

Encyclopédie des plaques en alliage de tungstène

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

PRÉSENTATION DU GROUPE CTIA

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

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

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

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

Table des matières

Chapitre 1 : Concepts de base et historique du développement des plaques en alliage de tungstène

- 1.1 Définition et caractéristiques de base des plaques en alliage de tungstène
- 1.2 Formation et historique du développement des plaques en alliage de tungstène
- 1.3 Classification des plaques en alliage de tungstène (par composition, procédé et utilisation)
- 1.4 Similitudes et différences entre les plaques en alliage de tungstène, les tiges de tungstène, les fils de tungstène et les plaques en tungstène-cuivre
- 1.5 Aperçu de l'évolution technologique des plaques en alliage de tungstène et des brevets nationaux et internationaux

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

- 2.1 Densité, gravité spécifique et précision du contrôle dimensionnel
- 2.2 Résistance à la traction, limite d'élasticité et ténacité à la rupture
- 2.3 Dureté et résistance à l'usure
- 2.4 Conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique et stabilité à haute température
- 2.5 Propriétés électriques, réponse magnétique et résistance aux radiations
- 2.6 Analyse de la résistance à la corrosion et de la stabilité chimique

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

- 3.1 Sélection des matières premières et traitement de la poudre de tungstène et du liant métallique
- 3.2 Procédé de préparation par métallurgie des poudres (pressage, pressage isostatique, frittage)
- 3.3 Procédés de laminage à chaud et de laminage à froid
- 3.4 Technologies de traitement de surface (polissage, décapage, galvanoplastie, PVD)
- 3.5 Applications du revêtement laser et de la fabrication additive dans les tôles
- 3.6 Technologies de renforcement par nanoparticules et de fabrication de tôles à gradient fonctionnel

Chapitre 4 : Contrôle de la qualité et évaluation des performances des plaques en alliage de tungstène

- 4.1 Détection des dimensions géométriques et de la planéité de surface
- 4.2 Caractérisation de la microstructure et de la densité (MEB, DRX)
- 4.3 Normes d'essai des propriétés mécaniques (ASTM, GB, ISO)
- 4.4 Analyse de la composition élémentaire et de la teneur en impuretés (ICP, XRF, ONH)
- 4.5 Détection des défauts de surface (ultrasons, tomographie, courants de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Foucault, poudre magnétique)

4.6 Évaluation de la rugosité de surface et de l'adhérence du revêtement

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

5.1 Plaques de blindage et dispositifs de contrôle thermique pour l'industrie nucléaire

5.2 Structures de protection aérospatiales et plaques de contrepoids

5.3 Plaques de protection à haute densité dans les appareils de radiothérapie médicale

5.4 Plaques en alliage de tungstène pour parois de fours à haute température et environnements thermiques

5.5 Plaques composites en acier pour matrices et revêtements de pièces mécaniques

5.6 Structures de dissipation thermique et résistantes aux radiations dans les instruments de précision et les produits électroniques

Chapitre 6 : Recherche, développement et innovation des plaques spéciales en alliage de tungstène

6.1 Préparation et propriétés des plaques nanostructurées en alliage de tungstène

6.2 Stratégies de microalliage et de conception d'alliages multicomposants

6.3 Optimisation de la microstructure et traitement thermique des plaques en alliage de tungstène à haute température

6.4 Mécanisme de liaison d'interface des plaques composites tungstène-cuivre/tungstène-nickel

6.5 Développement de revêtements de surface pour plaques résistantes à l'usure et à la corrosion

6.6 Conception de plaques fonctionnelles en alliage de tungstène thermoconductrices, électroconductrices et antimagnétiques

Chapitre 7 : Normes internationales et systèmes de qualité pour les plaques en alliage de tungstène

7.1 Normes chinoises sur les plaques en alliage de tungstène (GB/T, YS/T)

7.2 Interprétation des normes américaines (ASTM, MIL)

7.3 Compilation des normes européennes et ISO sur les plaques en alliage de tungstène

7.4 Exigences de conformité environnementale RoHS, REACH et MSDS

7.5 Systèmes de gestion de la qualité dans les domaines de l'aviation, du nucléaire et de la médecine (AS9100, ISO 13485, etc.)

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

8.1 Matériaux et formes d'emballage (emballage sous vide, déshydratant, emballage sur palette)

8.2 Exigences relatives à l'environnement de stockage et mesures anti-oxydation et anti-humidité

8.3 Précautions et réglementations pour le transport national et international

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 9 : Structure industrielle et tendances du marché des plaques en alliage de tungstène

- 9.1 État des ressources mondiales en tungstène et chaîne de traitement des plaques
- 9.2 Analyse de la capacité du marché des plaques en alliage de tungstène et de la croissance future
- 9.3 Plaques en alliage de tungstène de CTIA GROUP LTD
- 9.4 Analyse du lien entre les coûts des matières premières, les prix de l'énergie et les prix des plaques
- 9.5 Obstacles technologiques et stratégie de développement de la chaîne industrielle

Chapitre 10 : Frontières de la recherche et orientations de développement des plaques en alliage de tungstène

- 10.1 Mécanisme de densification des plaques en alliage de tungstène à ultra-haute densité
- 10.2 Fabrication additive et usines intelligentes de plaques en alliage de tungstène
- 10.3 Intégration et expansion des applications des plaques composites multifonctionnelles
- 10.4 Recherche sur l'évolution des performances dans les environnements extrêmes (irradiation, haute température, corrosion)
- 10.5 Matériaux alternatifs à haute performance et stratégies futures durables pour les plaques de tungstène

Annexes

- Annexe 1 : Paramètres physiques et mécaniques courants des plaques en alliage de tungstène
- Annexe 2 : Tableau comparatif des grades et compositions chimiques des alliages de tungstène
- Annexe 3 : Documents standard et principaux documents de référence relatifs aux plaques en alliage de tungstène
- Annexe 4 : Glossaire des alliages de tungstène et abréviations anglaises

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

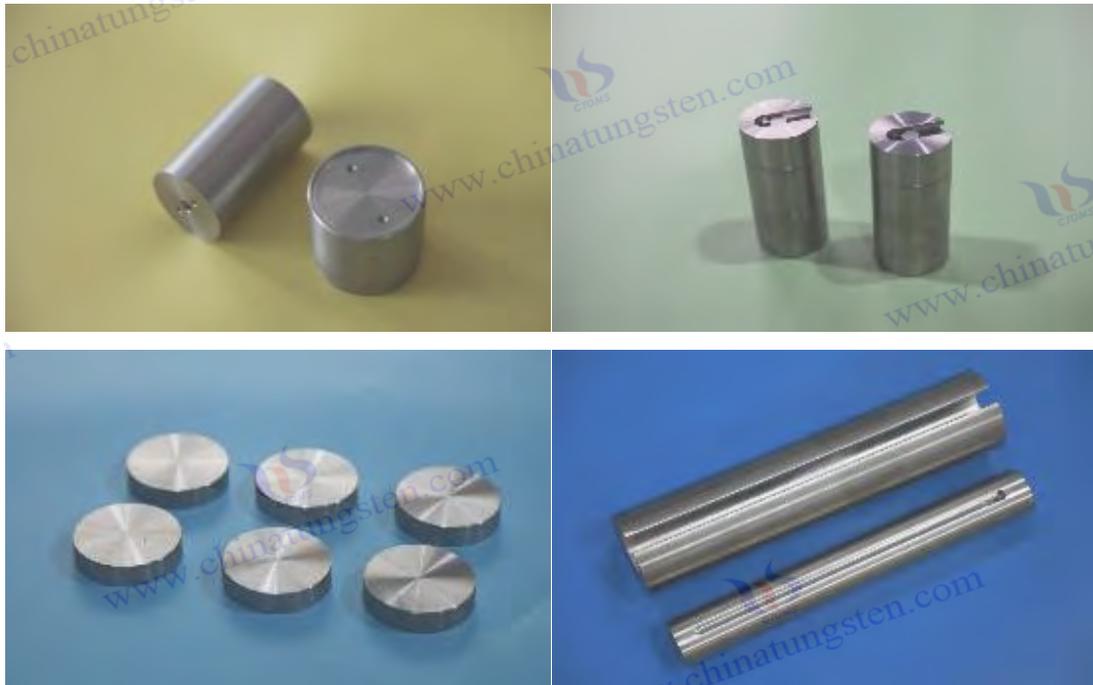
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

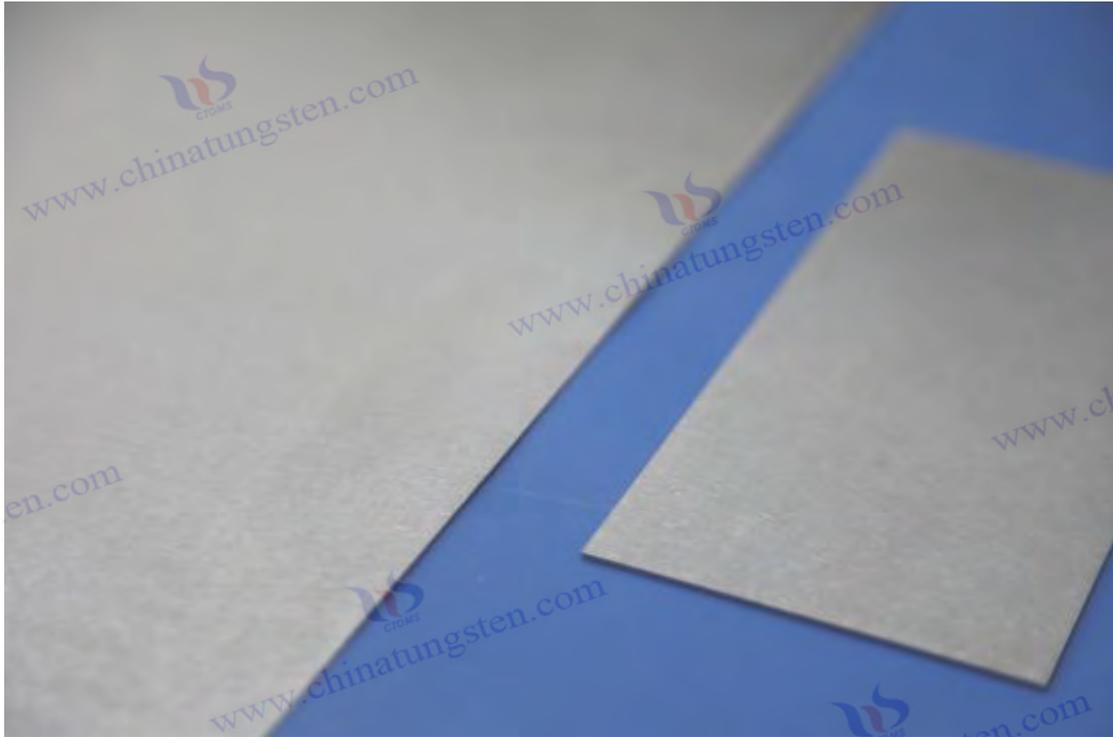
Official website: www.tungsten-alloy.com



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 1 Concepts de base et historique du développement des plaques en alliage de tungstène

1.1 Définition et caractéristiques de base de la plaque en alliage de tungstène

La plaque en alliage de tungstène est un alliage en forme de feuille, principalement composé de tungstène (W), additionné de quantités appropriées de nickel (Ni), de fer (Fe), de cuivre (Cu), de cobalt (Co) ou d'autres éléments par métallurgie des poudres, laminage à chaud, laminage à froid ou fabrication additive. Grâce à son point de fusion intrinsèquement élevé (3 422 °C), son excellente masse volumique (19,25 g/cm³), sa bonne conductivité thermique et sa résistance aux radiations, la plaque en alliage de tungstène est largement utilisée dans diverses applications clés, notamment l'aérospatiale, l'énergie nucléaire, les blindages de protection, les équipements médicaux, les structures haute température et la gestion thermique électronique.

1. Définition de la plaque en alliage de tungstène

Du point de vue de la science des matériaux, les plaques d'alliage de tungstène sont principalement composées d'une forte proportion de poudre de tungstène, complétée par une faible quantité de métal de liaison (généralement Ni-Fe, Ni-Cu ou Ni-Co) pour former un alliage multiphasé dense. Il s'agit généralement d'une plaque métallique plate rectangulaire ou de forme spéciale, d'une épaisseur de 0,1 mm à 50 mm, dont la longueur et la largeur sont personnalisables. Comparées aux tiges ou fils de tungstène traditionnels, les plaques d'alliage de tungstène offrent une surface plus importante, sont plus faciles à découper et peuvent être utilisées à des fins multifonctionnelles telles que le revêtement, le blindage et la fabrication de pièces structurelles.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Composition principale et classification des plaques d'alliage de tungstène

Selon la composition de l'alliage, la méthode de formage et l'application, les plaques d'alliage de tungstène peuvent être divisées dans les catégories suivantes :

- **Classification par système d'alliage :**
 - Plaque en alliage W-Ni-Fe (type courant, haute résistance, haute densité, bonnes propriétés mécaniques)
 - Plaque en alliage W-Ni-Cu (type non magnétique, utilisée dans les domaines électronique et médical)
 - Plaque en alliage W-Cu (conductivité thermique élevée, adaptée à la dissipation de chaleur électronique et aux applications d'électrodes)
 - Plaque en alliage W-Co (résistance améliorée à l'usure et à la corrosion)
 - Plaque en alliage de nano-tungstène (utilisant une technologie de renforcement par nanoparticules pour améliorer la ténacité et la micro-stabilité)
- **Classification par processus de production :**
 - Tôle de métallurgie des poudres (moulage/pressage isostatique + frittage + traitement à chaud)
 - Plaque en alliage de tungstène laminée (laminée à chaud/à froid puis traitée)
 - Fabrication additive de tôles en alliage de tungstène (nouvelles technologies telles que la fusion laser et l'impression 3D)
 - Plaques composites en alliage de tungstène (telles que les structures sandwich W-Cu, les plaques composites tungstène-titane, etc.)
- **Classification par fonction :**
 - **Plaque structurelle en alliage de tungstène :** composants structurels qui supportent des charges statiques et des charges d'impact
 - **Plaque fonctionnelle en alliage de tungstène :** possède des fonctions physiques spécifiques telles que la conductivité thermique, l'antimagnétique et l'anti-rayonnement
 - **Plaque de blindage en alliage de tungstène :** utilisée pour la radioprotection, les équipements de radiothérapie médicale, etc.

3. Principales caractéristiques de performance des plaques en alliage de tungstène

1. **Haute densité :** La densité d'une plaque d'alliage de tungstène typique est comprise entre 17,0 et 18,5 g/cm³, soit 2,2 fois celle de l'acier de même volume. Elle est particulièrement utilisée pour les charges d'inertie, l'équilibre dynamique et la protection contre les radiations.
2. **Excellentes propriétés mécaniques :** Il présente une résistance à la traction élevée (généralement jusqu'à 700-1000 MPa), une bonne ténacité aux chocs et une bonne aptitude au traitement, et convient à la fabrication de pièces aux formes complexes.
3. **Stabilité à haute température :** les alliages à base de tungstène peuvent maintenir une structure et des performances stables au-dessus de 1000 °C et conviennent aux fours à haute température sous vide et aux systèmes de champ thermique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. **Bonne conductivité thermique et électrique** : en particulier dans le système d'alliage W-Cu, la conductivité thermique peut atteindre 170-220 W/m·K et est largement utilisée dans les structures de dissipation thermique et les substrats électroniques.
5. **Excellente résistance aux radiations** : le numéro atomique élevé et la densité élevée du tungstène lui confèrent d'excellents effets de protection contre les rayons X et gamma, bien supérieurs aux plaques de plomb traditionnelles.
6. **Bonne stabilité chimique et résistance à la corrosion** : Stable dans les environnements neutres et faiblement acides, et surpasse les autres métaux lourds dans les environnements à haute température ou fortement oxydants.

4. Aperçu de la forme et des spécifications des plaques en alliage de tungstène

Les dimensions des plaques en alliage de tungstène sont généralement personnalisées selon les besoins de l'utilisateur. Les spécifications typiques sont les suivantes :

- Plage d'épaisseur : 0,1 mm ~ 50 mm
- Plage de largeur : 10 mm à 600 mm
- Gamme de longueurs : 10 mm à 2000 mm
- État de surface : tournage, meulage, polissage, placage chimique, revêtement PVD, etc.

Certaines applications de haute précision (telles que les accélérateurs de particules et les équipements magnétiques nucléaires) nécessitent également une rugosité de surface $Ra < 0,2 \mu m$ et une tolérance d'épaisseur de $\pm 0,01 mm$.

5. Avantages comparatifs des plaques en alliage de tungstène et des plaques métalliques traditionnelles

Paramètres de performance	de Plaque en alliage de tungstène	stéréotype	plaque d'acier	Plaque de cuivre
Densité (g/cm ³)	17,0 à 18,5	11.3	7.8	8,9
Point de fusion (°C)	2700+	327	1500	1083
Capacité de blindage	Très fort (gamma/neutron)	Général (X/γ)	faible	en général
Conductivité thermique	bien	Différence	en général	Excellent
Stabilité à haute température	Excellent	Différence	en général	Différence
Protection de l'environnement	Élevé (non toxique)	Faible (toxique)	haut	haut

Les plaques en alliage de tungstène deviennent progressivement un matériau alternatif au plomb et à l'acier dans des domaines fonctionnels particuliers en raison de leur résistance, de leur densité, de leurs propriétés thermiques et de leurs attributs de protection de l'environnement.

En résumé, la plaque en alliage de tungstène, matériau avancé offrant une densité élevée, une résistance élevée, une stabilité à haute température et une excellente capacité de blindage, présente un intérêt majeur pour la fabrication haut de gamme et les applications de précision modernes. Grâce aux progrès constants des technologies de préparation et à la réduction des coûts de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fabrication, son champ d'application s'étend progressivement des domaines militaire et nucléaire à un système industriel plus large comme l'électronique, le médical, l'aérospatiale, etc.

1.2 Bref historique de la formation et du développement des plaques d'alliage de tungstène

Matériau métallique hautes performances important, le développement des plaques en alliage de tungstène s'accompagne étroitement des progrès de la métallurgie des poudres, du développement stratégique des ressources en tungstène et de la recherche constante de performances matérielles dans des environnements extrêmes au sein de l'industrie haut de gamme. Des premières applications expérimentales à leur déploiement généralisé actuel dans des secteurs clés tels que l'industrie nucléaire, l'aérospatiale et la protection médicale, l'histoire du développement des plaques en alliage de tungstène illustre non seulement l'évolution de la technologie des matériaux métalliques, mais reflète également le passage de l'industrie manufacturière mondiale des métaux conventionnels aux matériaux fonctionnels ultra-performants.

1. Découverte et premières recherches sur les matériaux à base de tungstène

Le tungstène (W) a été découvert par l'homme au milieu du XVIII^e siècle. En 1781, le chimiste suédois Carl Wilhelm Scheele a extrait pour la première fois l'oxyde de tungstène du tungstate de sodium, et quelques années plus tard, les frères espagnols Elhuyar (Juan José et Fausto Elhuyar) ont réussi à séparer le tungstène métallique. Le tungstène est connu pour son point de fusion extrêmement élevé (3 422 °C) et sa densité (19,25 g/cm³), et il a rapidement été utilisé dans les filaments incandescents, les contacts électriques et les alliages haute température.

Cependant, en raison de sa fragilité inhérente et de la difficulté de sa transformation, les méthodes métallurgiques traditionnelles ont rendu difficile sa mise en forme en feuilles ou en plaques minces. Par conséquent, les premières tentatives de « plaques d'alliage de tungstène » sont restées largement au stade de la recherche en laboratoire, et leur application technique réelle n'a émergé progressivement qu'au milieu du XX^e siècle.

2. L'essor de la technologie de la métallurgie des poudres et la réalisation du formage de tôles

Au début du XX^e siècle, avec le développement rapide de la métallurgie des poudres, les scientifiques ont commencé à essayer de transformer des métaux réfractaires à point de fusion élevé (comme le tungstène et le molybdène) en pièces structurales par pressage et frittage. Cette technologie a été étudiée intensivement avant et après la Seconde Guerre mondiale, notamment dans les systèmes militaro-industriels des États-Unis, de l'Allemagne, de l'Union soviétique et d'autres pays, et a finalement favorisé la production de produits tels que les plaques d'alliage de tungstène.

Des années 1950 aux années 1970, avec le développement de l'énergie atomique et de l'aérospatiale, la demande en matériaux haute densité, haute résistance et résistants aux radiations a fortement augmenté, **et des alliages de tungstène haute densité tels que W-Ni-Fe et W-Ni-Cu** ont été systématiquement développés. Durant cette période, les plaques d'alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

étaient principalement préparées par pressage-frittage-laminage à chaud, et la production industrielle de pièces en tôle mince a débuté, principalement pour :

- Plaques de blindage et absorbeurs de neutrons pour réacteurs atomiques ;
- Systèmes de contrepoids pour avions et missiles ;
- Composants de protection contre les rayons X/gamma dans le domaine médical.

3. Maturité technologique tirée par les applications (années 1980-2000)

Dans les années 1980, avec la popularisation des équipements de radiothérapie médicale, le développement rapide de l'industrie électronique et les exigences urgentes des réglementations environnementales en matière de « substituts au plomb », la demande de plaques en alliage de tungstène a fortement augmenté. Durant cette période, le développement de la technologie des plaques en alliage de tungstène a révélé les tendances importantes suivantes :

- **La technologie de laminage de précision et de traitement à froid** améliore considérablement la précision du contrôle de l'épaisseur et la qualité de surface de la plaque ;
- Développement d'alliages **W-Ni-Cu non magnétiques** pour résoudre le problème d'interférence magnétique dans l'imagerie par résonance magnétique médicale et certains équipements aérospatiaux ;
- **Des plaques structurelles composites** (telles que les structures sandwich W-Cu) ont émergé pour réaliser une intégration multi-performances ;
- Le système de gestion de la qualité devient de plus en plus standardisé et de nombreuses normes nationales et industrielles ont été introduites, telles que ASTM B777, GB/T 3879, etc.

