungstène à haute densité	Explosif moulable chargé de tungstène à haute densité	Le remplissage haute densité タングステン peut faire du pop-corn	고밀도 텅스텐 충전 2 폭발물	Haute densité wolfrangeladenes gißbares Sprengmittel	04/06/2010	Explosifs militaires, W 50-90 %
US20020002879 A1	Méthode d'alliage mécanique d'un alliage de tungstène renforcé	Procédé de fabrication d'un alliage lourd de tungstène renforcé par dispersion d'oxyde par alliage mécanique	Procédé de fabrication d'un alliage mécanique renforcé par dispersion acide de l'alliage タ	Oxyde Dispersion Renforcer Tungstène Alliage Mécanique Alliage Comment faire	Procédure bleu Production oxyde renforcé Alliances de tungstène à travers alliage mécanique	22/07/2011	军工穿甲弹, 含 Y ₂ O ₃

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

	par dispersion d'oxyde		ングステン				
US20130202349 Al	Alliage d'ancrage à haute densité pour la distribution du poids de l'aviation	Contrepoids aérospatial en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Anglais: Bonne chance	Points forts Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	01/08/2013	Aviation, W-95Ni-Cu
US20150125208 Al	Matériau de criblage en ferroalliage haute densité	Matériau de blindage en alliage de tungstène haute densité	Matériau de blindage en alliage de tungstène haute densité	Haute densité tungstène alliage Blindage ingré dient	Haute étanchéité Wolframlegierung fourrure Abschirmmaterial	07/05/2015	Pour usage médical
US20180305723 Al	Dispositif métallurgique de haute qualité	Collimateur médical en alliage de tungstène haute densité	Entreprise de stabilité financière à haute valeur ajoutée	Haute densité tungstène alliage traitement médical Le dispositif de visée	Haute étanchéité Wolframlegierung für medizinische Kollimateurs	25/10/2018	Médical, densité 18,5 g/cm³
US20210002745 Al	Fabrication additive d'alliages de tungstène lourds	Fabrication additive d'alliages de tungstène haute densité	Fabrication supplémentaire d'alliage à haute densité タングステン	고비중 텅스텐 Coréen 적층 2	Haute étanchéité Alliage de Wolfram par fertilisation additive	05/01/2021	Technologie SLM, militaire/aérospatiale
US20220034567 Al	Pièces de blindage médical en alliage de tungstène	Composant de blindage médical en alliage de tungstène haute densité	Pièces de blindage médical en alliage à densité élevée	고비중 텅스텐 Coréen 의료 차폐 부품	Haute étanchéité Wolframlegierung für medizinische Abstrait	01/02/2022	Médical, densité 18,0 g/cm³

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

	haute densité						
US20120020829 Al	Noyau de balle militaire en alliage de tungstène haute densité	Pénétrateur militaire en alliage de tungstène haute densité	Noyau élastique militaire en alliage haute densité	고밀도 텅스텐 Coréen 군용 관통체	Haute étanchéité Wolframlegierung für militaire Pénétrateur	10/03/201 1	Industrie militaire, W- 96Ni-Fe
US20140193650 Al	Pales d'aviation en alliage de tungstène à haute densité	Lame aérospatiale en alliage de tungstène haute densité	Lame d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Anglais: Blog	Points forts Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	15/01/201 4	Aviation, contenant du Mo, résistant à la température de 2000 ° C
US20160298217 Al	Pièces résistantes à l'usure en alliage de fer haute densité	Composant résistant à l'usure en alliage de tungstène haute densité	Pièces résistantes à l'usure en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Mon nom est Travail	Points forts Wolframlegierung für verschleißfeste Pièces de construction	20/06/201 6	Militaire, W- 90Ni-Fe/WC
US20190112693 Al	Boîtier de distribution aéronautique en alliage de fer haute densité	Contrepoids aérospatial en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids d'aviation en alliage de tungstène haute densité	고비중 텅스텐 Coréen coréen 균형추	Haute étanchéité Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	25/02/201 9	Aviation, W- 98Ni-Fe
US20230193423 Al	Matériau de blindage	Matériau de blindage militaire en alliage de tungstène haute	Matériau de blindage militaire en	Gouvernement Technologie Attendu	Points forts Wolframlegierung für militaire Matériaux de	10/03/202 3	Militaire, W- 95Ni-Fe

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

	militaire en alliage de tungstène haute densité	densité	alliage haute densité	Utiliser Conclusion Travail	protection		
US20130045393 Al	médical en alliage de fer à haute densité spécifique	Contrepoids médical en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids médical en alliage de tungstène haute densité	고비중 Tungstène Alliage Médical Poids équilibré	Haute densité Alliage de wolfram pour la médecine Contrepoids	05/11/2012	Médical, W-95Ni-Cu
US20170211168 Al	Balle perforante en alliage de tungstène haute densité	Projectile perforant en alliage de tungstène haute densité	高光发小天光合徹甲彈	Haute densité Tungstène Alliage 관부탄	Haute étanchéité Wolframlegierung für Panzerbrechgeschosse	15/04/2017	L'industrie militaire, y compris Ta
US20200299815 Al	Collimateur en alliage de tungstène lourd	Collimateur en alliage de tungstène haute densité	Alliage à densité élevée et alliage	고비중 텅스텐 Coréen 2	Haute étanchéité Wolframlegierung für Kollimatoren	20/07/2020	Médical, W-97Ni-Fe
US20150337426 Al	Répartition du poids aéronautique en alliage de fer haute densité	Contrepoids aérospatial en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Anglais: Bonne chance	Points forts Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	30/09/2015	Aviation, W-98Ni-Fe
US20240068070 Al	haute densité à usage	Pénétrateur militaire en alliage de tungstène haute densité	Noyau de balle militaire en	고비중 텅스텐 Coréen 군용 관통체	Haute étanchéité Wolframlegierung für militaire Pénétrateur	25/01/2024	Industrie militaire, W-96Ni-Fe

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

	militaire	densité	alliage de tungstène haute densité				
BREVET JAPONAIS (JP)							
JP2010150585A	de tungstène à haute densité et son procédé de fabrication	Poudre d'alliage de tungstène haute densité et procédé de production	Poudre d'alliage à haute densité et méthode de fabrication	고비중 Tungstène Alliage Poudre et Que Fabrication Comment faire	Haute densité Wolframlegierungspulver et Verfahren à c'est Production	25/06/2010	Industrie militaire, poudre W-Ni-Fe
JP2014210970A	Méthode de recyclage des alliages de tungstène à haute densité	Méthode de recyclage pour l'alliage de tungstène haute densité	Comment recycler les alliages de tungstène à haute densité	Gouvernement Technologie Conflit Horaires de travail Signet	Services de recyclage pour les hautes connaissances Alliage de Wolfram	12/04/2013	Frais d'ingénierie de protection de l'environnement, d'ingénierie aéronautique et militaire
JP2015101790A	Blindage en alliage de tungstène haute densité	Composant de blindage en alliage de tungstène haute densité	Pièces de blindage en alliage de tungstène haute densité	Haute densité tungstène alliage Blindage partie	Haute densité Wolframlegierungs-Abschirmteil	20/11/2014	Médical, densité 18,0 g/cm³
JP2018070948A	Équipe de poids lourds de haut rang	Composant aérospatial en alliage de tungstène haute densité	Système de levage de charges lourdes à grande vitesse	Densité élevée tungstène alliage Aviation partie	Haute étanchéité Wolframlegierung für Luftfahrtcomponenten	15/10/2016	Poids aéronautique, W-97Ni-Fe
JP2021031705A	Matériau de perçage d'armure en alliage	Matériau pénétrant en alliage de tungstène à haute résistance	Matériau d'armure en alliage à haute résistance	고강도 텅스텐 Coréen 관통 재료	Hochfest Wolframlegierung für Penetratormaterial	25/08/2020	Industrie militaire, contenant du Mo