Aujourd'hui, les plaques en alliage de tungstène ont progressivement évolué, passant de matériaux structurels primitifs à des matériaux intégrés, alliant structure et fonction. Elles sont largement utilisées dans de nombreux domaines haut de gamme, tels que les instruments de précision, les systèmes de gestion thermique, les blindages de radioprotection et les panneaux muraux de fours haute température.

IV. Stade de développement moderne et exploration des frontières (des années 2000 à aujourd'hui)

À l'aube du XXI^e siècle, alors que les industries technologiques émergentes imposent des exigences plus strictes en matière de performance des matériaux, le développement des plaques en alliage de tungstène a franchi une nouvelle étape : **hautes performances, légèreté, intelligence et polyvalence**. Les principales manifestations sont les suivantes :

1. Optimisation de la microstructure des matériaux

- La technologie des alliages W nano-renforcés a été introduite pour conférer à l'alliage une limite d'élasticité et une ténacité à la rupture plus élevées ;
- Les panneaux à gradient fonctionnel (FGM) sont progressivement conçus pour être utilisés dans les systèmes de contrôle thermique aérospatiaux et les panneaux de réacteurs nucléaires, en tenant compte de multiples exigences de performances physiques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Innovation dans les méthodes de fabrication

- **Les technologies de fabrication additive** telles que la fusion sélective par laser (SLM) et la fusion par faisceau d'électrons (EBM) ont commencé à être utilisées pour la fabrication rapide de plaques d'alliage de tungstène personnalisées ;
- Des technologies avancées telles que le pressage isostatique à chaud sous vide et le laminage assisté par ultrasons sont utilisées pour préparer des plaques à haute densité afin d'améliorer la cohérence et la stabilité organisationnelle des produits finis.

3. Expansion accélérée des applications internationales

- Les États-Unis, le Japon, l'Allemagne et d'autres pays utilisent largement des plaques d'alliage de tungstène dans les véhicules d'exploration lunaire, les réacteurs expérimentaux de fusion nucléaire (tels que le projet ITER) et les composants d'accélérateurs avancés ;
- La technologie de fabrication de plaques en alliage de tungstène de la Chine est également passée progressivement d'une « dépendance aux matières premières » à un nouveau modèle de « conception indépendante, de production de masse et d'intégration militaro-civile », formant un certain nombre d'entreprises de premier plan et de laboratoires nationaux clés.

V. Perspectives des tendances futures du développement

Avec l'avancement de nouvelles stratégies de matériaux et l'augmentation de la valeur des ressources en tungstène, l'orientation future du développement des plaques en alliage de tungstène se concentrera sur les points suivants :

- **Intégration fonctionnelle** : une plaque d'alliage multifonctionnelle qui intègre la conduction thermique, la conduction électrique et la résistance aux rayonnements ;
- **Adaptabilité extrême au service** : plaques de tungstène haute densité résistantes aux hautes températures et aux chocs pour les environnements complexes tels que l'espace, la fusion nucléaire et les profondeurs terrestres ;
- **Fabrication verte et développement durable** : conception et fabrication à grande échelle de systèmes d'alliages à faible consommation d'énergie, recyclables et respectueux de l'environnement ;
- **Intégration intelligente des matériaux** : intégrez la détection, l'auto-réparation et d'autres fonctions dans la structure de la plaque en alliage de tungstène pour s'adapter au développement des futurs systèmes intelligents.

En résumé, le développement des plaques en alliage de tungstène illustre parfaitement l'interaction profonde entre la science des matériaux et les besoins industriels. Des premiers échantillons de laboratoire de physique aux matériaux de structure clés modernes, performants et hautement stables, les plaques en alliage de tungstène, grâce à leurs propriétés uniques et complètes, jouent un rôle de plus en plus important dans le système mondial des technologies des matériaux. À l'avenir, leur potentiel d'application dans les nouvelles énergies, la fabrication de pointe, les sciences et technologies de la défense nationale, et dans d'autres domaines, continuera de croître.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.3 Classification des plaques en alliage de tungstène (par composition, procédé et fonction)

Les plaques en alliage de tungstène sont largement utilisées en raison de leur grande variété et de leurs performances variées. Pour une compréhension plus systématique des caractéristiques de performance et des scénarios d'application des plaques en alliage de tungstène, il est nécessaire de les classer selon plusieurs critères, tels que la composition du matériau, le procédé de préparation et l'application. Les méthodes de classification détaillées suivantes pour les plaques en alliage de tungstène sont présentées selon trois perspectives principales : **la classification par composition, la classification par procédé de préparation et la classification par application** .

1. Classification par composition d'alliage

Les plaques en alliage de tungstène sont fabriquées selon leurs principaux alliages. En production et en application, les différents métaux liants influencent considérablement les propriétés physiques, l'aptitude à la transformation et la fonctionnalité des plaques.

1. Plaque en alliage W-Ni-Fe (type conventionnel)

- **Caractéristiques de composition** : La teneur en tungstène est généralement de 85% à 97%, complétée par du Ni et du Fe comme phases de liaison, avec un rapport d'environ Ni:Fe = 7:3.
- **Caractéristiques de performance** : Excellente résistance, ténacité et usinage équilibré. C'est la plaque d'alliage de tungstène structurale la plus courante.
- **Scénarios d'application** : composants inertiels, plaques de contrepoids, structures de protection, etc.

2. Plaque en alliage W-Ni-Cu (type non magnétique)

- **Caractéristiques de composition** : Principalement du tungstène, la phase de liaison est principalement Ni et Cu, souvent utilisée dans les occasions sensibles aux champs magnétiques.
- **Caractéristiques de performance** : non magnétique, bonne conductivité, forte performance de blindage, mais la résistance est légèrement inférieure à celle du système W-Ni-Fe.
- **Scénarios d'application** : équipements médicaux, composants d'imagerie par résonance magnétique (IRM) et housses de protection pour appareils électroniques.

3. Plaque en alliage W-Cu (haute conductivité thermique)

- **Caractéristiques de composition** : Il est composé de tungstène et de cuivre et constitue un matériau composite intermétallique typique.
- **Caractéristiques de performance** : conductivité thermique et électrique extrêmement élevée, résistant aux chocs thermiques, adapté aux applications de gestion thermique.
- **Scénarios d'application** : substrats d'emballage électronique, commutateurs haute fréquence, électrodes et dissipateurs thermiques.

4. Plaque en alliage W-Co (type résistant à l'usure)

- **Caractéristiques de composition** : à base de tungstène, additionné de cobalt (Co) comme métal de liaison.
- **Caractéristiques de performance** : Excellente résistance à l'usure et à la corrosion, et fonctionne bien dans des environnements d'usure mécanique extrêmes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Scénarios d'application** : plaques de protection résistantes aux chocs, revêtements de moules et structures de protection perforantes.

5. Plaque en alliage de tungstène nano-améliorée

- **Caractéristiques de composition** : Introduction de nanoparticules ou de renforts de seconde phase dans le système d'alliage de tungstène traditionnel.
- **Caractéristiques de performance** : La résistance et la ténacité sont considérablement améliorées, adaptées aux domaines avec des exigences de performance extrêmes.
- **Scénarios d'application** : revêtement de réacteur à fusion nucléaire, boîtier de sonde spatiale lointaine, etc.

2. Classification par procédé de formage et de préparation

Les plaques d'alliage de tungstène peuvent être fabriquées à l'aide de diverses voies de traitement, et différents processus affecteront considérablement leur microstructure, leur densité, leurs propriétés mécaniques et leur structure de coûts.

1. Tôle de métallurgie des poudres (PM)

- **Déroulement du procédé** : poudre de tungstène + poudre de liaison → pressage (moulage ou pressage isostatique) → frittage à haute température → traitement à chaud ou laminage.
- **Avantages** : structure dense, performances uniformes, forte contrôlabilité, adapté aux spécifications moyennes et épaisses des plaques.

2. Tôles laminées à chaud et à froid

- **Déroulement du processus** : frittage de la billette → laminage à chaud (ou laminage à froid) en plaque → traitement de surface.
- **Avantages** : haute précision dimensionnelle, bonne qualité de surface, adapté à la production en série.

3. Technologie de durcissement rapide et de ruban adhésif

- **Déroulement du procédé** : Après fusion à haute température, le métal est rapidement refroidi et solidifié pour former de fines bandes ou feuilles.
- **Avantages** : structure raffinée, adaptée aux appareils électroniques haute fréquence.

4. Plaques de fabrication additive (impression 3D)

- **Déroulement du procédé** : fusion laser ou fusion par faisceau d'électrons → accumulation couche par couche → finition.
- **Avantages** : Il peut réaliser une production personnalisée de plaques de formes complexes, adaptées aux composants militaires et aérospatiaux haut de gamme.

5. Plaque composite en alliage de tungstène laminé

- **Flux de processus** : Couche d'alliage de tungstène + autres couches métalliques (telles que le cuivre, le titane) formage par pressage à chaud.
- **Avantages** : Il peut réaliser des composites multifonctionnels et convient aux emballages électroniques et aux domaines des électrodes.

3. Classification par objectif et fonction

Les plaques en alliage de tungstène conviennent à de nombreux secteurs industriels grâce à leur densité élevée, leur résistance aux radiations, leur bonne conductivité thermique et leurs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

excellentes performances de traitement. Elles peuvent être classées selon les applications suivantes :

1. Plaque structurale en alliage de tungstène

- Utilisé pour les structures porteuses, les pièces mécaniques ou les systèmes d'équilibrage dynamique, mettant l'accent sur la résistance mécanique et la stabilité dimensionnelle.
- Applications typiques : volants d'inertie, contrepoids aérospatiaux et plaques d'équilibrage d'arbre.

2. Plaque protectrice en alliage de tungstène

- L'accent est mis sur les capacités de protection, notamment le blindage contre les rayons gamma, les rayons X, les neutrons, etc.
- Applications typiques : panneaux de protection pour équipements de radiothérapie, couches de blindage pour réacteurs nucléaires et structures pare-balles pour cabines d'avion.

3. Plaque en alliage de tungstène pour le contrôle thermique et la dissipation de la chaleur

- L'accent est mis sur la conductivité thermique et la stabilité aux chocs thermiques.
- Applications typiques : plaque de base de dissipation thermique de dispositif semi-conducteur, plaque murale de caloduc, dispositif de refroidissement d'équipement plasma.

4. Plaque en alliage de tungstène fonctionnelle/électronique

- Combinant les fonctions de conductivité, de non-magnétisme et de haute résistance, il est utilisé dans les systèmes électroniques de précision.
- Applications typiques : boîtiers de commutateurs haute fréquence, absorbeurs de micro-ondes et pièces structurales antimagnétiques avioniques.

5. Plaque en alliage composite de tungstène

- Il adopte une structure multicouche et une fabrication composite de matériaux hétérogènes pour réaliser une intégration structurale et fonctionnelle.
- Applications typiques : plaques composites tungstène-cuivre (substrats électroniques), plaques composites tungstène-titane (structures de blindage légères).

IV. Tableau comparatif récapitulatif de la classification

Classification	Principaux types	Mots-clés de la fonctionnalité	Domaines d'application
Élément	W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, W-Cu, W-Co, alliage de nano-tungstène	Densité, magnétisme, conductivité thermique, résistance à l'usure, fonctionnalité améliorée	Industrie militaire, traitement médical, gestion thermique, énergie nucléaire
Technologie	Métallurgie des poudres, laminage, fabrication additive, laminage composite	Densité, précision dimensionnelle, capacité de personnalisation, intégration multifonctionnelle	Fabrication haut de gamme, production de masse et personnalisation de structures complexes
utiliser	Type structurel, type protecteur, type de dissipation thermique, type électronique, type composite	Résistance mécanique, protection contre les radiations, conductivité thermique et électrique, intégration intelligente	Aérospatiale, énergie nucléaire, électronique, médical

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En résumé, en tant que matériau métallique polyvalent et performant, les plaques d'alliage de tungstène nécessitent une approche de classification multidimensionnelle et systématique. En clarifiant la correspondance entre composition, traitement et application, cela aide non seulement les utilisateurs industriels à sélectionner des produits ciblés et adaptés, mais fournit également une référence technique claire pour la recherche et le développement ultérieurs et l'élaboration de normes. Avec l'évolution constante des concepts de conception des matériaux et des méthodes de traitement, la classification des plaques d'alliage de tungstène deviendra plus diversifiée et plus intelligente, s'adaptant aux besoins sophistiqués de la fabrication de pointe de demain.

1.4 Les similitudes et les différences entre la plaque d'alliage de tungstène, la tige de tungstène, le fil de tungstène et la plaque de cuivre de tungstène

Les matériaux à base de tungstène sont largement utilisés dans divers secteurs industriels en raison de leur point de fusion élevé, de leur densité élevée et de leurs excellentes propriétés thermiques et mécaniques. Dans la pratique, les produits à base de tungstène comprennent principalement des plaques d'alliage de tungstène, des tiges de tungstène, des fils de tungstène et des plaques de cuivre-tungstène, selon leur forme et leur fonction. Bien qu'ils appartiennent tous au système à base de tungstène, ils présentent des différences significatives en termes de composition chimique, de méthodes de préparation, de propriétés structurales et d'application. Cette section propose une comparaison horizontale de ces quatre matériaux à base de tungstène typiques afin de permettre au lecteur de bien comprendre la place unique des plaques d'alliage de tungstène au sein de ce système de matériaux.

1. Introduction à la plaque en alliage de tungstène

La plaque en alliage de tungstène est un alliage haute densité composé principalement de tungstène, complété par du nickel, du fer, du cuivre, du cobalt et d'autres éléments. Ses principales caractéristiques sont une densité élevée, une résistance élevée, une bonne résistance aux radiations et une bonne conductivité thermique. Elle convient parfaitement aux pièces structurales à haute résistance, aux plaques de protection et aux composants de dissipation thermique.

Caractéristiques de base :

- Forme : Plaque rectangulaire plate, épaisseur allant de 0,1 mm à 50 mm ;
- Préparation : principalement métallurgie des poudres, laminage à chaud, laminage à froid, fabrication additive, etc.
- Application : Largement utilisé dans les contrepois d'aviation, la protection contre la radiothérapie, le système de contrôle thermique, les composants inertiels, etc.

2. Introduction de la tige de tungstène

La tige de tungstène est l'un des matériaux les plus basiques pour le traitement du tungstène. Généralement cylindrique, elle peut être fabriquée en tungstène pur ou en alliage de tungstène. Sa structure dense est principalement utilisée dans les pièces structurales haute température, les sources d'émission d'électrons, les électrodes haute tension et d'autres domaines.

Caractéristiques de base :

- Forme : tige cylindrique ou carrée, diamètre 2 mm ~ 100 mm ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Préparation : pressage isostatique à chaud/forgeage ou tournage après frittage et pressage ;
- Application : cathode de tube électronique, tige de support, outil d'impact, électrode, etc.

3. Introduction au filament de tungstène

Le fil de tungstène est un fil fin étiré à partir d'un lingot de tungstène. Il présente une excellente résistance au fluage à haute température et une excellente conductivité électrique. C'est un matériau important pour les sources lumineuses, les composants électroniques et les applications de chauffage électrique.

Caractéristiques de base :

- Morphologie : Filaments longs et fins, avec des diamètres allant jusqu'à quelques micromètres ;
- Préparation : Forgeage, laminage et étirage répété ;
- Application : Filament, fil chauffant par évaporation sous vide, source d'émission de faisceau d'électrons.

4. Introduction de la plaque de cuivre tungstène

La plaque de cuivre tungstène est un matériau composite composé de tungstène et de cuivre. Ce matériau composite intermétallique allie le point de fusion élevé du tungstène à la conductivité thermique élevée du cuivre. C'est un matériau essentiel pour la gestion thermique et les applications de contact électrique.

Caractéristiques de base :

- Forme : plaque mince ou plaque moyenne, épaisseur 1 mm ~ 20 mm ;
- Préparation : Pressage par métallurgie des poudres et frittage/composite de pressage à chaud ;
- Application : plaque de base de dissipation thermique, plaque d'électrode, emballage haute fréquence, etc.

5. Analyse comparative des performances et de l'utilisation

Comparer les projets	Plaque en alliage de tungstène	Tige de tungstène	Fil de tungstène	Plaque de cuivre tungstène
Ingrédients principaux	W + Ni/Fe/Cu/Co etc.	Alliage de tungstène ou de W pur	W de haute pureté	W + Cu (généralement 50:50)
Forme typique	Assiettes rectangulaires	Tiges rondes ou carrées	Filament	plat
densité	17,0 à 18,5 g/cm ³	18,5 à 19,2 g/cm ³ (W pur)	Identique à ci-dessus	14,5 à 17,0 g/cm ³
Propriétés mécaniques	Haute résistance et haute ténacité	Dureté élevée, fragilité élevée	Flexible et plastique, haute résistance à la traction	Modéré, alliant dureté et conductivité thermique
Performance thermique	Bonne conductivité thermique,	Excellente stabilité à haute température	Résistance à l'évaporation et au fluage à haute	Excellente conductivité thermique (> 200 W/m·K)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	résistance aux chocs thermiques		température	
Difficulté de traitement	Moyen, usinable et usinable	Difficile à traiter, nécessitant un support d'équipement à haute résistance	Difficile à traiter, nécessitant plusieurs étirages et recuits	Relativement facile à traiter
Applications typiques	Protection contre les radiations, contrepoids, composants de contrôle thermique	Électrodes, supports de champ thermique, composants haute température	Filaments, électronique sous vide, éléments chauffants	Radiateurs, électrodes de commutation, emballages électroniques

6. Résumé des similitudes et des différences

Points communs :

1. Base matérielle : Tous les produits utilisent le tungstène comme élément principal, certains produits sont en tungstène pur et certains sont des alliages à base de tungstène ;
2. Caractéristiques de performance : haute densité, point de fusion élevé et bonnes performances à haute température ;
3. Méthode de production : La plupart d'entre eux sont basés sur le procédé de métallurgie des poudres, complété par un traitement thermique ou un post-traitement ;
4. Domaines clés : Largement utilisé dans les industries haut de gamme telles que l'aérospatiale, l'électronique, l'armée, l'énergie et la médecine.

Différences :

- Différentes formes et fonctions : les plaques sont principalement utilisées pour les pièces de revêtement/structurelles, les tiges sont utilisées pour les pièces de support/pression, les fils sont utilisés pour le chauffage/l'émission et les plaques de cuivre tungstène sont utilisées pour la conduction thermique/le contact électrique.
- Différentes méthodes de traitement : les plaques sont généralement fabriquées par laminage et forgeage, les barres sont principalement fabriquées par frittage et forgeage, les fils reposent sur plusieurs processus d'étirage et les matériaux composites tungstène-cuivre nécessitent des technologies de frittage et de pressage spéciales.
- Différentes conditions d'utilisation : le filament de tungstène met l'accent sur les caractéristiques d'évaporation et de résistance, la plaque de cuivre de tungstène met l'accent sur la dissipation de la chaleur et la conductivité, et la plaque d'alliage de tungstène met l'accent sur la résistance structurelle et les propriétés thermophysiques complètes.

7. Avantages de la plaque en alliage de tungstène

Par rapport aux matériaux à base de tungstène ci-dessus, les plaques en alliage de tungstène présentent des avantages uniques en termes de performances globales et de scénarios applicables :

- Intégration fonctionnelle élevée : haute densité, haute résistance, résistance aux radiations et aptitude au traitement ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Bonne stabilité de forme : la structure en forme de plaque est plus adaptée pour couvrir les systèmes de protection et de contrôle thermique ;
- Large gamme d'applications : il peut réaliser l'intégration de fonctions et la conception intégrée dans de nombreux domaines tels que l'industrie militaire, l'aérospatiale, le traitement médical, l'électronique, etc.

En résumé, les plaques en alliage de tungstène occupent une place stratégique et essentielle dans le système de matériaux à base de tungstène. Elles présentent non seulement les avantages mécaniques des tiges de tungstène, mais aussi les performances thermiques des plaques de cuivre et de tungstène, et offrent une intégrité structurelle et une protection contre les radiations supérieures à celles des fils de tungstène. Avec l'amélioration des technologies de fabrication et l'expansion des domaines émergents, les plaques en alliage de tungstène continueront de jouer un rôle clé dans l'intégration multifonctionnelle à l'avenir.

1.5 Aperçu de l'évolution de la technologie des plaques en alliage de tungstène et des brevets en France et à l'étranger

Filière importante des matériaux métalliques réfractaires hautes performances, les plaques en alliage de tungstène sont largement utilisées dans des domaines clés tels que l'aérospatiale, la protection nucléaire, le conditionnement électronique, les expériences de physique des hautes énergies et les équipements médicaux. Avec l'expansion continue des applications en aval, le monde accorde une attention croissante aux capacités d'innovation technologique, à la protection par brevet et au niveau d'industrialisation des plaques en alliage de tungstène. Cette section analyse systématiquement le développement technologique national et international et la structure de la propriété intellectuelle des plaques en alliage de tungstène sous quatre angles : **le processus d'évolution technologique, les principaux nœuds techniques, les pays et les entreprises représentatifs, ainsi que le contenu et les tendances des principaux brevets** .

1. Aperçu du développement et de l'évolution de la technologie mondiale des plaques en alliage de tungstène

1. Première étape (années 1950-1970) – exploration des matériaux de protection

Le développement initial de la technologie des plaques en alliage de tungstène résultait principalement des besoins militaires de la Guerre froide, notamment dans les domaines des **matériaux de protection haute densité** et du **blindage neutronique** . Les États-Unis et l'Union soviétique ont été les pionniers du développement de plaques en alliage de tungstène, généralement en W-Ni-Fe, par des procédés de métallurgie des poudres. Ces plaques ont été utilisées dans les sous-marins nucléaires, les contrepoids de missiles et les blindages anti-radiations.

Les avancées technologiques représentatives comprennent :

- Contrôle de la taille des particules de poudre de tungstène et mécanisme de frittage à basse température ;
- Contrôle de la densification et de l'uniformité de la microstructure des tôles laminées à chaud ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Établissement d'un système d'alliage non magnétique W-Ni-Cu.

2. Stade de développement mature (années 1980-2000) – panneaux de haute précision et développement multifonctionnel

Au cours de cette période, avec le développement rapide de l'industrie de l'information électronique et la popularisation des équipements de radiothérapie, la technologie des plaques en alliage de tungstène s'est progressivement orientée vers **l'intégration des performances structurelles et des performances fonctionnelles**, et a formé un système de production standardisé dans les pays développés tels que les États-Unis, le Japon et l'Allemagne.