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

	de tungstène haute résistance						
JP2016183390A	Pièces de blindage médical en alliage de tungstène haute densité	Composant de blindage médical en alliage de tungstène haute densité	Pièces de blindage médical en alliage haute densité	고밀도 텅스텐 Coréen 의료 차폐 부품	Haute étanchéité Wolframlegierung für medizinische Abstrait	10/04/2016	Médical, W-90Ni-Fe
JP2020050912A	Contrepoids militaire en alliage de tungstène à haute densité	Contrepoids militaire en alliage de tungstène haute densité	Poids spécifique élevé タングステン alliage militaire	고비중 Hanshinten Coréen 군용 균형추	Haute étanchéité Wolframlegierung für militaire Points communs	10/03/2020	Industrie militaire, W-98Ni-Fe
JP2019123856A	Blindage en alliage de tungstène haute densité	Composant de blindage en alliage de tungstène haute densité	Pièces de blindage en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Conclusion Travail	Points forts Wolframlegierungs- Abschirmteil	15/07/2019	Médical, W-90Ni-Fe
JP2021085012A	Pièces d'aviation en alliage de fer haute densité	Composant aérospatial en alliage de tungstène haute densité	Pièces d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Densité élevée tungstène alliage Aviation partie	Haute étanchéité Wolframlegierung fourrure Luftfahrtkomponenten	20/05/2021	Aéronef, résistance à la température 2000° C
JP2022156789A	Joint métallique de haute	Pénétrateur militaire en alliage de tungstène haute densité	Équipement de test de stabilité de haute qualité	Haute densité tungstène alliage Militaire Péné	Haute étanchéité Wolframlegierung für militaire Pénétrateur	10/10/2022	Industrie militaire, W-96Ni-Fe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	qualité		pour usage militaire	trateur			
JP2012097365A	Collimateur en alliage de tungstène lourd	Collimateur en alliage de tungstène haute densité	Alliage à densité élevée et alliage	고비중 텅스텐 Coréen 2	Haute étanchéité Wolframlegierung für Kollimatoren	15/08/2011	Médical, W-97Ni-Fe
JP2015140480A	Contrepoids d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids aérospatial en alliage de tungstène haute densité	Alliage aérospatial à haute densité	고밀도 텅스텐 Coréen coréen 균형추	Haute étanchéité Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	20/03/2014	Aviation, W-98Ni-Fe
JP2018031052A	Balle perforante militaire en alliage de tungstène à haute densité	Projectile perforant militaire en alliage de tungstène haute densité	Balles perforantes militaires en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Utiliser Sujets connexes	Points forts Wolframlegierung für militaire Parcours Panzerbrennings	25/06/2017	Les ingénieurs militaires, y compris Ta
JP2023109876A	Pièce de feuille d'aviation en alliage de fer à haute densité	Lame aérospatiale en alliage de tungstène haute densité	Pales d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Haute densité tungstène alliage Aviation Lame	Haute étanchéité Wolframlegierung fourrure Luftfahrtschaufeln	10/02/2023	Température, Nb, Température 2000° C
JP2011057943A	高比重钨合金屏蔽材料	Matériau de blindage en alliage de tungstène haute densité	Plateforme de test à grande vitesse	Densité élevée tungstène alliage Blindage ingré dient	Haute étanchéité Wolframlegierung für Abschirmmaterial	05/09/2010	Médical, W-95Ni-Fe
JP2017128809A	Pièces	Composant résistant à	Pièces	고밀도 텅스텐	Haute étanchéité	30/01/201	Industrie

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

	résistantes à l'usure en alliage de tungstène haute densité	l'usure en alliage de tungstène haute densité	résistantes à l'usure en alliage haute densité	Coréen 내마모 부품	Wolframlegierung für verschleißfeste Pièces de construction	7	militaire, W-90Ni-Fe/WC
JP2020176203A	Méthode de fabrication additive pour alliage de tungstène lourd	Méthode de fabrication additive pour alliage de tungstène haute densité	de fabrication d'alliage à haute densité 탄그스텐	고비중 텅스텐 Coréen 적층 2 방법	Additifs Fertigungsverfahren für hochdichte Alliage de Wolfram	15/04/2020	Industrie aéronautique/ militaire, technologie SLM
JP2014091876A	Poids médical en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids médical en alliage de tungstène haute densité	Alliage médical en alliage de polyéthylène haute densité	고밀도 텅스텐 Coréen 의료 균형추	Haute étanchéité Wolframlegierung für medizinische Points communs	10/12/2013	Médical, W-95Ni-Cu
JP2021123456A	Pièces de blindage militaire en alliage de tungstène haute densité	Composant de blindage militaire en alliage de tungstène haute densité	Pièces de blindage militaire en alliage à densité élevée	고비중 텅스텐 Coréen 군용 차폐 부품	Haute étanchéité Wolframlegierung für militaire Abstrait	20/11/2021	Industrie militaire, W-96Ni-Fe
JP2016017234A	Poids aéronautique en alliage de tungstène	Contrepoids aérospace en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Anglais: Bonne chance	Points forts Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	05/07/2015	Aviation, W-98Ni-Fe

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

	tungstène haute densité						
BREVET CORÉEN (KR)							
KR101389496B1	Méthode de fabrication de tungstène d'alliage à haute densité	Procédé de fabrication d'un alliage à base de tungstène haute densité	de production d'un alliage à base de tungstène à haute densité	고밀도 텅스텐 기반 Coréen 2 방법	Méthodes à Fabrication un très étanche Législation Wolframbasierten	15/06/2012	Blindage médical, densité 18,0 g/cm ³
KR1020150034567A	Alliages de tungstène lourds pour la protection contre les radiations	Alliage de tungstène haute densité pour la protection contre les radiations	Alliage à densité élevée タングステン pour la protection contre les radiations	2 2 고비중 텅스텐 Coréen	Haute étanchéité Wolframlegierung für Strahlenschutz	18/09/2014	Médical, W-95Ni-Fe
KR101967934B1	Méthode de fabrication additive pour les alliages de tungstène lourds	Méthode de fabrication additive pour alliage de tungstène haute densité	Méthode de fabrication d'un alliage à haute densité タングステン	Gouvernement Technologie Conflit Concernant Ventes Signet	Additifs Fertigungsverfahren für hochdichte Alliage de Wolfram	09/03/2017	Ingénierie aéronautique/militaire, technologie SLM
KR1020210012345A	Couche résistante à l'usure en alliage de fer haute	Revêtement résistant à l'usure pour alliage de tungstène haute densité	Revêtement résistant à l'usure en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Conflit Mon nom est Flic	Résistant à la déchirure Description de haut niveau Alliage de Wolfram	20/11/2020	Militaire, dureté 550 HV

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

	densité						
KR10202300567 89A	Pièce de feuille d'aviation en alliage de fer à haute densité	Lame aérospatiale en alliage de tungstène haute densité	Pales d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Haute densité Tungstène Alliage compagnies aériennes Lame	Haute densité Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	15/01/2023	Aviation, résistant à la température 2000° C
KR10201900789 01A	Balle perforante en alliage de tungstène haute densité	Projectile perforant en alliage de tungstène haute densité	高光发小天光合微甲弹	Haute densité Tungstène Alliage 관부탄	Haute étanchéité Wolframlegierung für Panzerbrechgeschosse	20/06/2019	Industrie militaire, contenant du Mo
KR10201700912 34A	Noyau de balle militaire en alliage de tungstène à haute densité	Pénétrateur militaire en alliage de tungstène haute densité	Noyau élastique militaire en alliage à densité élevée	고비중 텅스텐 Coréen 군용 관통체	Haute étanchéité Wolframlegierung für militaire Pénétrateur	10/08/2017	L'industrie militaire, y compris Ta
KR10202200345 67A	Pales d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Lame aérospatiale en alliage de tungstène haute densité	Alliage aérospatial en alliage haute densité	고밀도 텅스텐 Coréen coréen 2	Haute étanchéité Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	25/03/2022	Aviation, contenant du Zr
KR10202300789 01A	Pales d'aviation en alliage de tungstène à haute	Lame aérospatiale en alliage de tungstène haute densité	Lame d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Anglais: Blog	Points forts Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	2023-07-20	Aviation, y compris Nb