Les principaux développements comprennent :

- Technologie de pressage de plaques à haute densité ;
- Optimisation du contrôle du rapport multi-éléments (comme l'ajout de Co, Mo, Re) ;
- Normalisation des procédés de laminage à froid et de traitement de surface de haute précision.

Durant cette période, des entreprises telles que General Electric (GE) des États-Unis, Plansee d'Allemagne et Mitsubishi Materials (MMC) du Japon occupaient une position de leader en matière de technologie et détenaient un grand nombre de brevets pour des procédés de fabrication et des conceptions d'applications clés.

3. Étape de fabrication avancée (des années 2000 à aujourd'hui) – L'essor des technologies de contrôle de la microstructure et d'intégration des composites

Après être entrées dans le 21^e siècle, les plaques en alliage de tungstène ont réalisé des percées continues dans **la fabrication intelligente, les conditions de service extrêmes et l'intégration fonctionnelle multiple**.

Les technologies représentatives comprennent :

- des plaques d'alliage de tungstène nano-améliorées (W-ZrO₂, W-La₂O₃, etc.) ;
- Les technologies de fabrication additive telles que la fusion sélective par laser (SLM) sont utilisées pour la personnalisation des plaques de tungstène ;
- Les matériaux à gradient fonctionnel (FGM) sont intégrés dans des plaques de structures composites métal/céramique.

Actuellement, les plaques en alliage de tungstène ne sont plus un seul « matériau à densité élevée », mais évoluent vers **une intégration structurelle et fonctionnelle avec de multiples propriétés physiques**.

2. Parcours de développement et réalisations de la technologie nationale des plaques en alliage de tungstène

La Chine, pays possédant les plus grandes réserves et la plus grande production de tungstène au monde, a démarré tardivement dans la technologie des matériaux en alliage de tungstène, mais s'est développée rapidement et a rattrapé son retard dans de nombreux domaines clés ces dernières années.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Dépendance initiale à l'importation et à l'imitation (années 1980-1990)

En Chine, les plaques en alliage de tungstène étaient initialement concentrées dans les domaines de la défense nationale et de l'industrie nucléaire, sous l'impulsion de l'Académie chinoise des sciences, de la China Aerospace Science and Industry Corporation et d'instituts de recherche militaire. La plupart des technologies provenaient du système soviétique ou étaient importées de l'étranger.

2. Établissement du système et expansion industrielle (années 2000-2010)

Avec le développement de la technologie nationale de métallurgie des poudres, un certain nombre d'universités et d'entreprises clés (telles que Xiamen Jinlu, China Tungsten High-Tech, AVIC New Materials et Baoti Group) ont progressivement formé un système de processus complet allant de la préparation de la poudre de tungstène, du dosage de l'alliage au laminage des plaques.

Les avancées technologiques majeures comprennent :

- Pressage et frittage de plaques d'alliage à faible porosité et haute densité ;
- Optimisation du rapport de phase liante ;
- Technologie de collage par diffusion par pressage à chaud de plaques composites tungstène-cuivre.

3. La fabrication intelligente et l'innovation indépendante vont de pair (2015 à aujourd'hui)

À l'heure actuelle, la technologie des plaques en alliage de tungstène de la Chine est compétitive à l'échelle internationale dans les domaines des pièces structurelles aéronautiques de haute précision, de la protection de la médecine nucléaire, des cartes d'emballage électronique, etc. De nombreuses technologies clés ont remporté des prix nationaux de science et de technologie et ont été appliquées dans des projets tels que le gros avion C919, la cabine de la station spatiale et la structure de ciblage des radiations nucléaires.

3. Analyse de la répartition mondiale des brevets technologiques clés des plaques en alliage de tungstène

1. Répartition régionale des brevets

Selon les statistiques de l'OMPI et de l'Administration nationale chinoise de la propriété intellectuelle (CNIPA), d'ici fin 2024, il existe plus de 4 000 brevets valides liés aux plaques en alliage de tungstène dans le monde, principalement répartis comme suit :

Pays/Région	Proportion (%)	Principaux demandeurs de brevets
Chine	45%	Chine Tungsten High-Tech, Xiamen Jinlu, Institut de recherche sur les métaux non ferreux de Pékin, Baoti, etc.
USA	vingt-deux%	Plansee, GE, Kennametal, etc.
Japon	13%	Matériaux Mitsubishi, Sumitomo Electric Industries, Ltd., Tokyo Steel, etc.
Allemagne	8%	HC Starck, Plansee, etc.
Corée du Sud, Russie	5%	POSCO, TRINITY, etc.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Autres domaines	7%	Suisse, Israël, Inde, etc.
-----------------	----	----------------------------

2. Répartition des types de technologies brevetées

Le contenu du brevet peut être résumé en cinq directions techniques principales :

Direction technique	Contenu représentatif
Innovation dans la formule des alliages	Rapport des séries W-Ni-Co, W-Cu-Re, W-Mo
Régulation de la microstructure	Mécanisme de renforcement nanocristallin et contrôle de la distribution des précipités
Traitement des plaques et traitement de surface	Technologie de laminage multi-passes, polissage électrolytique, traitement de surface au plasma
Structure composite et technologie de collage	Pressage de plaques composites tungstène-cuivre, tungstène-titane, brasage/liaison par diffusion
Conception de l'adaptabilité des applications	Structure du module de protection de radiothérapie, conception d'optimisation de la distribution des plaques chauffantes, etc.

IV. Exemples représentatifs de brevets nationaux et internationaux

Nom du brevet	Pays autorisé	Numéro de brevet	Brève description
Méthode de préparation d'une plaque d'alliage de tungstène W-Ni-Fe à haute densité	Chine	CN108982173B	Proposition d'un procédé pour optimiser la température de frittage et les paramètres de pressage, densité > 99,5 %
Tôle d'alliage de tungstène non magnétique et son procédé de fabrication	USA	US8574432B2	Plaque en alliage W-Ni-Cu, mettant l'accent sur les propriétés non magnétiques et le contrôle de la ductilité
Plaque composite tungstène-cuivre à structure graduée et son procédé de préparation	Japon	JP2018147022A	Plaques fonctionnellement classées W/Cu développées adaptées aux dispositifs électriques conducteurs thermiques à haute fréquence
Module de plaque de protection en alliage de tungstène pour équipement de radiothérapie	Chine	CN110456887A	La conception du système d'épissure de panneaux modulaires améliore l'efficacité de la protection et facilite le remplacement et la maintenance
Poudre de plaque d'alliage de tungstène pour la fabrication additive et son procédé de frittage laser	Allemagne	DE102018001328A1	Une composition de poudre sphérique spéciale et une méthode de contrôle des paramètres adaptée à la préparation SLM de plaques de tungstène sont proposées.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

V. Perspectives sur les tendances du développement de la technologie et de la propriété intellectuelle

1. Évolution de la « performance physique unique » à « l'intégration multifonctionnelle »

À l'avenir, les plaques en alliage de tungstène répondront non seulement aux exigences de densité ou de résistance, mais intégreront également de multiples propriétés telles que la conductivité thermique, la conductivité électrique, la résistance à la corrosion et la résistance aux radiations.

2. La technologie de fabrication additive permettra le développement de cartes personnalisées

L'impression 3D de plaques en alliage de tungstène à base de faisceau laser/électrons sera largement utilisée dans des structures personnalisées complexes telles que la défense et l'énergie nucléaire.

3. Les brevets haut de gamme et les barrières technologiques seront encore plus élevés

Les formules de base, les structures composites et le contrôle de la microstructure des plaques deviendront le centre d'intérêt des grandes entreprises technologiques, et la concurrence en matière de brevets devient de plus en plus féroce.

4. La Chine passera progressivement d'un « pays de quantité de brevets » à un « pays de qualité de brevets ».

Promouvoir la mondialisation des droits de propriété intellectuelle en améliorant la base de données matérielle, en établissant un système de normes de processus et en renforçant la collaboration et la mise en page internationales en matière de brevets.

En résumé, l'évolution mondiale de la technologie des plaques en alliage de tungstène présente les caractéristiques suivantes : « origine militaire – expansion industrielle – intégration multifonctionnelle – fabrication intelligente » en quatre étapes. Son système de brevets devient de plus en plus complexe et les technologies clés sont majoritairement oligopolistiques. Bien que la Chine ait démarré un peu plus tard, elle accélère la construction d'un système d'innovation indépendant et contrôlable grâce à ses avantages en termes de ressources et à son système industriel. La concurrence future autour de la technologie des plaques en alliage de tungstène et les droits de propriété intellectuelle deviendront un axe stratégique majeur dans le domaine des nouveaux matériaux à l'échelle mondiale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

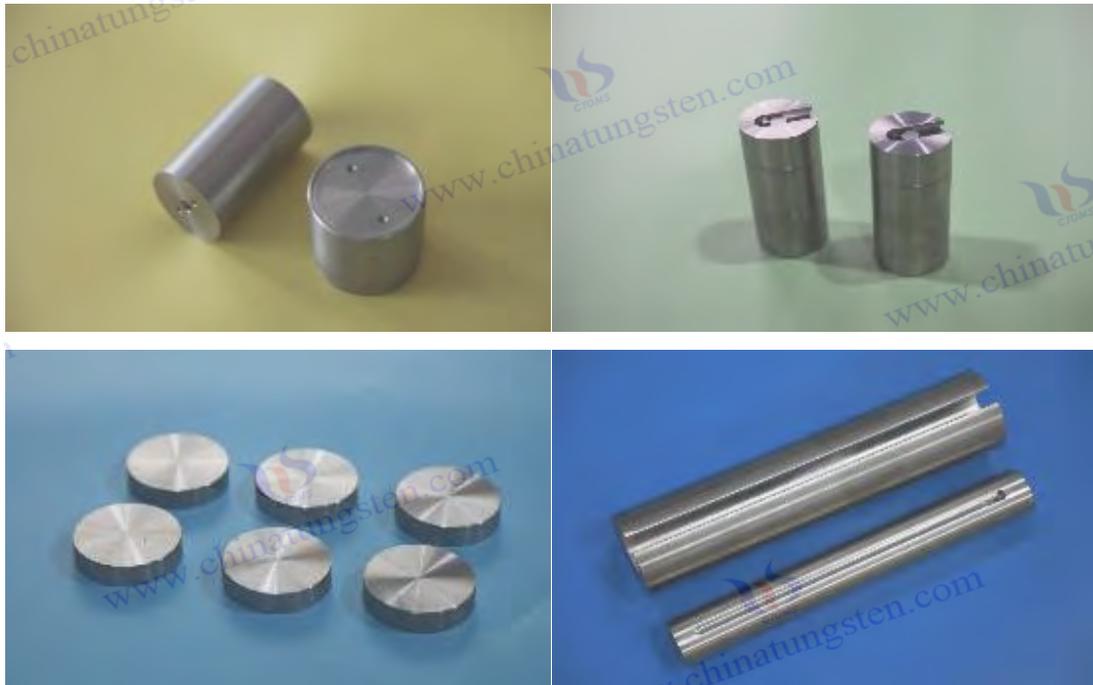
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

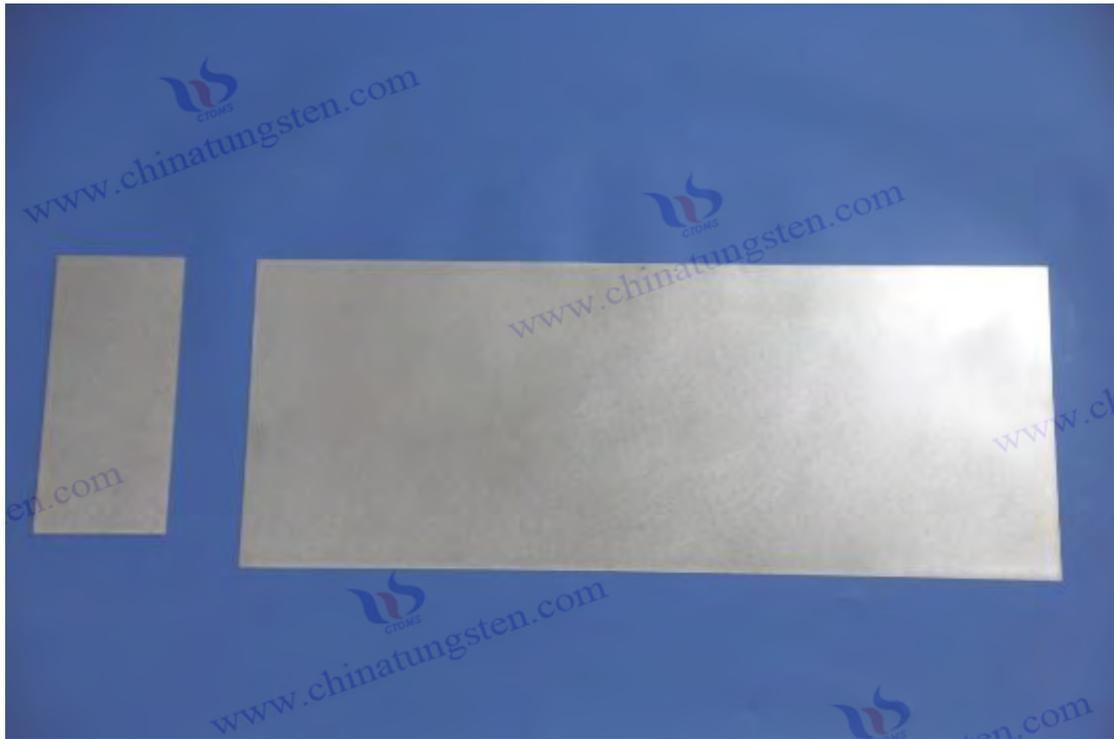
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



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

2.1 Précision du contrôle de la densité, de la gravité spécifique et de la taille

Matériau composite métallique hautes performances à base de tungstène, les propriétés physiques des plaques en alliage de tungstène dépendent largement de **l'uniformité du contrôle de la densité, de la constance de la densité et de la précision des dimensions**. Dans des secteurs tels que l'aérospatiale, l'industrie nucléaire et les dispositifs médicaux de précision, qui exigent une qualité et une précision structurelle extrêmement élevées, même de légers écarts dans ces paramètres peuvent entraîner des erreurs systématiques, une perte de résistance ou des déséquilibres de dilatation thermique. Par conséquent, cette section explorera systématiquement les indicateurs de base et les exigences techniques des propriétés physiques des plaques en alliage de tungstène sous trois angles : « Technologie de contrôle de la densité et de la densité », « Normes de précision du contrôle dimensionnel » et « Facteurs clés influant sur le processus ».

1. Densité et gravité spécifique de la plaque en alliage de tungstène

1. Définition de la masse volumique et de la gravité spécifique

- **Densité** : désigne la masse par unité de volume, généralement exprimée en g/cm^3 , et constitue le paramètre de base pour mesurer la densité d'un matériau ;
- **Gravité** : désigne le rapport entre la densité du matériau et la densité de l'eau pure ($4^{\circ}C$, $1 g/cm^3$), souvent utilisé comme norme pour la classification intuitive des alliages à haute densité.

La densité théorique du tungstène est de $19,25 g/cm^3$, tandis que la densité de la plaque d'alliage de tungstène dépend généralement de sa composition en alliage et de son degré de densification :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Type d'alliage	Plage de densité typique (g/cm ³)
W-Ni-Fe	17,0–18,5
W-Ni-Cu (type non magnétique)	16,5–18,0
W-Cu (type conducteur thermique)	14,5–17,0
Alliage de tungstène nano-amélioré	≥18,5 (théoriquement >99,9% dense)

2. Points techniques du contrôle de la densité

Le contrôle de la densité n'est pas seulement un simple rapport entre les composants de l'alliage, mais plus important encore, il est nécessaire d'atteindre les points suivants dans l'ensemble du processus de fabrication :

- **Optimisation de la distribution granulométrique des particules de poudre :** L'ajustement du rapport entre la poudre fine et la poudre grossière peut réduire efficacement la porosité ;
- **Cohérence du processus de pressage :** Le moulage/pressage isostatique doit maintenir une pression uniforme par unité de volume ;
- **Densification par frittage à haute température :** Le frittage assisté par phase liquide ou le frittage multi-étapes peut améliorer considérablement la densité finale ;
- **Traitement thermique et ajustement de la densification après laminage :** La réhomogénéisation de la structure après laminage peut encore améliorer la densité du matériau.

3. Exigences de consistance pour la gravité spécifique

Dans les applications d'ingénierie, notamment pour les **contreponds** et les **composants inertiels**, la constance de la densité a un impact direct sur **l'équilibre dynamique** et **le temps de réponse structurel de la machine**. Les normes internationales courantes, telles que ASTM B777 et MIL-T-21014, imposent des tolérances de densité strictes, exigeant généralement des variations de densité d'un lot à l'autre ne dépassant pas $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$. Pour certains composants de précision, cette limite est même limitée à $\pm 0,05 \text{ g/cm}^3$.

2. Précision du contrôle de la taille des plaques en alliage de tungstène

1. Aperçu des paramètres de taille

Les plaques en alliage de tungstène impliquent trois dimensions clés :

- **Épaisseur :** généralement comprise entre 0,1 mm et 50 mm, et certains produits spéciaux peuvent atteindre 0,05 mm ;
- **Longueur et largeur :** Varie en fonction de l'application, généralement dans la plage de 50 mm à 500 mm ;
- **Planéité et angle des bords :** directement liés à l'assemblage de la planche et à l'intégrité du panneau.

2. Norme de précision dimensionnelle

Les normes de référence internationales de tolérance dimensionnelle couramment utilisées comprennent :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Norme n°	projet	Niveau de précision	Remarque
ASTM B777	Tolérance d'épaisseur et de largeur	± 0,05–0,2 mm	Classification par épaisseur de tôle et état de laminage
GB/T 3876	Longueur, différence diagonale	±0,3 mm	Spécifications générales des normes nationales
ISO 2768-f	Niveau de tolérance pour une tôle plus précise	Bien	Pour les applications de précision telles que l'électronique et le traitement médical

Certaines plaques en alliage de tungstène haut de gamme, telles que celles utilisées dans les systèmes de collimation de radiothérapie ou les plaques structurelles pour les détecteurs nucléaires, nécessitent même **une découpe laser et un fraisage CNC** pour obtenir un contrôle de précision géométrique à $\pm 0,01$ mm.

3. Facteurs clés du processus affectant le contrôle de la taille

- **Précision du moule et uniformité du pressage** : affectent directement la cohérence dimensionnelle de la feuille vierge ;
- **Prédiction et contrôle du taux de retrait de frittage** : Le retrait linéaire pendant le frittage est d'environ 10 à 15 %, ce qui nécessite un calcul précis ;
- **Contrôle de la déformation par laminage et du rebond élastique** : Le laminage à chaud et le laminage à froid doivent estimer pleinement le durcissement du matériau et la compensation de la déformation ;
- **Contrôle post-traitement** : y compris le meulage, le polissage, le rognage et d'autres processus doivent être coordonnés avec l'objectif de contrôle de précision dimensionnelle.

3. Influence synergique de la densité et de la précision dimensionnelle

Les plaques d'alliage de tungstène ne sont pas isolées, mais présentent des propriétés physiques clés qui se restreignent et s'optimisent mutuellement. Par exemple :

- Une densité élevée s'accompagne souvent d'une tendance accrue au gauchissement des plaques, et leur planéité doit être optimisée grâce à un chemin de laminage raisonnable ;
- Lorsque la tolérance dimensionnelle est réduite, les exigences en matière d'uniformité de la structure interne de la plaque sont également plus élevées ;
- De faibles fluctuations d'épaisseur dans les tôles de précision peuvent amplifier l'impact sur l'évaluation de la gravité spécifique et la dynamique des composants fonctionnels.

Par conséquent, dans la pratique industrielle, le « système de contrôle bidimensionnel densité-taille » des plaques d'alliage de tungstène doit généralement s'appuyer sur une **simulation numérique** (telle que l'analyse de déformation thermique par éléments finis), un **équipement de mesure intelligent** (interféromètre laser, machine de mesure à trois coordonnées) et un **système de gestion de la qualité** (tel que ISO 9001, AS9100) pour garantir que le produit final répond aux exigences de fiabilité élevées.

IV. Résumé

La densité et la densité des plaques en alliage de tungstène sont des indicateurs clés pour évaluer leur stabilité physique globale et leur résistance structurelle, tandis que la précision du contrôle

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dimensionnel détermine leur adaptabilité et leur interchangeabilité dans les systèmes de fabrication haut de gamme. Dans un contexte de développement de nouveaux matériaux axés sur les performances, la microstructure et l'intégration, la technologie de contrôle dimensionnel et de densité des plaques en alliage de tungstène évolue constamment vers une « **haute densité, haute précision et fabrication intelligente** ».

2.2 Résistance à la traction, limite d'élasticité et ténacité à la rupture

En tant que matériau de structure hautes performances, les propriétés mécaniques des plaques en alliage de tungstène, telles **que la résistance à la traction**, la limite d'élasticité et la ténacité à la rupture, déterminent directement leur applicabilité, leur sécurité et leur longévité lorsqu'elles sont soumises à des charges externes et à des contraintes à haute température. Dans des applications telles que l'aérospatiale, la physique des hautes énergies et les blindages de protection, le matériau doit non seulement présenter une résistance élevée, mais également maintenir son intégrité structurelle dans des conditions extrêmes telles que la concentration de contraintes, les charges d'impact et la fatigue thermique. Par conséquent, une compréhension approfondie du comportement mécanique des plaques en alliage de tungstène est essentielle à leur conception, leur fabrication et leurs applications techniques.

1. Définition de base de la résistance à la traction et de la limite d'élasticité

- **Résistance (UTS)** : Contrainte maximale qu'un matériau peut supporter sous traction uniaxiale. Son unité est le MPa ou le ksi, ce qui reflète la capacité portante ultime du matériau.
- **Résistance (YS)** : désigne la valeur de contrainte à laquelle le matériau commence à subir une déformation plastique sous l'action d'une force externe. C'est un indicateur important de la limite de sécurité de la structure conçue.

Les plaques en alliage de tungstène, grâce à leur densité élevée et à leur forte adhérence, présentent une résistance bien supérieure à celle des alliages de structure classiques. Les paramètres typiques sont les suivants :

Système d'alliage	Résistance à la traction (MPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Remarque
W-Ni-Fe	700-1000	500-750	Dans des conditions de température normales
W-Ni-Cu (type non magnétique)	600-850	450-700	Ductilité légèrement meilleure
Plaque en alliage Nano W	>1000	>850	Taille des particules < 500 nm, avec mécanisme de renforcement

Remarque : Les propriétés mécaniques réelles varient en fonction de la proportion d'alliage, de l'état du traitement thermique, de l'épaisseur de la plaque, de la microstructure et sont soumises à des normes de test (telles que ASTM E8/E8M, GB/T 228.1).

2. Analyse du mécanisme microscopique de l'intensité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La plaque en alliage de tungstène est principalement contrôlée par les facteurs suivants :

1. **Matrice de tungstène** : Selon la relation Hall-Petch, plus le grain est fin, plus la limite d'élasticité est élevée. Les alliages de tungstène nanocristallins présentent une résistance extraordinaire grâce à leur structure à grains ultrafins ;
2. **Phase de liaison métallique multiphasée (Ni, Fe, Cu)** : forme une distribution continue ou en réseau pendant le processus de frittage, forme une interface de phase de transition avec les particules de tungstène et améliore la plasticité ;
3. **Porosité et contrôle des défauts** : Une densité élevée (> 98,5 %) peut réduire l'initiation des microfissures et améliorer la résistance à la traction ;
4. **Contrainte résiduelle et état du traitement thermique** : La contrainte résiduelle due au travail à chaud ou au laminage réduira l'uniformité de la résistance, et le traitement de recuit aide à stabiliser la résistance ;
5. **Mécanisme de renforcement des éléments** : l'ajout de Re, Mo, etc. peut former une phase de renforcement, inhiber le mouvement de dislocation et augmenter la limite d'élasticité.

3. Ténacité à la rupture et comportement à la rupture

1. Définition et importance

La **ténacité à la rupture** (K_{IC}) désigne la capacité d'un matériau à résister à la rupture en présence d'entailles ou de fissures. Il s'agit d'un paramètre essentiel pour mesurer la redondance de sécurité structurelle. Son unité est le $MPa \cdot m^{1/2}$.

L'alliage de tungstène présente une résistance élevée. Sa ténacité à la rupture est bien inférieure à celle de l'alliage de titane ou de l'alliage d'aluminium en raison de la fragilité de la matrice de tungstène elle-même. Il est donc particulièrement important d'optimiser les performances de ténacité dans les domaines de la protection et des impacts structurels.

2. Paramètres de ténacité typiques

Type d'alliage	Ténacité à la rupture K_{IC} ($MPa \cdot m^{1/2}$)	Remarque
Plaque ordinaire W-Ni-Fe	15–25	Valeur de test de température normale
Plaque W-Ni-Cu raffinée	20–30	Type non magnétique, ductilité légèrement meilleure
Plaque en alliage W nano-renforcée	30–45	Renforcement des grains ultrafins, ténacité considérablement améliorée

3. Mécanisme de propagation des fissures

La plaque en alliage de tungstène sous charge de traction présente les caractéristiques suivantes :

- **Température de transition fragile-ductile élevée** : la plupart des plaques en alliage W présentent une rupture quasi fragile à température ambiante ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Mécanisme de déviation des fissures** : La phase de liaison Ni/Cu dans la structure multiphasée peut absorber partiellement l'énergie de propagation des fissures, ce qui entraîne une déviation ;
- **La plaque en alliage de tungstène à grains fins présente un plan de quasi-clivage** : une partie de celle-ci présente un mode composite de clivage en fossettes.

Afin d'améliorer la ténacité à la rupture, les méthodes suivantes sont souvent utilisées :

- Contrôler la distribution granulométrique de la poudre pour éviter la concentration de contraintes causée par les grosses particules ;
- Améliorer la continuité et la ténacité de la phase de collage ;
- Après le traitement thermique de la plaque, un « laminage directionnel » est effectué pour passer les fissures qui s'étendent le long de l'interface.

4. Méthodes et normes d'essai des propriétés mécaniques

1. **Essai de résistance à la traction** : à l'aide d'éprouvettes haltères standard, selon les normes ASTM E8 ou GB/T 228.1 ;
2. **Essai de ténacité à la rupture** : un échantillon de poutre entaillée à bord unique (SENB) ou un échantillon compact (CT) est généralement utilisé, se référer à la norme ASTM E399 ;
3. **Contrôle des conditions de test** :
 - Température : de la température ambiante à la température élevée (300°C–800°C) ;
 - Directionnalité : La différence de performance entre la direction de l'épaisseur de la plaque et la direction du laminage est significative ;
 - Taille des fissures/taux de charge, etc.

5. Analyse comparative avec d'autres matériaux à haute résistance

Type de matériau	Résistance à la traction (MPa)	Ténacité à la rupture (MPa·m ^{1/2})	Avis sur les applications
Alliage de titane Ti-6Al-4V	~900	~50–60	Excellentes performances globales, adaptées aux structures aéronautiques
Alliage d'aluminium haute résistance 7075	~600	~25–35	Faible densité mais pas aussi résistant que l'alliage de tungstène
Plaque en alliage de tungstène (W-Ni-Fe)	800–1000	20–30	Haute densité et haute résistance, adapté aux structures d'inertie et de protection
Plaque composite en cuivre et tungstène	~600	~15	Bonne conductivité thermique mais ténacité légèrement inférieure, adaptée aux composants de dissipation thermique

Les plaques en alliage de tungstène surpassent largement les alliages d'aluminium et de titane en termes de résistance et de densité, mais présentent une ténacité légèrement inférieure. Elles

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conviennent aux **pièces structurales compactes, soumises à des charges importantes et exigeant une réponse instantanée aux chocs élevée**, telles que les contrepoids aérospatiaux, la protection des réacteurs nucléaires et les structures de projectiles perforants.

VI. Résumé

Les plaques en alliage de tungstène offrent des niveaux élevés de résistance à la traction et d'élasticité, tout en conservant une densité et une résistance thermique élevées, et en optimisant continuellement leur ténacité à la rupture. Grâce à un contrôle précis du grain, à la conception des phases de liaison et à des procédés de traitement thermique améliorés, les plaques modernes en alliage de tungstène ont progressivement développé une capacité structurale complète alliant résistance élevée et ténacité contrôlée. Cela en fait des matériaux aux atouts irremplaçables dans des secteurs clés tels que la défense, l'aérospatiale, les dispositifs médicaux et le refroidissement électronique.

2.3 Dureté et résistance à l'usure

En tant que matériau métallique avancé à haute densité, haute résistance, résistance à la chaleur et à la corrosion, la **dureté** et la **résistance à l'usure** de la plaque d'alliage de tungstène sont des paramètres clés pour mesurer sa durée de vie et sa stabilité structurale, en particulier dans les domaines des pièces mobiles à grande vitesse, des surfaces de contact d'impact, des conditions de frottement fort, etc. Ces deux propriétés ne sont pas seulement contrôlées par la microstructure du matériau lui-même, mais également étroitement liées à sa conception de composition, à son processus de préparation et à son état de traitement de surface.

1. Base de dureté de la plaque en alliage de tungstène

1. Définition de la dureté et unités courantes

La dureté désigne la capacité d'un matériau à résister à une déformation plastique locale, à l'indentation ou aux rayures. La dureté des plaques en alliage de tungstène s'exprime généralement de la manière suivante :

- **Dureté Brinell (HB)** : Applicable aux plaques de tungstène épaisses, reflétant l'état de durcissement global ;
- **Dureté Vickers (HV)** : adaptée à la mesure de précision, notamment pour la recherche sur la microstructure ;
- **Dureté Rockwell (HRC/HRB)** : Convient aux tests rapides sur site des plaques d'alliage de dureté moyenne.

2. Plage de dureté courante des plaques en alliage de tungstène

Type d'alliage	Plage de dureté typique
Plaque en alliage W-Ni-Fe	200–300 HB
Plaque en alliage W-Ni-Cu	180–260 HB
Plaque en alliage de tungstène haute résistance	320–400 HB
Plaque composite en cuivre tungstène (surface dure)	150–200 HB
Plaque en alliage de tungstène nanocristallin	≥ 400 HV

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

D'une manière générale, plus la teneur en tungstène est élevée, plus la densité est élevée et plus les grains sont fins, plus la dureté du matériau est élevée.

3. Mécanismes microscopiques affectant la dureté

- **La dureté intrinsèque de la matrice de tungstène est extrêmement élevée** : la dureté Vickers du tungstène pur peut atteindre 350–450 HV, ce qui confère au matériau une résistance globale à la déformation ;
- **Effet de renforcement de la structure multiphasée** : Ni, Fe, Cu et d'autres phases de liaison sont dispersés pour améliorer la capacité de dispersion des contraintes ;
- **Affinage et renforcement du grain** : Le mécanisme Hall-Petch améliore considérablement la résistance aux mouvements de dislocation microscopiques ;
- **Effets du traitement thermique** : le recuit réduit la dureté et augmente la ductilité ; les traitements de renforcement de la solution et de vieillissement augmentent la dureté globale.

2. Résistance à l'usure de la plaque en alliage de tungstène

1. Définition et importance de la résistance à l'usure

Usure physique, décollement de surface ou micro-dégâts lors des mouvements de contact. Les plaques en alliage de tungstène, en raison de leur dureté élevée, de leur point de fusion élevé et de leur forte liaison métallique, sont souvent utilisées dans les composants de friction, les gabarits de moules, les bagues de roulement rotatives et d'autres applications où elles doivent **maintenir un faible taux d'usure malgré le frottement à sec, les charges élevées et les milieux corrosifs** .

2. Analyse du mécanisme de résistance à l'usure

Les plaques en alliage de tungstène sont principalement dominées par les mécanismes suivants :

- **La phase hautement dure domine la résistance à l'usure** : les grains de tungstène eux-mêmes ont une dureté élevée, ce qui peut empêcher efficacement la coupe par des particules étrangères ou des bords d'outils ;
- **Fonction de contrôle de l'usure de la phase de liaison** : Bien que les phases métalliques telles que Ni et Cu soient relativement molles, elles peuvent amortir les charges d'impact et améliorer la résistance à l'usure par impact ;
- **Le contrôle de la porosité et des défauts est essentiel** : plus il y a de micropores, plus la surface est susceptible de se décoller par fatigue ;
- **Mécanisme d'amélioration du traitement de surface** : si la plaque en alliage de tungstène est traitée par nitruration au plasma, galvanoplastie au nickel et pulvérisation d'une couche de céramique, la résistance à l'usure peut être considérablement améliorée.

3. Tests et données typiques de résistance à l'usure

Les tests courants comprennent :

- **Essai de frottement à sec (axe sur disque)** : Détermination du taux d'usure volumique et du coefficient de frottement ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Essai d'usure de la meule (ASTM G65)** : utilisé pour évaluer la résistance à l'érosion et aux rayures ;
- **Test d'usure par impact à grande vitesse** : simule l'environnement d'érosion balistique (tel que la chaleur de frottement du noyau du projectile perforant).

Voici quelques exemples de résultats de tests :

Type de matériau	Taux d'usure (mm ³ / N·m)	Coefficient de frottement	Conditions de test
Carte W-Ni-Fe	$2,1 \times 10^{-6}$	0,18	Frottement à sec, 20 N, RT
Plaque en alliage W à oxydation de surface	$1,3 \times 10^{-6}$	0,12	La couche d'oxyde a une épaisseur d'environ 2 μm
Plaque composite en zircone-W projetée	$0,8 \times 10^{-6}$	0,10	La couche de céramique améliore considérablement la résistance à l'usure

3. Mesures techniques pour améliorer la dureté et la résistance à l'usure

1. Optimisation de la conception des matériaux :

- Augmenter la teneur en tungstène et contrôler le rapport de phase de liaison ;
- Ajoutez des éléments de renforcement (tels que Mo, Co, Re) ;
- Mécanisme de renforcement de la dispersion des nanoparticules ;

2. Contrôle de la microstructure et traitement thermique :

- Le frittage en plusieurs étapes améliore la densité ;
- Un refroidissement rapide ou un recuit à température contrôlée réduit les gros grains ;

3. Technologie de traitement de surface :

- Nitruration plasma ou revêtement en nitrure de silicium ;
- Projection d'une couche de carbure ou d'une couche de céramique ;
- Le revêtement de surface au laser forme un revêtement dense.

4. Conception de structures composites :

- plaques structurelles composites en céramique résistantes à l'usure telles que W-TiC et W-ZrO₂ ;
- Traitement de durcissement local pour créer une surface à dureté graduée.

4. Cas d'application typiques

- **Carte dissipateur thermique pour équipement électronique** : nécessite un support de haute dureté et une résistance aux rayures ;
- **Couche structurelle pare-balles et antidéflagrante** : la résistance aux chocs et à l'usure est nettement meilleure que celle de l'acier ;
- **Revêtement de moule de traitement à grande vitesse** : résistant à la découpe à haute fréquence et à l'usure par fatigue thermique ;
- **Carte d'interface d'instrument d'avion** : doit résister à des charges de couplage thermomécaniques fréquentes ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les plaques en alliage de tungstène leur confèrent des avantages significatifs en remplaçant les métaux traditionnels résistants à l'usure tels que les alliages à haute teneur en cobalt, l'acier inoxydable et les alliages à base de nickel.

V. Résumé

Les plaques en alliage de tungstène, grâce à leur dureté et leur résistance à l'usure élevées, présentent une valeur d'application irremplaçable dans une variété d'applications haut de gamme et de conditions de travail extrêmes. Leur dureté dépend de la microstructure, de la composition de l'alliage et de l'état de traitement thermique, tandis que leur résistance à l'usure résulte de l'optimisation coordonnée de la dureté, de la conception de la phase liante et de l'ingénierie de surface. À l'avenir, grâce au contrôle de la microstructure nanostructurée, au traitement de surface intelligent et à l'intégration multifonctionnelle des composites, le potentiel d'application des plaques en alliage de tungstène dans les domaines de la résistance à l'usure de précision et du frottement sous fortes charges continuera de croître.

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

Les plaques en alliage de tungstène sont largement utilisées dans l'aérospatiale, l'industrie nucléaire, le refroidissement électronique et d'autres domaines en raison de leur densité élevée, de leur résistance élevée et de leur excellente stabilité à haute température. **La conductivité thermique, les caractéristiques de dilatation thermique et les propriétés mécaniques à haute température du matériau** sont directement liées à sa durée de vie et à sa sécurité dans des environnements thermiques complexes. Cette section se concentrera donc sur l'analyse de ces indicateurs de performance et facteurs d'influence.

1. Conductivité thermique

1. Définition et importance de la conductivité thermique

La conductivité thermique désigne la capacité d'un matériau à conduire l'énergie thermique. Son unité est généralement le $W/(m \cdot K)$. Dans les plaques en alliage de tungstène, une conductivité thermique élevée permet une dissipation rapide de la chaleur, évite l'accumulation de contraintes thermiques et prévient la fatigue thermique et la fissuration du matériau.

2. Caractéristiques de conductivité thermique de la plaque en alliage de tungstène

- La conductivité thermique du tungstène pur est extrêmement élevée, environ $170-180 W/(m \cdot K)$ (à température ambiante) ;
- alliage de tungstène, la conductivité thermique diminuera, mais elle restera toujours à un niveau élevé, généralement $50-100 W/(m \cdot K)$;
- Les plaques en alliage de tungstène composite W-Cu ont une meilleure conductivité thermique, et la conductivité thermique de certains matériaux peut dépasser $200 W/(m \cdot K)$, ce qui les rend adaptées aux applications de gestion thermique efficaces.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Facteurs affectant la conductivité thermique

- **Composition de l'alliage** : La conductivité thermique élevée du cuivre améliore considérablement la conductivité thermique de l'alliage ;
- **Densité** : Une porosité élevée réduit la conductivité thermique ;
- **Microstructure** : la taille des grains et la diffusion de l'interface affectent la transmission du flux de chaleur ;
- **Changements de température** : En général, la conductivité thermique diminue à mesure que la température augmente.

2. Coefficient de dilatation thermique

1. Définition du coefficient de dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique (CTE) indique le rapport de variation dimensionnelle d'un matériau lorsque la température change, et son unité est $10^{-6} / K$. Une correspondance correcte du CTE est essentielle pour éviter la concentration des contraintes thermiques et la défaillance structurelle.

2. Caractéristiques de dilatation thermique de la plaque en alliage de tungstène

- Le tungstène pur a un faible CTE d'environ $4,5-5,0 \times 10^{-6} / K$ (température ambiante à $100^{\circ}C$).
- Avec l'ajout d'éléments d'alliage tels que Ni, Fe et Cu, le CTE augmente, généralement dans la plage de $6 \text{ à } 8 \times 10^{-6} / K$;
- En raison de la teneur élevée en cuivre, le CTE des panneaux composites W-Cu peut atteindre $12-16 \times 10^{-6} / K$, il faut donc faire attention à la correspondance avec les matériaux de connexion.

3. Importance technique

Le CTE n'atteint pas celui des autres matériaux, ce qui peut facilement entraîner des contraintes thermiques, un délaminage des interfaces et des déformations structurelles. Un contrôle strict est particulièrement nécessaire dans les applications aérospatiales et nucléaires, où les cycles thermiques sont fréquents.

3. Performances à haute température

1. Résistance et stabilité à haute température

La plaque en alliage de tungstène peut toujours conserver d'excellentes propriétés mécaniques à haute température, ce qui constitue son avantage important :

- La résistance à la traction à haute température peut être maintenue à 60 à 80 % de la température ambiante ;
- La température de ramollissement thermique dépasse $1200^{\circ}C$, adaptée à une utilisation dans des environnements à haute température ;
- Les points de fusion des éléments tels que Ni et Fe dans l'alliage sont bien inférieurs à ceux du tungstène, ce qui limite la limite de température élevée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Comportement à l'oxydation thermique

Le tungstène et les alliages de tungstène sont susceptibles de former des films d'oxyde cassants dans des environnements d'oxydation à haute température, ce qui affecte leur durée de vie :

- Habituellement, **un revêtement protecteur ou une atmosphère inerte est nécessaire** pour ralentir l'oxydation ;
- La technologie de nano-revêtement et la conception de matériaux composites peuvent améliorer efficacement la résistance à l'oxydation.

IV. Conclusion

Les plaques en alliage de tungstène offrent une excellente conductivité thermique et un faible coefficient de dilatation thermique, ce qui les rend adaptées aux environnements à haute température et à flux thermique élevé. Grâce à la conception de l'alliage et au traitement de surface, la stabilité à haute température et la résistance à l'oxydation du matériau sont constamment améliorées pour répondre aux divers besoins industriels.

2.5 Propriétés électriques, réponse magnétique et résistance aux rayonnements

Les plaques d'alliage de tungstène sont réputées pour leurs excellentes propriétés mécaniques et thermiques, et présentent également des avantages uniques dans les domaines de l'électronique, de l'électromagnétisme et de l'énergie nucléaire. Leurs **propriétés électriques**, **leurs caractéristiques de réponse magnétique** et **leur résistance aux radiations** sont les indicateurs fondamentaux qui déterminent leur stabilité et leur sécurité dans des applications clés telles que les équipements de haute technologie, les structures de réacteurs nucléaires et les matériaux de protection.

1. Propriétés électriques

1. Conductivité et résistivité

- Le tungstène lui-même est un métal de transition avec une conductivité électrique élevée, mais après l'alliage, sa conductivité électrique diminue en raison du dopage avec des éléments tels que Ni, Fe et Cu.
- La résistivité des plaques d'alliage de tungstène varie généralement d'environ 5 à 15 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ (à température ambiante), ce qui est beaucoup plus élevé que celui du cuivre pur (environ 1,68 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$), mais inférieur à celui des matériaux céramiques.
- La résistivité est affectée par la composition de l'alliage, le procédé de préparation, la granulométrie et la température. Lorsque la température augmente, la résistivité présente généralement un coefficient de température positif.

2. Importance technique des propriétés électriques

- Dans les structures de dissipation thermique électronique, les plaques en alliage de tungstène peuvent réduire efficacement la surchauffe des composants électroniques en raison de leur bonne conductivité électrique et thermique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Pour certaines applications de blindage électromagnétique, les propriétés de résistivité des plaques en alliage de tungstène sont également bénéfiques pour réduire les interférences électromagnétiques.

2. Caractéristiques de réponse magnétique

1. Type magnétique

- Le tungstène et la plupart de ses alliages sont paramagnétiques ou faiblement diamagnétiques. L'ajout de Ni et de Fe peut introduire une réponse magnétique, mais le ferromagnétisme des alliages réels est généralement atténué par la forte densité et la structure cristalline du tungstène.
- L'alliage W-Ni-Fe présente un faible magnétisme sous certains rapports et est principalement utilisé dans des applications spéciales qui nécessitent le contrôle des propriétés magnétiques.

2. Paramètres de performance magnétique

- La perméabilité magnétique est faible, adaptée à l'électronique haute fréquence et aux équipements radiofréquence ;
- L'intensité de saturation magnétique est faible, ce qui évite les changements drastiques des propriétés des matériaux causés par les champs magnétiques ;
- Certains alliages de tungstène non magnétiques (tels que le W-Ni-Cu) sont largement utilisés dans les domaines aérospatial et médical pour éviter les interférences du champ magnétique.

3. Résistance aux radiations

1. Mécanisme de résistance aux radiations

- La plaque en alliage de tungstène a un numéro atomique très élevé ($Z = 74$) et une densité élevée, et peut bloquer et absorber efficacement les rayons gamma, les rayons X et le rayonnement neutronique ;
- Sa structure en treillis stable et sa forte force de liaison lui permettent de maintenir l'intégrité du matériau dans un environnement de rayonnement à haute énergie, réduisant ainsi l'expansion, la fragilisation ou la dégradation du matériau causée par le rayonnement ;
- Des éléments tels que Ni et Fe dans l'alliage peuvent améliorer la capacité à réparer les dommages causés par les radiations.