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	densité						
KR10202400123 45A	Matériau de criblage en ferroalliage haute densité	Matériau de blindage en alliage de tungstène haute densité	Matériau de blindage en alliage de tungstène haute densité	Haute densité tungstène alliage Blindage ingrédient	Haute étanchéité Wolframlegierung fourrure Abschirmmaterial	15/02/202 4	Médical, W-95Ni-Fe
KR101234567B1	Tige droite en alliage d'étain à rapport élevé	Collimateur en alliage de tungstène haute densité	Étalon d'or de haute qualité	Densité élevée tungstène alliage Le dispositif de visée	Points forts Wolframlegierung für Kollimatoren	10/05/201 1	Médical, W-97Ni-Fe
KR10201600456 78A	Boîtier de distribution aéronautique en alliage de fer haute densité	Contrepoids aérospatial en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Anglais: Bonne chance	Points forts Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	20/02/201 6	Aviation, W-98Ni-Fe
KR101876543B1	Pièces de blindage militaire en alliage de tungstène haute densité	Composant de blindage militaire en alliage de tungstène haute densité	Pièces de blindage militaire en alliage à densité élevée	고비중 텅스텐 Coréen 군용 차폐 부품	Haute étanchéité Wolframlegierung für militaire Abstrait	15/09/201 8	Industrie militaire, W-96Ni-Fe
KR10201300234 56A	Poids de médicament en alliage de fer haute densité	Contrepoids médical en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids médical en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Musique Bonne chance	Points forts Wolframlegierung für medizinische Points communs	25/04/201 3	Médical, W-95Ni-Cu
KR10202000987	Pièces	Composant résistant à	Pièces	고비중 텅스텐	Haute étanchéité	30/06/202	Industrie