2. Scénarios d'application

- En tant que matériau de blindage protecteur dans les réacteurs nucléaires, il absorbe efficacement les neutrons et les rayons gamma ;
- Housses de protection des équipements de radiothérapie médicale et des composants des appareils de radiothérapie ;
- Protection contre les radiations pour les équipements électroniques des engins spatiaux.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Stabilité des performances dans un environnement de rayonnement

- Les expériences montrent que les propriétés mécaniques des alliages de tungstène changent peu après une irradiation à forte dose et que les dommages microstructuraux sont limités ;
- La technologie de revêtement de surface doit être combinée pour améliorer encore la résistance à l'oxydation et la tolérance aux rayonnements.

4. Conclusion :

la plaque en alliage de tungstène présente une excellente capacité d'adaptation des performances électriques, une faible réponse magnétique et une excellente résistance aux radiations, ce qui lui permet de répondre aux besoins de nombreux domaines de pointe tels que la dissipation thermique électronique, la protection de l'énergie nucléaire et l'aérospatiale. Grâce à la conception de la composition des matériaux et à l'optimisation de la structure composite, ses performances dans les environnements électromagnétiques et radiatifs seront encore améliorées, et son potentiel de développement futur est important.

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

Les plaques en alliage de tungstène sont souvent soumises à des conditions environnementales complexes dans les applications industrielles, telles que l'humidité, l'oxydation atmosphérique, la corrosion acido-basique et l'oxydation à haute température. Leur **résistance à la corrosion** et leur **stabilité chimique** sont essentielles pour garantir un fonctionnement stable à long terme et prolonger la durée de vie du matériau. Cette section analyse systématiquement la résistance à la corrosion, les mécanismes de réaction chimique et les stratégies de protection associées des plaques en alliage de tungstène.

1. Caractéristiques de résistance à la corrosion des plaques en alliage de tungstène

1. Stabilité chimique du

tungstène : Le tungstène métallique possède une forte résistance à la corrosion, notamment en milieu neutre et légèrement alcalin. Son point de fusion élevé et sa forte adhérence ralentissent sa réaction dans la plupart des solutions acides et alcalines, ce qui entraîne la formation d'un film d'oxyde dense à sa surface, assurant ainsi sa protection.

2. Influence des éléments d'alliage :

Les alliages de tungstène contiennent généralement des éléments d'alliage tels que le nickel, le fer et le cuivre. La résistance à la corrosion de ces éléments est relativement faible et peut être à l'origine de corrosion, notamment dans des milieux fortement corrosifs tels que les ions chlorure et l'acide sulfurique.

3. à la corrosion

. La porosité et les microfissures peuvent facilement entraîner une corrosion locale et favoriser la fissuration par corrosion sous contrainte (SCC).

2. Stabilité chimique et mécanisme de corrosion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Oxydation atmosphérique :

l'alliage de tungstène présente une forte résistance à l'oxydation atmosphérique à température ambiante. Un film dense d'oxyde de tungstène (WO_3) peut se former à la surface pour protéger le métal interne d'une oxydation supplémentaire. Cependant, la vitesse d'oxydation s'accélère à haute température, ce qui entraîne un épaississement du film d'oxyde et une fragilité.

2. Corrosion acide et alcaline

- **Environnement acide** : comme l'acide nitrique, l'acide chlorhydrique, etc., la surface de l'alliage de tungstène peut se dissoudre ou une fragilisation par l'hydrogène se produit, et les phases Ni et Fe sont plus sensibles à la corrosion ;
- **Environnement alcalin** : le tungstène et ses oxydes sont généralement stables et faibles face à la corrosion alcaline, mais certaines bases fortes telles que l'hydroxyde de sodium peuvent encore endommager la surface du matériau à des concentrations élevées.

3. Corrosion électrochimique

Dans les milieux électrolytiques, les alliages de tungstène peuvent former un effet de micro-batterie, entraînant une corrosion locale accrue. La phase tungstène agit comme cathode et la phase de liaison de l'alliage peut agir comme anode, formant un courant de corrosion.

3. Mesures techniques pour améliorer la résistance à la corrosion

1. Optimisation de la conception des matériaux

- Augmenter la teneur en tungstène et réduire la proportion de phase sensible à la corrosion ;
- Des éléments résistants à la corrosion tels que le molybdène et le chrome sont ajoutés pour améliorer la stabilité globale.

2. Technologie de protection de surface

- Le traitement d'oxydation de surface forme un film d'oxyde protecteur ;
- Appliquer un revêtement anticorrosion (céramique, composé métallique) ;
- La galvanoplastie de couches métalliques telles que le nickel et le chrome peut améliorer la résistance à la corrosion de surface.

3. Contrôle de l'environnement

- Éviter tout contact avec des milieux corrosifs à forte concentration ;
- Contrôlez la température et l'humidité pour réduire le risque de corrosion électrochimique.

4. Amélioration des processus

- Améliorer la densité et réduire les pores et les microfissures ;
- Traitement thermique raffiné pour améliorer l'uniformité des tissus.

4. Exemples de protection contre la corrosion dans des applications typiques

- **Industrie nucléaire** : Lors de l'utilisation de matériaux de protection en alliage de tungstène, une atmosphère inerte ou un emballage sous vide sont souvent utilisés pour éviter la corrosion par oxydation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Équipement médical** : Les appareils de radiothérapie en alliage de tungstène nécessitent une biocompatibilité et une résistance à la corrosion strictes et sont souvent protégés par des revêtements bio-inertes.
- **Aérospatiale** : Dans les environnements à haute température et à forte humidité, la nitruration de surface ou la pulvérisation de revêtements résistants à la corrosion est nécessaire pour améliorer la stabilité du matériau.

V. Résumé

Les plaques en alliage de tungstène, grâce à leur teneur élevée en tungstène et à leur structure réticulaire stable, présentent une bonne résistance à la corrosion et une bonne stabilité chimique dans la plupart des environnements. Grâce à la conception de l'alliage, au traitement de surface et au contrôle environnemental, le processus de corrosion peut être efficacement inhibé, garantissant ainsi un fonctionnement fiable et durable du matériau dans des conditions d'utilisation difficiles.

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

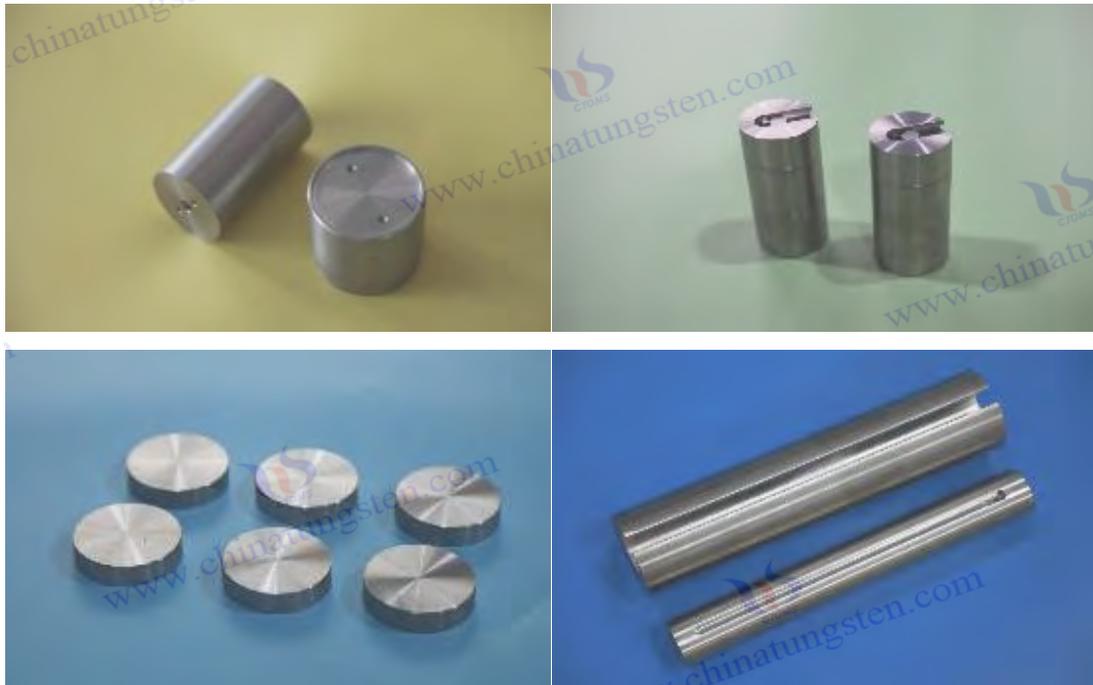
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

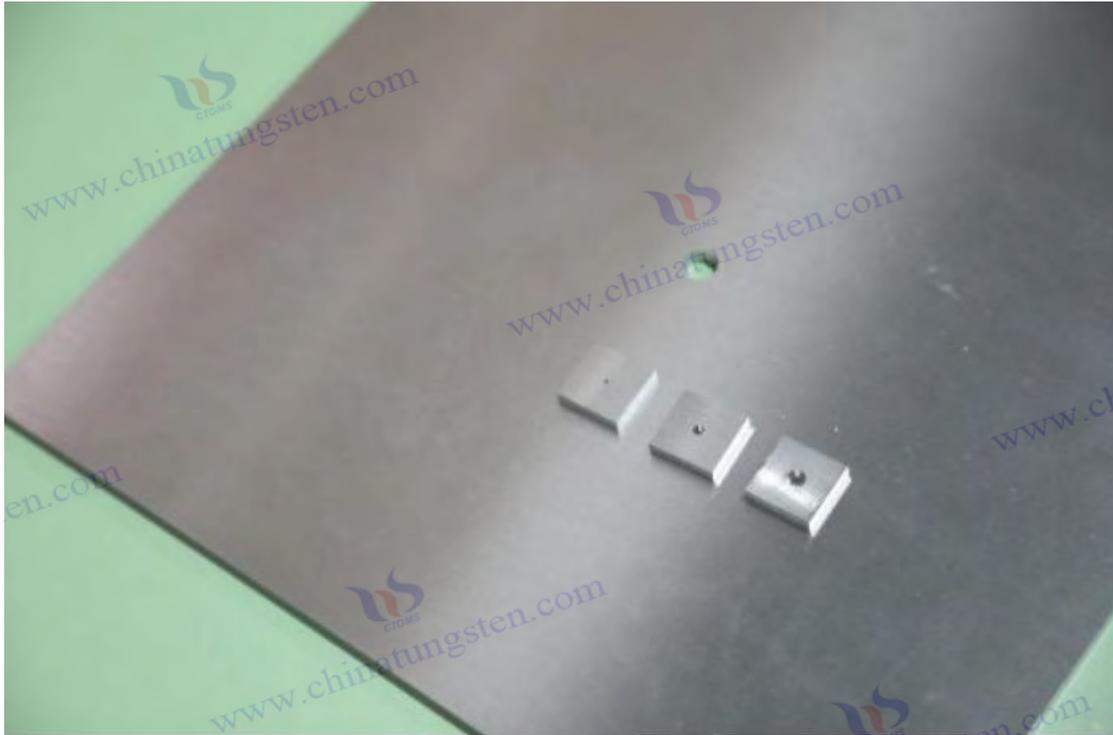
Official website: www.tungsten-alloy.com



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 Technologie de préparation et de formage des plaques en alliage de tungstène

3.1 Sélection des matières premières et traitement de la poudre de tungstène et du liant métallique

La qualité des plaques en alliage de tungstène dépend de la sélection et du traitement des matières premières, notamment de la qualité de la poudre de tungstène et de son liant, qui déterminent directement la stabilité des performances et l'efficacité de formage de la plaque finale. Cette section présente en détail les caractéristiques de la poudre de tungstène, les types et fonctions des liants, ainsi que la technologie de prétraitement des matières premières.

1. Sélection et caractéristiques de la poudre de tungstène

1. Propriétés physiques et chimiques de la poudre de tungstène

La poudre de tungstène est le matériau squelette de l'alliage de tungstène et doit avoir les propriétés de base suivantes :

- **Haute pureté** : la teneur en tungstène est généralement $\geq 99,9\%$ pour réduire l'impact des impuretés sur les propriétés de l'alliage ;
- **Granulométrie appropriée** : La granulométrie est uniforme, généralement de 1 à 10 μm . Une poudre fine favorise la densification par frittage, tandis qu'une poudre grossière favorise la fluidité et le formage.
- **Forme de particule régulière** : les poudres sphériques ou subsphériques ont une bonne fluidité et sont propices à un pressage uniforme ;
- **Faible teneur en oxygène** : évite les oxydes affectant la densité et les propriétés mécaniques.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Méthode de préparation de la poudre de tungstène

- **Méthode de réduction à l'hydrogène** : le tungstate est réduit en poudre de tungstène métallique avec une granulométrie contrôlable ;
- **Méthode de réduction carbothermique** : utilisation de poudre de carbone pour réduire les composés de tungstène, qui est peu coûteuse mais a une taille de particules plus grande ;
- **Méthode de séchage par atomisation** : pour produire de la poudre de tungstène sphérique et améliorer la fluidité ;
- **Alliage mécanique** : utilisé pour préparer de la poudre de nano-tungstène et améliorer l'effet de renforcement.

2. Types et sélection des métaux de liaison

1. Métal de liaison principal

- **Nickel (Ni)** : Phase liante couramment utilisée avec une bonne mouillabilité et une résistance à haute température, qui peut améliorer efficacement la liaison entre les poudres de tungstène ;
- **Fer (Fe)** : utilisé en conjonction avec le nickel, il peut augmenter la résistance et la dureté de l'alliage et réduire les coûts ;
- **Cuivre (Cu)** : Utilisé dans certains matériaux composites tungstène-cuivre pour améliorer la conductivité thermique et les propriétés électriques, mais présente une faible capacité de liaison ;
- **Cobalt (Co)** : Utilisé dans certains alliages de tungstène hautes performances pour améliorer la résistance à l'usure et les performances à haute température.

2. Exigences physiques pour les métaux liés

- La granulométrie de la poudre est uniforme et généralement plus fine que celle de la poudre de tungstène (0,5–5 μm) ;
- Haute pureté pour éviter les impuretés introduisant des défauts matériels ;
- Une bonne fluidité et une bonne miscibilité assurent un mélange uniforme.

3. Technologie de prétraitement des matières premières

1. Mélange de poudre

- Utiliser des méthodes de mélange mécanique telles que le broyage à boulets et l'agitation pour garantir que la poudre de tungstène et la poudre de métal de liaison sont uniformément dispersées ;
- L'ajout approprié d'additifs peut améliorer la dispersibilité et éviter l'agglomération.

2. Séchage et désoxygénation des poudres

- Après le mélange, la poudre doit généralement être séchée pour éliminer l'humidité et les résidus organiques ;
- Le traitement de désoxydation sous vide ou sous atmosphère d'hydrogène peut réduire la teneur en oxygène et l'oxydation pendant le frittage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Sélection et classification

- Contrôler la distribution granulométrique par tamis ou classification par flux d'air pour assurer l'uniformité et la densification du pressage ;
- Éliminer les particules anormales qui sont trop grosses ou trop fines.

4. Contrôle qualité et tests

- **Analyse de la composition chimique** : l'ICP, la XRF et d'autres méthodes sont utilisées pour détecter la teneur en tungstène et en éléments d'alliage ;
- **Détection de la distribution granulométrique** : analyseur de taille de particules laser ou analyse au microscope ;
- **Test de teneur en oxygène** : utilisation de la désorption thermique, de l'analyse du carbone et du soufre et d'autres instruments de surveillance ;
- **Test de fluidité** : utilisez un équipement de mesure de l'angle d'écoulement ou du débit pour tester la fluidité de la poudre.

V. Résumé

La plaque en alliage de tungstène repose sur une sélection de matières premières de haute qualité (poudre de tungstène et métal de liaison) et un procédé de prétraitement scientifique. Un contrôle rigoureux de la granulométrie, de la pureté, de la teneur en oxygène et de l'homogénéité du mélange de la poudre est essentiel pour garantir un formage et un frittage ultérieurs fluides et une qualité de produit stable. À l'avenir, le développement de la nanopoudre et de la poudre de surface fonctionnalisée permettra d'améliorer encore les performances de la plaque en alliage de tungstène.

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

Les plaques en alliage de tungstène sont issues de la métallurgie des poudres. Le mélange, le formage et le frittage de la poudre de tungstène, ainsi que le collage de la poudre métallique, permettent d'obtenir des plaques en alliage haute densité et hautes performances. Cette section présente de manière systématique les principaux procédés de préparation de la métallurgie des poudres et l'influence des paramètres de procédé sur la qualité des matériaux.

1. Mélange et préparation de la poudre

- La poudre de tungstène et la poudre de métal de liaison sont mélangées strictement selon le rapport pour assurer une composition uniforme ;
- Utiliser des procédés tels que le broyage à boulets et l'agitation mécanique pour améliorer la dispersibilité de la poudre ;
- Sécher et désoxyder la poudre mélangée pour éviter l'oxydation lors du frittage ;
- Les grosses particules et agglomérats sont éliminés par tamisage pour assurer la fluidité et le pressage uniforme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Processus de pressage

1. Pressage uniaxial

- La poudre mélangée uniformément est placée dans un moule et pressée en forme sous une pression unidirectionnelle ;
- Avantages : équipement simple, haute efficacité de production, adapté à la préparation de plaques d'alliage de tungstène aux formes simples ;
- Inconvénients : La distribution de densité est inégale pendant le processus de pressage et un gradient de densité est susceptible de se produire, ce qui affecte la densité de frittage.

2. Pressage isostatique à froid (NEP)

- La poudre est placée dans un sac en caoutchouc scellé, immergée dans un milieu liquide et soumise à une pression isostatique uniforme ;
- Avantages : obtenir un corps vert dense et uniforme, réduire les défauts internes et les pores ;
- Convient à la production de plaques en alliage de tungstène aux formes complexes ou aux exigences de densité élevées ;
- La plage de pression est généralement de 100 à 300 MPa.

3. Pressage isostatique à chaud (HIP)

- Combinant haute température et haute pression, le corps en poudre est pressurisé et fritté dans un environnement de gaz inerte (tel que l'argon) ;
- Avantages : Le frittage et la densification sont réalisés simultanément, améliorant les propriétés mécaniques et l'uniformité de l'alliage ;
- Convient à la fabrication de plaques en alliage de tungstène haut de gamme, peut améliorer considérablement la résistance à la traction et la dureté.

3. Processus de frittage

1. Principe du frittage

- En chauffant à haute température, la poudre de tungstène et le métal de liaison se diffusent et se dissolvent, renforçant ainsi la liaison entre les particules ;
- Élimine les pores entre les poudres et réalise une densification du matériau.

2. Atmosphère de frittage

- L'hydrogène, l'azote ou un gaz inerte de haute pureté sont généralement utilisés pour la protection afin d'éviter l'oxydation et la contamination par les impuretés ;
- L'atmosphère d'hydrogène a un effet réducteur et empêche la formation d'oxydes.

3. Contrôle de la température et du temps

- La température de frittage est généralement contrôlée à 1350–1600°C, ce qui est déterminé par la composition de l'alliage et l'équipement de frittage ;
- Le temps de maintien doit assurer une diffusion adéquate de la poudre, allant généralement de 30 minutes à plusieurs heures ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Une température trop élevée peut provoquer une croissance des grains et affecter les propriétés mécaniques.

4. Traitement ultérieur et densification

- Certains procédés combineront le pressage isostatique à chaud (HIP) pour la densification secondaire ;
- Le traitement thermique ajuste les propriétés organisationnelles et améliore la ténacité et la dureté ;
- Le traitement de recuit avant l'usinage améliore la plasticité du matériau et les propriétés de traitement.

5. Influence des paramètres du processus sur les performances

Processus	Paramètres clés	Influence sur les performances des plaques en alliage de tungstène
réprimer	Taille de la pression et temps de maintien	Affecte la densité du corps vert et l'uniformité de la densité détermine la qualité du frittage
frittage	Température, atmosphère, temps	Affecte la taille des grains, la force de liaison et la densité
Pressage isostatique à chaud	Température, pression, temps	Améliorer encore la densité et les propriétés mécaniques

VI. Résumé

La préparation par métallurgie des poudres est au cœur de la technologie de fabrication des plaques en alliage de tungstène. Un choix judicieux des méthodes de pressage et la maîtrise des paramètres du frittage sont essentiels pour obtenir des plaques en alliage de tungstène hautes performances. Grâce aux progrès constants des équipements et des procédés, l'application de technologies de pointe telles que le pressage isostatique à chaud a permis d'améliorer continuellement les propriétés mécaniques, la densité et l'uniformité structurale des plaques en alliage de tungstène, répondant ainsi aux exigences des applications haut de gamme.

3.3 Procédés de laminage à chaud et de laminage à froid

Après la formation d'une plaque en alliage de tungstène par frittage par métallurgie des poudres, des traitements mécaniques tels que **le laminage à chaud et à froid sont souvent nécessaires** pour ajuster la structure et les performances de la plaque, améliorer sa densité et sa résistance mécanique, ainsi que la qualité de surface et la précision dimensionnelle. Cette section présente en détail le déroulement du processus, les aspects techniques du laminage à chaud et à froid et leur impact sur les performances des plaques en alliage de tungstène.

1. Procédé de formage par laminage à chaud

1. Aperçu du processus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Le laminage à chaud est un processus dans lequel les plaques d'alliage de tungstène sont chauffées à une température appropriée (généralement comprise entre 800 et 1 200 °C) et déformées plastiquement en appliquant une pression dans un laminoir.
- Le laminage à chaud peut affiner efficacement les grains, améliorer la structure interne de l'alliage et améliorer la ténacité et la plasticité.

2. Contrôle de la température de laminage à chaud

- Une température de chauffage appropriée garantit que le matériau a une bonne plasticité et évite les fissures et les fractures ;
- Une température trop élevée peut provoquer une croissance des grains et réduire les propriétés mécaniques ;
- Une température trop basse augmentera la résistance à la déformation et peut provoquer des fissures sur la surface de la plaque.

3. Déformation par laminage à chaud et vitesse de laminage

- La déformation est contrôlée dans une plage raisonnable (la réduction de l'épaisseur par laminage unique est généralement de 10 à 30 %) pour assurer l'uniformité de la structure ;
- La vitesse de laminage affecte la répartition de la température et doit être ajustée en fonction des conditions de l'équipement et du matériau pour éviter les contraintes causées par un refroidissement inégal.

4. Recuit

- Le recuit est souvent nécessaire après le laminage à chaud pour éliminer les contraintes internes et restaurer la ténacité du matériau ;
- La température de recuit est généralement légèrement inférieure à la température de laminage à chaud et le temps est ajusté en fonction de l'épaisseur de la plaque et des propriétés du matériau.

2. Procédé de laminage à froid

1. Aperçu du processus

- Le laminage à froid consiste à effectuer plusieurs traitements plastiques sur la plaque d'alliage de tungstène laminée à chaud à température ambiante pour améliorer encore la précision de la plaque et la qualité de surface ;
- Le laminage à froid peut augmenter considérablement la résistance et la dureté du matériau, le rendant ainsi adapté à la fabrication de plaques d'alliage de tungstène hautes performances.

2. Déformation par laminage à froid et schéma de laminage

- La déformation unique est faible, généralement de 5 à 15 %, pour éviter que la plaque ne se fissure ;
- Plusieurs passes de laminage et recuit intermittent pour restaurer la plasticité et éviter un durcissement excessif.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Contrôle de la qualité de surface et de la taille

- Le laminage à froid peut réduire efficacement la rugosité de la surface et améliorer la douceur ;
- Contrôlez précisément l'épaisseur de la plaque pour obtenir une précision dimensionnelle et une uniformité élevées.

3. Application complète du laminage à chaud et du laminage à froid

- Généralement, un processus combiné de laminage à chaud suivi de laminage à froid est adopté pour garantir la plasticité et la densité du matériau tout en obtenant une résistance élevée et une excellente qualité de surface.
- Les plaques en alliage de tungstène peuvent être optimisées en concevant rationnellement le parcours de laminage et le processus de traitement thermique.

4. L'influence du procédé sur les performances des plaques en alliage de tungstène

Processus	Paramètres clés	Impact
laminage à chaud	Température, déformation, vitesse	Affinage du grain, libération des contraintes internes et amélioration de la ténacité
laminage à froid	Déformation, nombre de passes	Résistance et dureté améliorées, surface lisse et haute précision dimensionnelle

3.4 Technologie de traitement de surface (polissage, décapage, galvanoplastie, PVD)

Une fois la plaque en alliage de tungstène préparée, elle doit généralement subir une série de traitements de surface afin d'améliorer sa qualité, sa résistance à la corrosion et ses propriétés fonctionnelles. Le traitement de surface améliore non seulement l'aspect et la précision dimensionnelle du matériau, mais aussi sa résistance à l'usure, sa résistance à l'oxydation et sa conductivité électrique. Cette section se concentre sur les quatre technologies de traitement de surface couramment utilisées pour les plaques en alliage de tungstène : le polissage, le décapage, la galvanoplastie et le dépôt physique en phase vapeur (PVD).

1. Polissage (polissage mécanique)

1. Objectif du polissage

- Éliminez la couche d'oxyde, les bavures et les marques de traitement sur la surface de la plaque en alliage de tungstène ;
- Améliorer la planéité et la douceur de la surface et réduire la rugosité de la surface ;
- Fournit un bon substrat pour les processus ultérieurs tels que la galvanoplastie et le revêtement.

2. Processus de polissage

- Utilisez du papier de verre, de la pâte abrasive et une meule de polissage pour meuler progressivement et finement ;
- Le broyage grossier, le broyage moyen et le broyage fin sont traités par étapes et la taille des particules est progressivement affinée ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- L'équipement de polissage automatisé est utilisé dans les processus modernes pour améliorer la cohérence et l'efficacité.

3. Remarques

- Contrôler la température de broyage pour éviter la surchauffe de la surface et la déformation des tissus ;
- Choisissez des abrasifs appropriés pour éviter les rayures ou les piqûres de surface.

2. Décapage (traitement chimique)

1. Décapage

- Élimine les oxydes de surface, la rouille et les impuretés ;
- Améliorer l'activité de surface et favoriser l'adhérence du revêtement ou de la couche de galvanoplastie ;
- Ajustez la rugosité de la surface et améliorez la mouillabilité.

2. Agent de décapage et paramètres du procédé

- Solutions de décapage couramment utilisées : acide chlorhydrique dilué, acide sulfurique ou acide mixte ;
- La température, la concentration et le temps de décapage doivent être strictement contrôlés pour éviter une corrosion excessive ;
- Après le décapage, la neutralisation et le nettoyage doivent être effectués à temps pour éviter l'acide résiduel.

3. Sécurité et protection de l'environnement

- Les installations de traitement des gaz d'échappement et des liquides résiduels doivent être équipées pour prévenir la pollution par les gaz acides et les eaux usées ;
- Les opérateurs doivent porter un équipement de protection pour assurer la sécurité.

3. Technologie de galvanoplastie

1. Objectif de la galvanoplastie

- Placage d'une couche métallique (comme du nickel, du chrome, du cuivre, etc.) sur la surface de la plaque en alliage de tungstène pour améliorer la résistance à la corrosion et à l'usure ;
- Améliorer la conductivité électrique et les performances de soudage ;
- Améliore l'esthétique et la dureté de la surface.

2. Couches métalliques électrolytiques couramment utilisées

- **Nickelage** : couramment utilisé pour améliorer la résistance à la corrosion et la dureté, et améliorer les performances de lubrification ;
- **Chromage** : offre une dureté et une résistance à l'usure élevées, une surface brillante ;
- **Galvanoplastie du cuivre** : Améliore la conductivité et convient à l'industrie électronique.

3. Procédé de galvanoplastie

- Prétraitement de surface (dégraissage, décapage) ;
- Traitement d'activation pour favoriser l'adsorption des ions métalliques ;
- Immergé dans la cuve de galvanoplastie, un courant est appliqué pour déposer le revêtement ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Post-traitement (passivation, nettoyage, séchage).

4. Contrôle de la qualité de la galvanoplastie

- Contrôler l'épaisseur et l'uniformité du revêtement ;
- Évitez les cloques, les piqûres et la perte du revêtement ;
- Vérifiez régulièrement l'adhérence et la dureté du revêtement.

4. Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

1. Introduction à la technologie PVD

- technologie de film mince qui évapore ou pulvérise le matériau cible dans un environnement sous vide et le dépose sur la surface de la plaque d'alliage de tungstène ;
- Les matériaux de revêtement courants comprennent les carbures (tels que TiC, WC), les nitrures (TiN, CrN) et les couches métalliques.

2. Avantages du PVD

- Le revêtement a une forte force de liaison, est dense et uniforme et présente une résistance à l'usure et à la corrosion considérablement améliorée ;
- Respectueux de l'environnement et sans pollution, conformément aux exigences modernes de fabrication verte ;
- L'épaisseur et la composition du revêtement peuvent être contrôlées pour obtenir une conception de surface fonctionnelle.

3. Processus de demande de PVD

- Nettoyage et prétraitement des matériaux ;
- Placée dans une chambre à vide, la cible est chauffée ou pulvérisée ;
- Dépôt de revêtement, post-refroidissement et post-traitement.

4. Applications typiques

- plaques en alliage de tungstène dans les domaines aérospatial et militaire ;
- Dissipation thermique des équipements électroniques et amélioration de la surface des pièces de contact ;
- Revêtements résistants à l'usure et biocompatibles pour dispositifs médicaux.

V. Résumé

Le traitement de surface est une étape clé pour améliorer les performances globales des plaques en alliage de tungstène. Le polissage assure une excellente qualité de surface, le décapage élimine efficacement les impuretés et les couches d'oxyde, la galvanoplastie offre une couche protectrice métallique fonctionnelle et résistante à la corrosion, et le PVD, une technologie de revêtement avancée, confère une excellente résistance à l'usure et à la corrosion. En combinant et en optimisant rationnellement ces procédés de traitement de surface, les performances et la durée de vie des plaques en alliage de tungstène peuvent être considérablement améliorées.

3.5 Application du revêtement laser et de la fabrication additive aux matériaux en plaques

Avec le développement continu des technologies de fabrication avancées, le revêtement laser et la fabrication additive (impression 3D) sont progressivement appliqués à la préparation et à la réparation des plaques d'alliage de tungstène. Ces technologies permettent la fusion et le dépôt locaux de matériaux grâce à des faisceaux laser de haute précision et à haute densité énergétique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elles offrent d'excellentes capacités de formage et une excellente valorisation des matériaux, élargissant considérablement le champ d'application et les possibilités d'amélioration des performances des plaques d'alliage de tungstène.

1. Introduction à la technologie de revêtement laser

1. Principe du procédé :

le placage laser utilise un faisceau laser haute puissance pour fondre partiellement la poudre ou le fil métallique et le déposer à la surface du substrat afin de former une couche d'alliage dense. Cette couche présente une bonne adhérence et un bon gradient de performance, et peut améliorer la résistance à l'usure, à la corrosion et aux températures élevées du substrat.

2. Avantages technologiques

- Contrôlez précisément l'épaisseur et la composition de la couche de revêtement pour obtenir une conception de matériau fonctionnellement graduée ;
- Petite zone affectée thermiquement, faible déformation du substrat et faible contrainte résiduelle ;
- Il peut réparer les défauts de surface des plaques en alliage de tungstène et prolonger leur durée de vie.

3. Scénario d'application

- la plaque en alliage de tungstène est renforcée pour améliorer la résistance à l'usure et à la corrosion ;
- Réparation locale des défauts de fabrication et des dommages d'usure ou de corrosion causés lors de l'utilisation ;
- Revêtement de revêtement de haute dureté sur la surface de la plaque en alliage de tungstène.

2. La technologie de fabrication additive et ses avantages

1. Présentation de la fabrication additive :

La fabrication additive (FA) permet de former des plaques d'alliage de tungstène à une forme quasi-définitive en empilant de la poudre métallique couche par couche, en utilisant des sources d'énergie telles que des lasers et des faisceaux d'électrons. Les technologies couramment utilisées sont la fusion sélective par laser (SLM) et la fusion par faisceau d'électrons (EBM).

2. Avantages technologiques

- Haut degré de liberté de conception, capable de fabriquer des structures complexes et des pièces fonctionnellement graduées ;
- Utilisation élevée des matériaux, réduisant les déchets et les coûts ;
- Le prototypage rapide raccourcit le cycle de développement du produit.

3. Défis du processus

- La poudre d'alliage de tungstène a un point de fusion élevé et une conductivité thermique élevée, ce qui rend le contrôle de la fusion difficile ;
- Des fissures et des trous sont susceptibles de se produire et les paramètres du processus ainsi que la qualité de la poudre doivent être optimisés ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La densité et les propriétés mécaniques des pièces formées doivent encore être améliorées.

3. Flux de processus de revêtement laser et de fabrication additive

Processus	Contenu principal
Préparation de poudre	Sélectionnez une poudre d'alliage de tungstène avec une granulométrie et une morphologie appropriées pour garantir la fluidité et la pureté
Préparation du matériel	Puissance laser, vitesse de balayage, système de protection contre les gaz et autres paramètres de débogage
Prétraitement	La surface du substrat est propre pour assurer une liaison ferme entre la couche de revêtement et le substrat.
Revêtement / Impression	Le faisceau laser balaie la poudre fondue pour réaliser un empilement couche par couche
Post-traitement	Traitement thermique, usinage et polissage de surface pour améliorer la structure et les performances

4. Analyse de cas d'application

1. Dans le domaine aérospace,

la technologie de revêtement laser est utilisée pour renforcer la surface des plaques d'alliage de tungstène afin d'améliorer leur résistance aux hautes températures et à l'usure afin de répondre aux exigences de haute performance des composants du moteur.

2. L'industrie nucléaire

utilise la fabrication additive pour préparer des plaques de protection complexes en alliage de tungstène afin d'obtenir un blindage léger et efficace, améliorant ainsi la sécurité et la durée de vie des réacteurs nucléaires.

3. Le moule est fabriqué par

revêtement laser d'une couche d'alliage à haute dureté sur la surface de la plaque d'alliage de tungstène pour améliorer la résistance à l'usure et à la corrosion du moule et prolonger la durée de vie du moule.

V. Tendances et défis du développement

- **Optimisation technologique** : Améliorer en continu les paramètres laser et les processus de préparation de la poudre pour résoudre les défauts tels que les fissures et les trous ;
- **Innovation matérielle** : Développer une poudre d'alliage de tungstène adaptée au revêtement laser et à la fabrication additive pour améliorer la qualité de formage ;
- **Fabrication de composites multi-matériaux** : réalisation d'une fabrication efficace de matériaux à gradient fonctionnel et de structures composites ;
- **Contrôle intelligent** : Introduction de l'intelligence artificielle et de la surveillance en temps réel pour améliorer la stabilité du processus et la cohérence du produit fini.

VI. Résumé

Le revêtement laser et la fabrication additive offrent une nouvelle solution pour la préparation et l'amélioration des performances des plaques en alliage de tungstène. Grâce à un dépôt de matériau

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

précis et à une conception structurelle précise, ces technologies permettent non seulement de réparer et de renforcer efficacement la surface des plaques en alliage de tungstène, mais aussi de favoriser le développement de la fabrication de ces plaques vers des performances élevées, des formes complexes et une personnalisation optimale. À l'avenir, avec la maturité des technologies et l'innovation des matériaux, la fabrication laser jouera un rôle de plus en plus important dans le domaine des alliages de tungstène.

3.6 Renforcement par nanoparticules et technologie de fabrication de plaques à gradient fonctionnel

Avec les progrès constants de la science des matériaux, les nanotechnologies et les matériaux à gradient fonctionnel (FGM) sont devenus des axes clés pour améliorer les performances des plaques en alliage de tungstène. L'introduction de phases de renforcement nanoparticulaires et l'obtention d'une distribution graduée de la composition et de la structure permettent d'améliorer considérablement les propriétés mécaniques, la résistance à l'usure et la stabilité thermique des plaques en alliage de tungstène, répondant ainsi à des exigences d'applications plus complexes et plus exigeantes.

1. Technologie d'amélioration des nanoparticules

1. Types et fonctions des nanoparticules

- **Nanoparticules couramment utilisées** : carbures (tels que WC, TiC), oxydes (tels que Al_2O_3 , ZrO_2), nanotubes de carbone (CNT) et graphène, etc.
- **Mécanisme d'amélioration** : les nanoparticules améliorent la résistance et la dureté de la matrice en affinant les grains, en empêchant le mouvement de dislocation et en formant une seconde phase uniformément dispersée ;
- **Renforcement de l'interface** : les nanoparticules forment une forte liaison d'interface avec la matrice de tungstène, améliorant la ténacité globale du matériau.

2. Technologie de dispersion de nanoparticules

- **Alliage mécanique** : le broyage à billes à haute énergie permet de disperser uniformément les nanoparticules dans la poudre de tungstène ;
- **Modification de surface** : amélioration de la compatibilité des nanoparticules avec la matrice et prévention de l'agglomération par des méthodes chimiques ou physiques ;
- **Ajout de dispersant** : Introduction de tensioactifs pour aider à une distribution uniforme.

3. Difficultés du processus et solutions

- Les nanoparticules sont sujettes à l'agglomération et le processus de dispersion doit être optimisé ;
- La résistance de liaison de l'interface et la correspondance de dilatation thermique doivent être raisonnablement conçues pour éviter la concentration de contraintes thermiques ;
- Contrôler la teneur en nanoparticules pour éviter que des quantités excessives ne provoquent une fragilité.

2. Technologie de préparation de plaques à gradient fonctionnel

1. Introduction aux matériaux à gradient fonctionnel

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les plaques d'alliage de tungstène à gradient fonctionnel optimisent la distribution spatiale des performances en obtenant des gradients de compositions ou de structures différentes dans le sens de l'épaisseur ou sur la surface.
- L'objectif principal est de répondre simultanément à plusieurs exigences telles que la résistance, la ténacité, la résistance à l'usure et la résistance à la corrosion.

2. Méthode de préparation

- **Frittage couche par couche** : ajuster le rapport de poudre couche par couche et fritter pour former ;
- **Traitement thermique graduel** : Utiliser des conditions de traitement thermique dans différentes zones pour former un gradient de performance ;
- **Revêtement laser ou fabrication additive** : les gradients sont obtenus par dépôt localisé de matériaux de compositions différentes ;
- **Composite par laminage et extrusion** : des plaques de compositions ou de structures différentes sont composites puis usinées pour former une structure à gradient.

3. Conception de gradient typique

- Couche résistante à l'usure de haute dureté sur la surface et couche de roulement de haute ténacité à l'intérieur ;
- Le coefficient de dilatation thermique évolue progressivement pour réduire la contrainte thermique ;
- Les zones fonctionnelles ont respectivement des propriétés conductrices, résistantes à la corrosion ou résistantes aux radiations.

3. Amélioration des performances de la nano-amélioration et de la préparation des gradients

Indicateurs de performance	Effet d'amélioration des nanoparticules	Avantages d'une conception fonctionnellement graduée
résistance à la traction	Significativement amélioré	Optimisation régionale pour améliorer la résistance et la ténacité globales
dureté	Considérablement amélioré	Renforcement de surface, excellente résistance à l'usure
dureté	Amélioration modérée	La structure du gradient soulage la concentration des contraintes
Stabilité thermique	Performances améliorées à haute température	Adaptation de la dilatation thermique pour réduire les fissures thermiques
Résistance à la corrosion	Nanoparticules et renforcement des interfaces	La couche fonctionnelle de surface améliore la résistance à la corrosion

IV. Perspectives d'application et tendances de développement

- Les plaques en alliage de tungstène renforcées par des nanoparticules conviennent à l'aérospatiale, à l'industrie nucléaire et aux domaines de l'électronique haut de gamme, et sont particulièrement critiques pour les composants ayant des exigences élevées en matière de résistance et de résistance à l'usure ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les plaques fonctionnellement graduées offrent de nouvelles idées pour l'application des alliages de tungstène dans des environnements extrêmes, tels que la protection thermique, le blindage contre les radiations et l'optimisation des propriétés mécaniques ;
- Associé à une technologie de fabrication additive avancée, un contrôle précis et une production efficace de structures à gradient complexes peuvent être obtenus.

V. Résumé

L'amélioration des nanoparticules et la technologie de préparation de gradients fonctionnels contribuent fortement à l'amélioration des performances des plaques en alliage de tungstène. Grâce à la combinaison de la conception des matériaux et de technologies avancées, les plaques en alliage de tungstène permettent d'obtenir des améliorations synergétiques en termes de résistance, de ténacité, de résistance à l'usure et à la corrosion, entre autres propriétés, et favorisent leur intégration dans des domaines d'application complexes et haut de gamme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

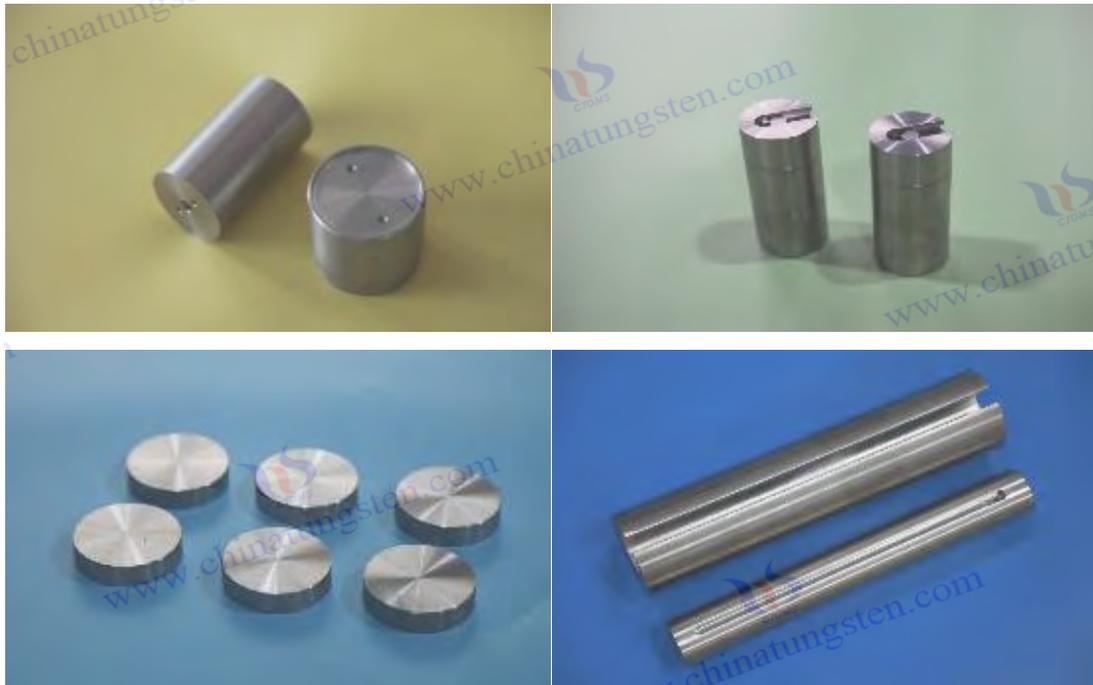
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Chapitre 4 Inspection de la qualité et évaluation des performances des plaques en alliage de tungstène

4.1 Contrôle des dimensions géométriques et de la planéité de la surface

Les dimensions géométriques et la planéité de surface des plaques en alliage de tungstène sont des indicateurs importants pour garantir la précision et les performances de leur assemblage. Des dimensions précises et un excellent état de surface influencent directement la résistance mécanique, les performances de contact et la qualité de l'usinage ultérieur des plaques. Cette section se concentre sur les méthodes, instruments et équipements d'essai couramment utilisés, ainsi que sur les processus d'essai permettant de garantir que les plaques en alliage de tungstène répondent aux exigences de conception et aux normes d'application.

1. Détection des dimensions géométriques

1. Principaux paramètres de test

- Longueur, largeur, épaisseur : Utilisez des outils de mesure de haute précision pour mesurer les dimensions de base de la plaque ;
- Rectitude : mesure le degré de déformation par flexion de la plaque dans le sens de la longueur ;
- Planéité : Évaluer la planéité globale de la surface de la planche.

2. Équipements de test couramment utilisés

- **Pieds à coulisse et micromètres** : adaptés à la mesure approximative de la longueur et de l'épaisseur, avec une précision généralement de 0,01 mm ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT)** : mesure multiparamétrique de haute précision, adaptée aux formes complexes et aux exigences de haute précision ;
- **Scanner laser** : mesure sans contact, acquisition rapide de données de nuages de points de surface et analyse de planéité ;
- **Plaque et jauge d'épaisseur** : Outils de contrôle de rectitude et de planéité traditionnels, simples et économiques.