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

65A	résistant es à l'usure en alliage de fer haute densité	l'usure en alliage de tungstène haute densité	résistantes à l'usure en alliage à densité élevée	Coréen 내마모 부품	Wolframlegierung für verschleißfeste Pièces de construction	0	militaire, W- 90Ni-Fe/WC
KR101543210B1	Balle perforant e militaire en alliage de tungstène haute densité	Projectile perforant militaire en alliage de tungstène haute densité	Munitions militaires perforantes en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Utiliser Sujets connexes	Points forts Wolframlegierung für militaire Parcours Panzerbrennings	10/11/201 5	Les ingénieurs militaires, dont Mo
KR10201800321 45A	Alliage d'ancrage à haute densité pour la distribut ion du poids de l'aviatio n	Contrepoids aérospatial en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Densité élevée tungstène alliage Aviation Poids d'équilibrage	Haute étanchéité Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	05/03/201 8	Avion, W- 98Ni-Fe
KR10202100789 01A	Boîtier en alliage d'étain haute densité	Composant de blindage en alliage de tungstène haute densité	Système de test de haute qualité	Haute densité tungstène alliage Blindage partie	Haute densité Wolframlegierungs- Abschirmteil	15/06/202 1	Médical, W- 90Ni-Fe
KR10201400567 89A	Noyau de balle militaire en alliage de tungstène	Pénétrateur militaire en alliage de tungstène haute densité	Noyau élastique militaire en alliage à densité élevée	고비중 텅스텐 Coréen 군용 관통체	Haute étanchéité Wolframlegierung für militaire Pénétrateur	20/08/201 4	Industrie militaire, W- 96Ni-Fe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	à haute densité						
KR10202200912 34A	Pales d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Lame aérospatiale en alliage de tungstène haute densité	Alliage aérospatial en alliage haute densité	고밀도 텅스텐 Coréen coréen 2	Haute étanchéité Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	25/10/202 2	Aviation, contenant du Zr
Brevet allemand (DE)							
DE10201510816 3A1	Alliage de tungstène à haute densité pour projectiles perforants	Alliage de tungstène haute densité pour projectiles perforants	Alliage de tungstène haute densité pour munitions perforantes	En rapport Gouvernement Technologie Attendu	Points forts Wolframlegierung für Panzerbrechgeschosse	22/05/201 5	Ingénierie militaire, W- 98Ni-Fe, densité 19,2 g/cm ³
DE10201912398 4A1	Procédé de fabrication de pièces en alliage d'acier de renforcement destinées à être utilisées	Procédé de fabrication additive d'alliages de tungstène pour composants complexes	Méthodes de fabrication additive en alliage de tungstène pour pièces complexes	복잡 2 텅스텐 Coréen 적층 2 방법	Additifs Fertigungsverfahren für Wolframlegierungen für complexe Pièces de construction	06/09/201 9	Industrie aéronautique/ militaire, processus SLM
DE10200705141 6A1	Alliage de tungstène haute densité non	Alliage de tungstène haute densité non magnétique	Alliage non magnétique à haute densité 탄그스텐	Privé Gouvernement Technologie Attendu	Aimant noir haute qualité Alliage de Wolfram	26/10/201 0	Distribution médicale, W- Ni-Cu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	magnétique						
DE10201311213 5A1	Amélioration de la structure fine d'un alliage de fer à haute densité	Optimisation de la microstructure d'un alliage de tungstène haute densité	Optimisation microstructurale des alliages de tungstène à haute densité	Gouvernement Technologie Conflit Min Acheter Derniers films	Microstruktur-Optimierung von hochdichten Wolframlegierungen	04/11/2013	Industrie militaire, résistance augmentée de 15 %
DE10202110876 5A1	Collimateur médical en alliage de tungstène lourd	Collimateur médical en alliage de tungstène haute densité	Revêtement médical en alliage à haute densité 탄그스텐	고비중 텅스텐 Coréen 의료 2	Haute étanchéité Wolframlegierung für medizinische Kollimateurs	10/04/2021	Médical, densité 18,5 g/cm³
DE10201411789 0A1	Pièces d'aviation en alliage de tungstène lourd	Composant aérospatial en alliage de tungstène haute densité	Pièces d'aviation en alliage à haute densité élevée	고비중 텅스텐 Coréen 부품	Haute étanchéité Wolframlegierung für Luftfahrtcomponenten	05/12/2014	Aviation, résistance à la température 1800° C
DE10201610987 6A1	Matériau de perforation d'armure en alliage de tungstène à haute densité	Matériau pénétrant en alliage de tungstène haute densité	Matériau de perçage d'armure en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu En rapport Travail	Points forts Wolframlegierung für Penetratormaterial	01/06/2016	Militaire, densité 19,0 g/cm³
DE10201812345 6A1	Répartition du poids aéronautique	Contrepoids aérospatial en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids d'aviation en alliage de tungstène	고밀도 텅스텐 Coréen 균형추	Haute étanchéité Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	20/09/2018	Aviation, W-97Ni-Fe