3. Processus de test

- Placez la plaque sur la table d'essai pour vous assurer qu'elle est fermement fixée ;
- Sélectionnez les points et les directions de mesure en fonction des exigences de conception ;
- Mesure multipoint pour obtenir des données de dimension et une courbe de planéité ;
- Le respect de la plage de tolérance est déterminé par une analyse statistique.

2. Détection de la planéité de la surface

1. Définition de la planéité

- La planéité de la surface fait référence au degré de déviation de la surface de la plaque en alliage de tungstène par rapport au plan idéal, ce qui affecte l'étanchéité, les performances de contact et l'apparence.

2. Méthode de détection

- **Méthode de la règle et de la jauge d'épaisseur** : Placez une règle sur la surface et utilisez la jauge d'épaisseur pour mesurer l'écart afin de déterminer rapidement la planéité ;
- **Interféromètre optique** : utilise des franges d'interférence pour mesurer avec précision les fluctuations de surface au niveau du micron ;
- **Profileur laser** : scanne le profil de surface et construit un modèle de surface 3D ;
- **Profilomètre à stylet** : Un stylet mécanique scanne la surface, obtenant des données de variation de hauteur.

3. Critères d'évaluation

- Définir la tolérance de planéité selon les normes nationales et industrielles (telles que GB, ISO) ;
- Les nuances de surface sont différenciées en fonction de l'application, les applications de haute précision nécessitant des exigences plus strictes.

3. Facteurs d'influence et contrôle

- Uniformité du pressage et déformation par frittage pendant le processus de préparation ;
- La stabilité des usinages ultérieurs et la précision de l'équipement ;
- La température et l'humidité ambiantes affectent la précision de la détection, le test doit donc être effectué dans des conditions de température et d'humidité constantes.

IV. Résumé

Les tests de dimensions géométriques et de planéité de surface sont des aspects importants du contrôle qualité des plaques en alliage de tungstène. L'association d'équipements de mesure de pointe et de méthodes d'essai scientifiques permet de garantir que la plaque répond aux exigences

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de conception et d'application, offrant ainsi une base solide pour l'évaluation des performances et l'application ultérieures.

4.2 Caractérisation de la microstructure et de la densité (MEB, DRX)

Les plaques en alliage de tungstène sont des indicateurs clés qui influencent leurs propriétés mécaniques, leur résistance à l'usure et leur stabilité. L'analyse de leur microstructure permet de comprendre en profondeur la morphologie des grains, la composition des phases, la distribution des pores et l'état de liaison à l'interface du matériau, optimisant ainsi les paramètres de procédé et améliorant la qualité du matériau. Cette section se concentre sur les techniques d'analyse de la microstructure et les méthodes de caractérisation de la densité couramment utilisées.

1. Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)

1. Principe technique

- Le SEM utilise un faisceau d'électrons pour balayer la surface de l'échantillon et obtient des images de morphologie de surface et de microstructure à haute résolution en détectant les électrons secondaires et les électrons rétrodiffusés ;
- Différentes phases, distribution de particules, pores, fissures et autres micro-défauts peuvent être observés et analysés.

2. Contenu de la demande

- Analyse de la granulométrie et de la morphologie : Déterminer la granulométrie et l'uniformité à l'aide d'images MEB ;
- Répartition des particules et liaison à l'interface : observer l'état de liaison entre la matrice de tungstène et la phase de renforcement (comme Ni, Fe, Cu, etc.) ;
- Détection de porosité et de défauts : identifier les pores, les fissures et les inclusions dans les matériaux ;
- Morphologie de la corrosion superficielle : analyse du mécanisme de corrosion et de la distribution des produits de corrosion.

3. Préparation des échantillons

- Les échantillons de plaques en alliage de tungstène doivent être prétraités par polissage, gravure par corrosion, etc. pour exposer la microstructure ;
- La taille et la forme de l'échantillon doivent répondre aux exigences de l'équipement SEM.

2. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

1. Principe technique

- La DRX identifie la structure cristalline et la composition de phase en détectant le diagramme de diffraction de l'échantillon de matériau par rapport aux rayons X incidents ;
- La position, l'intensité et la largeur du pic de diffraction reflètent le type de phase cristalline, la cristallinité et la granulométrie du matériau.

2. Contenu de la demande

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Identification de la composition de phase : confirmer la phase métallique ou la phase composée formée par la phase tungstène et d'autres éléments d'alliage dans l'alliage de tungstène ;
- Analyse de la structure cristalline : déterminer les paramètres du réseau et les types de cristaux de chaque phase ;
- Mesure de la taille des grains et des contraintes : calcul de la taille des grains et de l'état de contrainte interne grâce à l'analyse de la largeur des pics ;
- Contrôle qualité : suivi de l'impact du traitement des matériaux sur la structure cristalline.

3. Préparation des échantillons

- La surface de l'échantillon doit être plane pour éviter que la rugosité de la surface n'affecte les résultats de diffraction ;
- Des échantillons en vrac ou en poudre peuvent être utilisés pour l'analyse.

3. Méthode d'essai de densité

1. Densité théorique et densité réelle

- La densité théorique est calculée sur la base de la composition chimique et de la structure cristalline du tungstène et des éléments d'alliage ;
- La densité réelle est obtenue par mesure expérimentale et constitue un indicateur important pour évaluer la densité des matériaux.

2. Méthodes de mesure courantes

- **Méthode d'Archimède** : Calculer la masse volumique en mesurant la différence de masse de l'échantillon dans le liquide. Elle convient aux échantillons de formes régulières.
- **Méthode géométrique** : mesurer la taille et la masse de l'échantillon pour calculer la densité, ce qui convient aux échantillons de formes régulières et sans pores ;
- **Méthode de perméabilité aux gaz** : évalue la porosité et reflète indirectement la densité.

3. Relation entre densité et performance

- Plus la densité est élevée, meilleures sont les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion du matériau ;
- Une porosité élevée réduira la résistance du matériau et sa durée de vie.

4. Analyse et application complètes

- En combinant l'analyse SEM et XRD, les caractéristiques microstructurales et la composition de phase des plaques d'alliage de tungstène peuvent être systématiquement comprises ;
- Les tests de densité permettent d'évaluer le degré de densification du matériau et l'effet d'optimisation du processus ;
- Fournir une base scientifique pour l'ajustement des processus et l'amélioration des matériaux, et améliorer les performances des plaques en alliage de tungstène.

V. Résumé

La caractérisation de la microstructure et de la densité est au cœur de la recherche sur les performances et le contrôle qualité des plaques en alliage de tungstène. Grâce aux technologies MEB et DRX, nous pouvons comprendre en profondeur la microstructure et l'état cristallin du

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

matériau ; les tests de densité fournissent un indice quantitatif du degré de densification du matériau. Des méthodes de caractérisation systématiques garantissent la fabrication et l'application hautes performances des plaques en alliage de tungstène.

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

En tant que matériau hautes performances important, des tests et une évaluation précis des propriétés mécaniques des plaques en alliage de tungstène sont essentiels pour garantir la qualité du produit et répondre aux exigences des applications. Une série de normes d'essai des propriétés mécaniques ont été élaborées, tant au niveau international que national, afin de normaliser les méthodes d'essai et de garantir l'exactitude et la comparabilité des données. Cette section se concentre sur les principales normes d'essai des propriétés mécaniques couramment utilisées pour les plaques en alliage de tungstène, notamment les spécifications pertinentes de l'American Society for Testing and Materials (ASTM), de la Chinese National Standard (GB) et de l'Organisation internationale de normalisation (ISO).

1. Principales propriétés mécaniques

- **à la traction** : contrainte maximale qu'un matériau peut supporter lors d'un essai de traction ;
- **Limite d'élasticité** : contrainte à laquelle un matériau subit une déformation permanente ;
- **Allongement** : Pourcentage d'allongement avant la rupture du matériau, reflétant la plasticité ;
- **Dureté** : Capacité d'un matériau à résister à une déformation plastique locale ;
- **Résistance aux chocs** : Capacité d'un matériau à résister aux dommages causés par les chocs.

2. Système de normes ASTM

1. ASTM E8 / E8M — Méthode d'essai de traction

- Convient pour mesurer la résistance à la traction, la limite d'élasticité et l'allongement des matériaux métalliques ;
- Il spécifie la taille de l'échantillon, la vitesse d'essai, la collecte des données et les méthodes de calcul ;
- Les plaques en alliage de tungstène sont généralement testées à l'aide d'éprouvettes de traction plates.

2. ASTM E23 - Méthode d'essai d'impact (impact Charpy)

- Utilisé pour mesurer la résistance aux chocs des matériaux et évaluer les propriétés de rupture ;
- Utiliser des échantillons entaillés standard, spécifier la température d'essai et la détermination de l'absorption d'énergie ;
- Convient pour évaluer les performances de ténacité des plaques d'alliage de tungstène sous des charges dynamiques.

3. ASTM E92 — Essai de dureté Vickers

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Convient pour la mesure de la dureté du carbure cémenté et des matériaux métalliques à haute dureté ;
- Spécifiez la plage de charge et la méthode de mesure de l'indentation pour garantir des données précises.

3. Norme nationale chinoise (GB)

1. GB/T 228 — Méthode d'essai de traction à température ambiante pour matériaux métalliques

- Similaire à la norme ASTM E8, elle convient aux tests de propriétés de traction de divers matériaux métalliques ;
- Spécifications détaillées pour la préparation des échantillons, l'équipement d'essai et le traitement des données.

2. GB/T 229 — Méthode d'essai de choc pour matériaux métalliques (essai Charpy)

- Spécifie les méthodes et conditions standard pour les essais d'impact ;
- Convient pour évaluer la résistance à la fracture des plaques en alliage de tungstène.

3. GB/T 4340 — Essai de dureté des matériaux métalliques

- Contient des méthodes permettant de déterminer la dureté Brinell, Vickers et Rockwell ;
- La méthode d'essai de dureté appropriée peut être sélectionnée en fonction de l'application spécifique de la plaque en alliage de tungstène.

4. Normes internationales ISO

1. ISO 6892 — Essais de traction des matériaux métalliques

- Spécifications courantes des tests de propriétés de traction dans les normes internationales ;
- L'accent est mis sur la standardisation du processus de test et la fiabilité des données de test.

2. ISO 148 — Essai de choc Charpy

- Normaliser la préparation des éprouvettes d'impact et les conditions d'essai ;
- Promouvoir la cohérence et la comparabilité des données entre les pays.

3. ISO 6507 — Essai de dureté Vickers

- Spécifier en détail les exigences techniques pour les essais de dureté ;
- Il est largement utilisé dans l'évaluation de la dureté des matériaux durs tels que l'alliage de tungstène.

5. Équipement d'essai et contrôle environnemental

- L'équipement d'essai doit répondre aux exigences techniques des normes pertinentes pour garantir la précision du chargement et la précision de la collecte des données ;
- Les conditions environnementales (température, humidité) ont un impact significatif sur les résultats des tests et doivent être maintenues stables ;
- Les plaques en alliage de tungstène nécessitent l'utilisation de montages et d'appareils de mesure spéciaux.

6. Notes sur l'application standard

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La préparation de l'échantillon doit être effectuée en stricte conformité avec la taille et la forme standard afin d'éviter toute concentration de contraintes et tout défaut affectant les résultats ;
- Les plaques en alliage de tungstène destinées à différents usages peuvent sélectionner des normes et des paramètres de test appropriés en fonction des exigences de performance réelles ;
- Combinées à une variété de tests de propriétés mécaniques, les propriétés des matériaux sont évaluées de manière exhaustive pour guider l'optimisation des processus et la conception des applications.

VII. Résumé

Un système de normes d'essais des propriétés mécaniques parfait fournit une base scientifique pour la recherche et le développement, la production et le contrôle qualité des plaques en alliage de tungstène. Les normes ASTM, GB et ISO ont leurs propres caractéristiques et se complètent mutuellement, favorisant ainsi l'internationalisation et la normalisation des méthodes d'essai des plaques en alliage de tungstène. Les entreprises et les instituts de recherche doivent sélectionner judicieusement les normes d'essai en fonction des besoins réels afin de garantir l'exactitude et la fiabilité des résultats.

4.4 Analyse de la composition des éléments et de la teneur en impuretés (ICP, XRF, ONH)

La qualité des plaques en alliage de tungstène dépend en grande partie du contrôle précis de leur composition chimique et de la limitation stricte de leur teneur en impuretés. La détection précise de la composition élémentaire contribue non seulement à garantir les performances de conception du matériau, mais joue également un rôle essentiel dans le suivi et le contrôle qualité du processus de production. Cette section se concentre sur les techniques d'analyse de la composition élémentaire et de la teneur en impuretés couramment utilisées, notamment la spectroscopie d'émission par plasma à couplage inductif (ICP), la spectroscopie de fluorescence X (XRF) et l'analyseur d'oxygène, d'azote et d'hydrogène (ONH), et examine leur application aux tests des plaques en alliage de tungstène.

1. Spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP)

1. Principe technique

- L'ICP utilise un plasma à haute température pour exciter les atomes et les ions dans l'échantillon afin de produire des spectres caractéristiques ;
- Selon l'intensité et la longueur d'onde du spectre d'émission, le contenu de plusieurs éléments dans l'échantillon peut être analysé quantitativement.

2. Champ d'application

- Déterminer avec précision la teneur en éléments principaux (tungstène, nickel, fer, cuivre, etc.) et en traces d'éléments d'alliage dans les plaques d'alliage de tungstène ;
- Détecter les traces d'impuretés telles que le plomb, le soufre, le phosphore, etc. pour garantir la pureté des matériaux ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Haute sensibilité et capacité d'analyse simultanée multi-éléments, adaptée aux systèmes d'alliages complexes.

3. Préparation des échantillons

- Habituellement, les échantillons solides doivent être dissous dans une solution, généralement en utilisant une dissolution acide (comme l'eau régale) ;
- Le prétraitement des échantillons doit être strictement réglementé pour éviter la contamination et la perte d'éléments.

2. Spectroscopie de fluorescence X (XRF)

1. Principe technique

- La XRF est basée sur l'émission de rayons X fluorescents caractéristiques par des échantillons après avoir été excités par des rayons X, et l'identification et la quantification des éléments sont réalisées en analysant leur énergie et leur intensité ;
- Pas besoin de dissoudre l'échantillon, convient à la détection directe d'échantillons solides, en poudre et en flocons.

2. Champ d'application

- Détermination rapide de la teneur en éléments principaux dans les plaques d'alliage de tungstène ;
- Utilisé pour le criblage rapide de la composition élémentaire et le contrôle de la qualité sur les sites de production ;
- La profondeur de détection est limitée et caractérise principalement les composants de surface ou proches de la surface de l'échantillon.

3. Avantages et inconvénients

- La vitesse de détection est rapide et le fonctionnement est simple, mais la sensibilité est inférieure à celle de l'ICP ;
- La capacité de détection des éléments légers (tels que l'oxygène, l'azote et l'hydrogène) est limitée.

3. Analyseur d'oxygène, d'azote et d'hydrogène (ONH)

1. Principe technique

- L'analyseur ONH mesure la teneur en oxygène, en azote et en hydrogène gazeux libérés par la combustion ou la pyrolyse de l'échantillon ;
- L'analyse quantitative est réalisée à l'aide d'un détecteur de conductivité thermique ou d'une technique d'absorption infrarouge.

2. Champ d'application

- Mesurer avec précision la teneur en impuretés non métalliques telles que l'oxygène, l'azote et l'hydrogène dans les plaques d'alliage de tungstène ;
- Les impuretés non métalliques ont un impact significatif sur les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion des plaques d'alliage de tungstène ;
- Indicateur important de contrôle qualité.

3. Exigences relatives à l'échantillon

- La forme et le poids de l'échantillon doivent être strictement contrôlés pour garantir la répétabilité du test ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La surface de l'échantillon doit être propre, exempte de graisse et de contamination.

4. Application complète et contrôle de la qualité

- Les trois technologies se complètent pour former un système de détection complet de la composition chimique des plaques d'alliage de tungstène ;
- L'ICP est adapté à la quantification précise des systèmes d'éléments complexes, la XRF est adaptée à la détection rapide sur site et l'ONH est destiné aux impuretés non métalliques ;
- Des tests réguliers permettent de surveiller le processus de production, d'optimiser les paramètres du processus et de garantir une qualité stable du produit.

V. Résumé

L'analyse précise de la composition des éléments et de la teneur en impuretés est essentielle pour garantir la haute performance des plaques en alliage de tungstène. Les technologies ICP, XRF et ONH présentent chacune leurs propres avantages. Leur application combinée permet de répondre aux différents besoins de test des plaques en alliage de tungstène et de fournir une base scientifique pour le contrôle de la production et l'innovation en R&D.

4.5 Détection des défauts de surface (ultrasons, CT, courants de Foucault, particules magnétiques)

En tant que matériau haute performance essentiel, la qualité de surface des plaques en alliage de tungstène influence directement leur durée de vie et la stabilité de leurs performances. Une détection rapide et précise des défauts de surface et proches de la surface est essentielle pour garantir la qualité et la sécurité globales des plaques en alliage de tungstène. Les technologies de détection de défauts de surface et proches de la surface couramment utilisées comprennent les contrôles par ultrasons (UT), la tomographie (CT), les courants de Foucault (ET) et les tests de particules magnétiques (MT). Cette section présente en détail les principes, le champ d'application et les avantages de ces technologies.

1. Contrôle par ultrasons (UT)

1. Principe technique

- Lorsque des ondes ultrasonores à haute fréquence se propagent à l'intérieur du matériau et rencontrent des défauts, elles génèrent des ondes réfléchies et les signaux réfléchis sont détectés pour déterminer l'emplacement et la taille des défauts.
- La sonde transmet et reçoit des ondes ultrasonores pour réaliser des tests non destructifs des défauts internes et de surface.

2. Champ d'application

- Convient pour détecter des défauts tels que des fissures internes, des inclusions, des pores et un délaminage intercouche des plaques d'alliage de tungstène ;
- Il présente une bonne sensibilité de détection des défauts internes des matériaux en plaques épaisses ;
- Peut être utilisé pour la détection en ligne et hors ligne.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Avantages

- Non destructif, non polluant, grande profondeur de détection, haute résolution ;
- La taille et la forme du défaut peuvent être analysées quantitativement.

2. Tomodensitométrie (TDM)

1. Principe technique

- plaque d'alliage de tungstène sous plusieurs angles à travers des rayons X et reconstruire une image tridimensionnelle à l'aide d'un ordinateur ;
- Affichez avec précision la distribution spatiale tridimensionnelle et la morphologie des défauts internes.

2. Champ d'application

- Inspection haute résolution de structures internes complexes pour identifier de minuscules fissures, pores et inclusions ;
- Convient pour la R&D et le contrôle qualité haut de gamme ;
- Il existe certaines restrictions sur les plaques d'alliage de tungstène plus épaisses, et les paramètres doivent être ajustés en fonction de la puissance de l'équipement.

3. Avantages

- Fournir des images 3D intuitives pour faciliter la localisation des défauts et l'analyse de la morphologie ;
- Capable d'une évaluation détaillée de l'intégrité structurelle.

3. Essai par courants de Foucault (ET)

1. Principe technique

- Le champ magnétique alternatif est utilisé pour induire des courants de Foucault à la surface du matériau conducteur. La distribution des courants de Foucault au niveau du défaut change, et les caractéristiques du défaut sont reflétées par la détection du signal de courants de Foucault.
- Principalement utilisé pour la détection des défauts de surface et proches de la surface.

2. Champ d'application

- Convient pour détecter les fissures de surface, la corrosion et les dommages locaux des plaques en alliage de tungstène ;
- Peut scanner rapidement de grandes surfaces ;
- Détection sans contact, adaptée aux pièces aux formes complexes.

3. Avantages

- Vitesse de réponse rapide et haute sensibilité ;
- Le processus de test est non destructif et ne nécessite aucune préparation particulière.

4. Test de particules magnétiques (MT)

1. Principe technique

- Le matériau magnétique est magnétisé en appliquant un champ magnétique externe, et un champ magnétique de fuite est généré à la surface et aux défauts proches de la surface, et la position du défaut est révélée par adsorption de poudre magnétique ;
- Convient pour la détection des fissures superficielles et proches de la surface.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Champ d'application

- L'alliage de tungstène contient des éléments d'alliage de fer et possède un certain magnétisme, ce qui convient aux tests de particules magnétiques ;
- Convient pour détecter les fissures de surface, les pores et les fissures de fatigue ;
- Principalement utilisé pour la détection rapide des lignes de production.

3. Avantages

- Facile à utiliser et à faible coût ;
- Convient pour des tests rapides sur site.

V. Stratégie de détection globale

- Sélectionnez les méthodes d'inspection appropriées en fonction de l'objet d'inspection et du type de défaut ;
- Il est recommandé d'utiliser une combinaison de plusieurs technologies de détection pour les défauts complexes et les composants clés afin d'améliorer la précision de la détection ;
- Établir des processus de test standardisés pour garantir la fiabilité et la répétabilité des résultats des tests.

VI. Résumé

Les technologies de contrôle par ultrasons, tomodensitométrie, courants de Foucault et magnétoscopie constituent un ensemble d'outils diversifié pour la détection des défauts de surface et proches de la surface des plaques en alliage de tungstène. L'application rationnelle de ces technologies de contrôle non destructif permet de révéler pleinement la répartition des défauts à l'intérieur et à la surface du matériau, de garantir la qualité et la sécurité des plaques en alliage de tungstène et d'offrir une garantie solide pour la recherche, le développement et l'application industrielle de ces plaques.

4.6 Évaluation de la rugosité de surface et de l'adhérence du revêtement

La rugosité de surface d'une plaque en alliage de tungstène affecte non seulement son aspect, mais aussi directement ses propriétés mécaniques, sa résistance à la corrosion et l'effet des procédés de traitement ultérieurs. La rugosité de surface est un indicateur clé pour évaluer la planéité et la finesse de la surface du matériau, tandis que l'adhérence du revêtement détermine la stabilité et la durabilité de la couche protectrice ou fonctionnelle pendant l'utilisation. Cette section se concentre sur la méthode de mesure de la rugosité de surface d'une plaque en alliage de tungstène et sur la technologie d'évaluation de l'adhérence du revêtement.