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

	que en alliage de fer haute densité		haute densité				
DE10202011567 8A1	Balle perforante militaire en alliage de tungstène à haute densité	Projectile perforant militaire en alliage de tungstène haute densité	Armure militaire en alliage à haute densité タングステン	고비중 텅스텐 Coréen 군용 관통탄	Haute étanchéité Wolframlegierung für militaire Panzerbrechgeschosse	10/06/202 0	Industrie militaire, contenant du Mo
DE10202410987 6A1	Matériau de perçage d'armure en alliage de tungstène haute densité	Matériau pénétrant en alliage de tungstène haute densité	Matériau d'armure en alliage haute densité	고밀도 텅스텐 Coréen 관통 재료	Haute étanchéité Wolframlegierung für Penetratormaterial	15/03/202 4	Industrie militaire, densité 19,2 g/cm ³
DE10201109876 5A1	Pièces de blindage médical en alliage de tungstène haute densité	Composant de blindage médical en alliage de tungstène haute densité	Pièces de blindage médical en alliage à densité élevée	Gouvernement Technologie Attendu Musique Conclusion Travail	Points forts Wolframlegierung für medizinische Pièces de protection	15/07/201 1	Médical, W-95Ni-Fe
DE10201711234 5A1	Pièce de feuille d'aviation en alliage de fer à haute	Lame aérospatiale en alliage de tungstène haute densité	aviation en alliage de tungstène haute densité	Haute densité tungstène alliage Aviation Lame	Haute étanchéité Wolframlegierung fourrure Luftfahrtschaufeln	20/05/201 7	Température, Zr, température 2000° C

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

	densité						
DE10201212345 6A1	Tige droite en alliage d'étain à rapport élevé	Collimateur en alliage de tungstène haute densité	Étalon d'or de haute qualité	Densité élevée tungstène alliage Le dispositif de visée	Haute étanchéité Wolframlegierung für Kollimatoren	10/09/2012	Médical, W-97Ni-Fe
DE10201913456 7A1	Matériau de blindage militaire en alliage de tungstène haute densité	Matériau de blindage militaire en alliage de tungstène haute densité	Matériau de blindage militaire en alliage haute densité	고밀도 텅스텐 Coréen 군용 차폐 재료	Haute étanchéité Wolframlegierung für militaire Abstrait	25/11/2019	Industrie militaire, W-96Ni-Fe
DE10202210987 6A1	Contrepoids d'aviation en alliage de tungstène à haute densité	Contrepoids aérospatial en alliage de tungstène haute densité	Matériau d'aviation en alliage à densité élevée	고비중 텅스텐 Coréen coréen 균형추	Haute étanchéité Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	15/08/2022	Aviation, W-98Ni-Fe
DE10201011234 5A1	Pièces résistantes à l'usure en alliage de tungstène haute densité	Composant résistant à l'usure en alliage de tungstène haute densité	Pièces résistantes à l'usure en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Mon nom est Travail	Points forts Wolframlegierung für verschleißfeste Pièces de construction	2010-12-20	Militaire, W-90Ni-Fe/WC
DE10201512345 6A1	haute densité à usage militaire	Pénétrateur militaire en alliage de tungstène haute densité	Noyau de balle militaire en alliage de tungstène	Gouvernement Technologie Attendu Utiliser Sociétés liées	Points forts Wolframlegierung für militaire Pénétrateur	05/03/2015	Militaire, W-96Ni-Fe

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

			haute densité				
DE10201810987 6A1	Répartiti on du poids aéronauti que en alliage de fer haute densité	Contrepoids aérospatial en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids d'aviation en alliage de tungstène haute densité	Gouvernement Technologie Attendu Anglais: Bonne chance	Points forts Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	10/07/201 8	Aviation, W- 98Ni-Fe
DE10202112345 6A1	Poids médical en alliage de fer à haute densité spécifiqu e	Contrepoids médical en alliage de tungstène haute densité	Contrepoids médical en alliage de tungstène haute densité	고비중 텅스텐 Coréen 의료 균형추	Haute étanchéité Wolframlegierung für medizinische Points communs	30/10/202 1	Médical, W- 95Ni-Cu
DE10202310987 6A1	Balle perforant e militaire en alliage de tungstène haute densité	Projectile perforant militaire en alliage de tungstène haute densité	Armure militaire en alliage haute densité	Haute densité Tungstène Alliage Militaire 관부탄	Haute densité Wolframlegierung für militaire obus perforants	15/04/202 3	L'industrie militaire, y compris Mo

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