1. Mesure de la rugosité de surface

1. Importance

- La rugosité de surface affecte directement la précision d'adaptation et les performances de frottement des plaques en alliage de tungstène et d'autres composants ;
- Une rugosité trop élevée peut provoquer une concentration de contraintes et réduire la durée de vie en fatigue ;
- Une bonne rugosité de surface favorise une adhérence uniforme du revêtement.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Méthodes de mesure courantes

- **Profilomètre de contact** : Scanne le profil de surface à l'aide d'un stylet pour obtenir des paramètres de rugosité (tels que Ra, Rz, etc.) ;
- **Profilomètre optique** : mesure sans contact par interférence laser ou lumière blanche, adapté à l'analyse de rugosité micrométrique et nanométrique ;
- **Microscope à force atomique (AFM)** : Convient pour la mesure de morphologie de surface de très haute précision, principalement utilisé dans la recherche scientifique et les applications haut de gamme.

3. Paramètres clés

- **Ra (rugosité moyenne arithmétique)** : reflète la valeur moyenne des irrégularités de surface et constitue l'indicateur le plus couramment utilisé ;
- **Rz (rugosité de hauteur en dix points)** : reflète la différence entre les pics et les vallées et évalue le degré maximal d'ondulation de surface ;
- **Rq (root mean square roughness)** : Moyenne quadratique statistique, adaptée à l'évaluation de surfaces complexes.

2. Évaluation de l'adhérence du revêtement

1. L'importance de l'adhésion

- Le revêtement protège la plaque en alliage de tungstène des influences environnementales telles que la corrosion, l'usure et les températures élevées ;
- Une bonne adhérence assure la stabilité à long terme du revêtement pendant l'utilisation ;
- Une mauvaise adhérence peut entraîner un écaillage du revêtement, réduisant ainsi la durée de vie et les performances du matériau.

2. Méthodologie d'évaluation

- **Test d'arrachement** : Utiliser un équipement spécial pour mesurer la force de traction maximale requise pour que le revêtement soit décollé du substrat et évaluer quantitativement l'adhérence ;
- **Test de rayure** : grattez avec une force progressivement croissante pour observer le décollement du revêtement et juger de la force d'adhérence ;
- **Test d'impact** : Évaluer les performances anti-pelage du revêtement grâce à une charge d'impact ;
- **Méthode de décapage du ruban adhésif** : décollez rapidement le ruban adhésif après le collage, observez la situation de pelage du revêtement et effectuez des tests qualitatifs rapides.

3. Conditions expérimentales

- La température et l'humidité de l'environnement de test doivent être maintenues stables pour éviter d'affecter les résultats ;
- La surface de l'échantillon doit être prétraitée et nettoyée pour garantir la cohérence de l'adhérence du revêtement ;
- Sélectionnez des normes et des méthodes de test appropriées pour garantir la comparabilité des résultats.

3. Relation entre la rugosité de surface et l'adhérence

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Une surface modérément rugueuse peut améliorer la morsure mécanique du revêtement et améliorer l'adhérence ;
- Une surface trop rugueuse ou trop lisse affectera les performances du revêtement ;
- La rugosité de surface doit être optimisée en fonction du type de revêtement et de l'environnement d'utilisation.

4. Contrôle qualité et optimisation des processus

- Surveiller les paramètres critiques pendant le processus de fabrication en mesurant régulièrement la rugosité et l'adhérence ;
- Optimiser les processus de meulage, de polissage et de prétraitement de surface pour améliorer la qualité de surface ;
- Sur la base des caractéristiques des matériaux de revêtement, des normes de traitement de surface scientifiques et raisonnables sont formulées.

V. Résumé

La rugosité de surface et l'adhérence du revêtement sont des indicateurs importants qui influencent la fonctionnalité et la durée de vie des plaques en alliage de tungstène. L'utilisation de méthodes de mesure et d'évaluation avancées permet de contrôler efficacement la qualité des produits, d'améliorer les performances globales des plaques en alliage de tungstène et de garantir leur large application.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

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

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

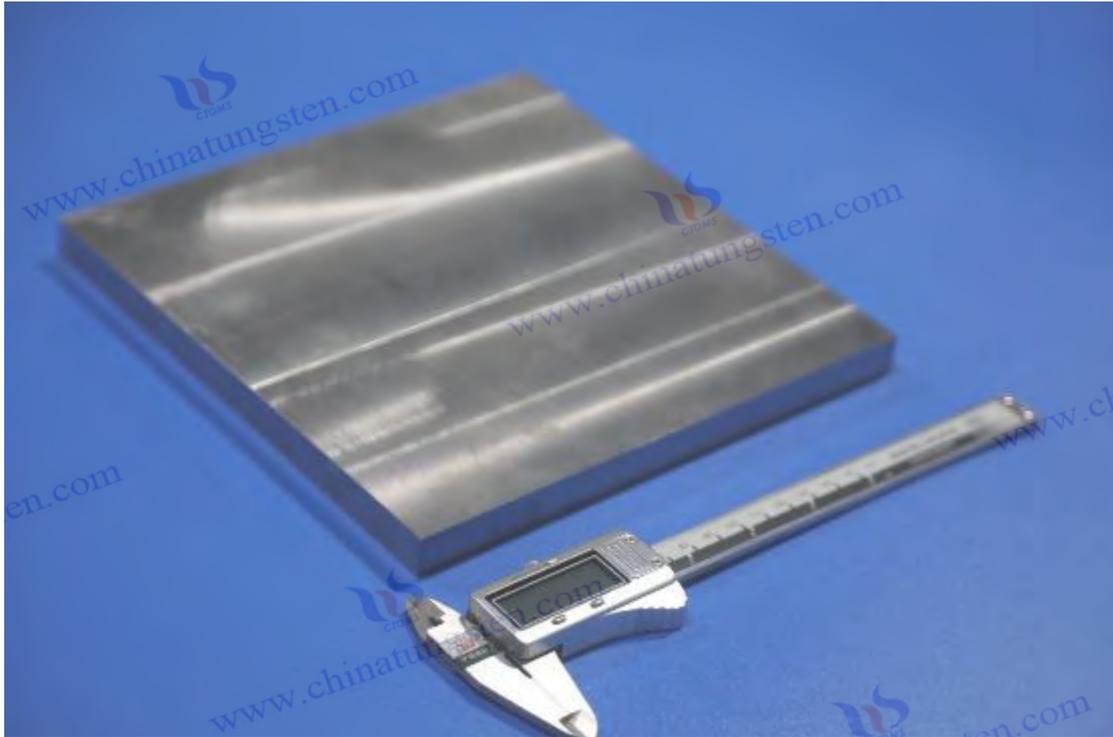
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



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

5.1 Plaques de blindage et dispositifs de contrôle thermique de l'industrie nucléaire

Les plaques en alliage de tungstène sont largement utilisées dans les domaines du blindage et du contrôle thermique dans l'industrie nucléaire, en raison de leur densité élevée, de leur point de fusion élevé et de leur excellente résistance aux radiations, qui jouent un rôle essentiel. Avec le développement de la technologie nucléaire, les exigences en matière de résistance aux radiations, de résistance mécanique et de stabilité thermique des matériaux sont de plus en plus élevées. Les plaques en alliage de tungstène sont devenues un choix idéal grâce à leurs propriétés uniques.

1. Le rôle et la demande des plaques de blindage de l'industrie nucléaire

1. Protection contre les radiations

- Les réacteurs nucléaires, les installations de traitement des déchets nucléaires, les équipements de médecine nucléaire et autres lieux doivent protéger efficacement contre les rayonnements afin de garantir la sécurité des opérateurs ;
- La plaque en alliage de tungstène présente une excellente capacité d'absorption des rayons gamma et des rayons X en raison de son numéro atomique élevé ($Z = 74$) et de sa densité élevée (environ $17,0-18,5 \text{ g/cm}^3$) ;
- Il peut remplacer le blindage en plomb traditionnel et éviter la toxicité du plomb et la pollution de l'environnement.

2. Absorption des neutrons

- Dans les réacteurs nucléaires, certains alliages de tungstène sont améliorés pour absorber les neutrons en ajoutant des éléments spécifiques (tels que le nickel et le fer) ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La plaque de blindage doit avoir une bonne stabilité structurelle et une bonne résistance aux dommages causés par les radiations pour garantir un service à long terme.

3. Exigences de performances mécaniques et thermiques

- Nécessité de résister à des températures élevées, à des pressions élevées et à un environnement de rayonnement, nécessitant que les plaques en alliage de tungstène aient une résistance élevée et une excellente stabilité thermique ;
- Le coefficient de dilatation thermique doit correspondre à celui des autres matériaux de structure pour éviter les fissures et les déformations causées par les contraintes thermiques.

2. Caractéristiques d'application des dispositifs de contrôle thermique

1. Gestion thermique

- Les réacteurs nucléaires et les installations nucléaires génèrent une grande quantité d'énergie thermique, ce qui nécessite l'utilisation de matériaux à haute conductivité thermique pour une dissipation efficace de la chaleur ;
- La plaque en alliage de tungstène est meilleure que les autres matériaux en métaux lourds, ce qui aide à maintenir la température du système stable.

2. Résistance aux hautes températures

- Les plaques en alliage de tungstène peuvent maintenir l'intégrité structurelle et des performances stables dans des environnements à haute température et conviennent à la fabrication de composants de contrôle thermique ;
- La conception en alliage spécial améliore la résistance mécanique et la résistance à l'oxydation à haute température.

3. Support structurel

- Dans le dispositif de contrôle thermique, les plaques en alliage de tungstène servent de composants porteurs et de support pour assurer le fonctionnement sûr du système ;
- Il a de bonnes performances de traitement et peut répondre aux besoins de personnalisation de formes complexes.

3. Avantages des plaques en alliage de tungstène dans l'industrie nucléaire

- **Avantage haute densité** : Offre une protection efficace contre les radiations et réduit l'épaisseur et le poids du blindage ;
- **Forte résistance aux radiations** : résiste à la dégradation des matériaux induite par les radiations et prolonge la durée de vie ;
- **Excellente stabilité thermique** : s'adapte aux variations de température dans des conditions de travail complexes dans l'industrie nucléaire ;
- **Respectueux de l'environnement et non toxique** : Il remplace les matériaux toxiques au plomb et répond aux exigences modernes de protection de l'environnement.

4. Cas d'application typiques

- panneaux de blindage réflecteurs dans les centrales nucléaires ;
- Revêtements de conteneurs de stockage et de transport de déchets nucléaires ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Panneaux de protection contre les radiations dans les équipements de radiothérapie médicale ;
- Structure de support de contrôle thermique dans le système du cycle du combustible nucléaire.

V. Tendances et défis du développement

- Les plaques d'alliage de tungstène dans l'industrie nucléaire auront tendance à évoluer vers des matériaux composites multifonctionnels à hautes performances ;
- L'amélioration de la résistance aux hautes températures, à l'oxydation et aux dommages causés par les radiations est au cœur des activités de recherche et développement ;
- Réaliser une production de masse de plaques d'alliage de tungstène de grande taille et de haute densité et réduire les coûts sont des défis industriels.

VI. Résumé

Les plaques en alliage de tungstène jouent un rôle essentiel dans les dispositifs de blindage et de contrôle thermique. Grâce à l'innovation technologique continue et à l'optimisation des procédés, les performances des plaques en alliage de tungstène continueront de s'améliorer pour répondre aux exigences de sécurité, de protection de l'environnement et d'efficacité opérationnelle de l'industrie nucléaire.

5.2 Structures de protection aérospatiales et plaques de contrepoids

Les plaques en alliage de tungstène jouent un rôle important dans les structures de protection et les systèmes de contrepoids dans le secteur aérospatial grâce à leur densité élevée, leur grande résistance et leur excellente résistance aux radiations et à la chaleur. Avec les progrès constants de la technologie aérospatiale, les exigences de performance des matériaux sont de plus en plus strictes. Grâce à leurs avantages uniques, les plaques en alliage de tungstène sont devenues un matériau essentiel pour améliorer la sécurité et les performances des avions.

1. Application aux structures de protection

1. Blindage de protection contre les radiations

- Les véhicules aérospatiaux sont exposés aux rayons cosmiques et au rayonnement solaire en haute altitude ou dans des environnements spatiaux. Les plaques en alliage de tungstène peuvent absorber efficacement les particules et les rayons à haute énergie afin de protéger les équipements électroniques et le personnel des engins spatiaux.
- Comparé aux matériaux traditionnels, l'alliage de tungstène présente une efficacité de protection contre les radiations plus élevée, réduit l'épaisseur et le poids du blindage et améliore la capacité de charge des avions.

2. Structure pare-balles et résistante aux chocs

- Dans les pièces clés des avions militaires et des engins spatiaux, les plaques d'alliage de tungstène sont utilisées pour fabriquer des blindages pare-balles et des couches résistantes aux chocs, résistant efficacement à l'impact des projectiles à grande vitesse et des micrométéorites ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- L'alliage de tungstène en fait un matériau de protection idéal pour assurer la sécurité des équipements et du personnel.

3. Système de protection thermique

- Pendant le vol, la température de surface du vaisseau spatial varie considérablement. Les plaques en alliage de tungstène offrent une excellente résistance aux hautes températures et une excellente dilatation thermique, et peuvent être utilisées comme couches d'isolation thermique et boucliers thermiques.
- Aide à protéger les structures contre l'ablation à haute température et les dommages causés par la fatigue thermique.

2. Le rôle clé de la plaque de contreponds

1. Équilibre du centre de gravité et stabilité du vol

- Les plaques en alliage de tungstène sont utilisées dans le système de contreponds des véhicules aérospatiaux pour ajuster le centre de gravité de l'avion et assurer le contrôle de l'attitude et la stabilité pendant le vol ;
- La densité élevée rend le contreponds de petite taille, économisant de l'espace et répondant aux besoins de conception compacte.

2. Réduction des vibrations

- Les contreponds en alliage de tungstène peuvent réduire efficacement les vibrations des avions, réduire la fatigue mécanique et prolonger la durée de vie de l'équipement ;
- Contribue à améliorer le confort de vol et la fiabilité du système.

3. Conception compacte

- Les plaques en alliage de tungstène permettent la conception de structures de contreponds plus fines et plus légères, ce qui contribue à réduire le poids global.
- Prend en charge le traitement personnalisé de formes complexes pour répondre aux exigences de conception de différents aéronefs.

3. Avantages de la plaque en alliage de tungstène

- **Densité élevée** : améliore considérablement l'efficacité du contreponds et réduit le volume et le poids ;
- **Excellentes propriétés mécaniques** : assurent la résistance et la ténacité de la structure protectrice ;
- **Résistance aux hautes températures** : s'adapte aux températures élevées et aux environnements extrêmes ;
- **Excellente résistance aux radiations** : garantissant la sécurité des systèmes électroniques des engins spatiaux.

4. Cas d'application typiques

- Systèmes de protection contre les radiations et de contreponds dans les plates-formes satellites ;
- Blindage pare-balles et contreponds de réglage du centre de gravité pour avions de chasse et drones militaires ;
- Panneaux d'isolation thermique et contreponds structurels pour véhicules aérospatiaux.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

V. Tendances et défis du développement

- Avec la demande croissante de plaques légères et de hautes performances, l'optimisation de la microstructure et l'intégration de matériaux composites dans les plaques d'alliage de tungstène sont devenues des points chauds de recherche ;
- L'amélioration de la résistance à la fatigue thermique et de la ténacité aux chocs des plaques en alliage de tungstène constitue une difficulté technique majeure ;
- Une technologie de production à grande échelle, à faible coût et à haut rendement, nécessite de toute urgence une percée.

VI. Résumé

Les plaques en alliage de tungstène jouent un rôle essentiel dans les structures de protection et les systèmes de contrepoids aéronautiques. Leurs propriétés physiques et mécaniques uniques répondent non seulement aux exigences de protection haute résistance et de contrepoids précis, mais contribuent également à la sécurité, à la stabilité et à l'efficacité opérationnelle des avions. À l'avenir, grâce à l'innovation des matériaux et à l'amélioration des procédés, les plaques en alliage de tungstène offriront de plus vastes perspectives d'application dans le secteur aéronautique.

5.3 Plaques de protection haute densité dans les dispositifs de radiothérapie médicale

Les plaques en alliage de tungstène sont largement utilisées dans les équipements de radiothérapie médicale en raison de leur densité élevée et de leurs excellentes performances de protection contre les radiations. Elles servent principalement à fabriquer des plaques de radioprotection efficaces. Le fonctionnement sûr des équipements de radiothérapie impose des exigences strictes en matière de radioprotection des patients et du personnel médical. Grâce à leurs excellentes propriétés physiques et mécaniques, les plaques en alliage de tungstène sont devenues un matériau essentiel pour garantir la sécurité de la radiothérapie.

1. Nécessité d'une radioprotection dans les équipements de radiothérapie

- Les rayons X et gamma générés lors de la radiothérapie ont un pouvoir de pénétration et une énergie extrêmement élevés. Sans protection efficace, ils peuvent causer des dommages radiologiques au personnel et aux équipements environnants.
- La plaque de protection doit absorber et bloquer efficacement les rayonnements, empêcher les fuites de rayonnement et assurer la sécurité de l'environnement de traitement.

2. Avantages des performances de protection des plaques en alliage de tungstène

1. Effet de blindage supérieur grâce à la haute densité

- Les plaques d'alliage de tungstène ont généralement une densité comprise entre 17 et 19 g/cm³, ce qui est bien supérieur à celle des matériaux traditionnels comme le plomb. Elles permettent d'obtenir un effet de blindage identique, voire supérieur, même avec une épaisseur plus fine.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Rendre la structure globale de l'équipement de radiothérapie plus compacte et plus facile à concevoir et à installer.

2. Excellente résistance mécanique et durabilité

- Les plaques en alliage de tungstène ont une bonne résistance mécanique et une bonne ténacité, ce qui peut répondre aux exigences d'utilisation à long terme des équipements médicaux ;
- La résistance à la corrosion et à l'usure prolonge la durée de vie de la plaque de protection et réduit les coûts de maintenance.

3. Sécurité environnementale

- Par rapport aux matériaux toxiques tels que le plomb, les plaques en alliage de tungstène sont plus respectueuses de l'environnement, évitent le risque de toxicité du plomb et sont plus conformes aux normes de sécurité médicale modernes.

3. Formulaire de demande et configurations typiques

- **Couvercle de protection et porte de blindage** : utilisez une plaque en alliage de tungstène pour fabriquer un couvercle de protection et une porte afin d'empêcher les fuites de rayonnement ;
- **Limiteur et filtre de faisceau de rayonnement** : Contrôlez avec précision la direction et l'intensité du rayonnement grâce à des plaques en alliage de tungstène ;
- **Supports et revêtements d'équipement** : améliorent la résistance structurelle des équipements de radiothérapie et garantissent la sécurité radiologique.

4. Exigences de fabrication et de transformation

- La densité et l'uniformité de la plaque d'alliage de tungstène doivent être assurées pour éviter les micropores et les défauts qui affectent l'effet de blindage ;
- Exigences strictes en matière de traitement de surface pour garantir la douceur et les performances anticorrosion ;
- Usinage de précision pour répondre aux exigences structurelles et dimensionnelles particulières des équipements de radiothérapie.

V. Tendances et défis du développement

- Promouvoir la combinaison de plaques d'alliage de tungstène et de matériaux composites pour améliorer encore l'efficacité du blindage et le niveau de légèreté ;
- matériaux de protection en alliage de tungstène pour les nouveaux équipements de radiothérapie ;
- Résolvez le problème de fabrication de plaques d'alliage de tungstène hautes performances de grande taille et réduisez les coûts.

VI. Résumé

En tant que matériau de protection haute densité utilisé dans les dispositifs de radiothérapie médicale, les plaques en alliage de tungstène garantissent la sécurité et l'efficacité de la radiothérapie grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques et de blindage. Avec les progrès de la technologie médicale, les plaques en alliage de tungstène joueront un rôle de plus en plus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

important dans la protection des équipements de radiothérapie et favoriseront l'amélioration continue de la sécurité médicale.

5.4 Plaque en alliage de tungstène pour paroi de four à haute température et environnement thermique

Les plaques en alliage de tungstène sont largement utilisées dans les parois des fours à haute température et divers environnements thermiques en raison de leurs excellentes performances à haute température, de leur stabilité thermique et de leur résistance à la corrosion. Elles sont devenues des matériaux de structure et de protection essentiels pour les équipements haute température. Avec le développement des technologies de traitement à haute température, les exigences en matière de résistance thermique et de résistance mécanique des matériaux sont plus strictes. Grâce à leurs avantages uniques, les plaques en alliage de tungstène ont démontré d'excellentes performances dans des conditions de travail extrêmes.

1. Exigences de performance des matériaux des parois des fours à haute température

1. Résistance aux hautes températures

- Le matériau des parois du four doit résister à des environnements à haute température allant de centaines à des milliers de degrés Celsius pour garantir un fonctionnement stable à long terme ;
- La plaque en alliage de tungstène atteint une température de 3422 °C. Elle présente une excellente résistance aux hautes températures et résiste efficacement à la corrosion thermique et à l'oxydation.

2. Adaptation de la dilatation thermique

- La plaque en alliage de tungstène a un faible coefficient de dilatation thermique et peut bien s'adapter à d'autres matériaux de four, réduisant ainsi la concentration de contraintes thermiques et empêchant les fissures et les déformations.

3. Résistance mécanique et ténacité

- Il doit conserver une résistance et une ténacité suffisantes dans des environnements à haute température pour résister aux chocs thermiques et aux charges mécaniques ;
- L'alliage de tungstène améliore ses propriétés mécaniques globales à haute température grâce à la régulation des éléments d'alliage et au processus de traitement thermique.

2. Caractéristiques d'application des plaques en alliage de tungstène dans un environnement thermique

1. Pièces structurales thermiquement stables

- Utilisé comme matériau structural pour les parois des fours à haute température, les échangeurs de chaleur et les dispositifs de protection thermique pour assurer l'intégrité structurale de l'équipement ;
- Les plaques en alliage de tungstène peuvent efficacement empêcher l'oxydation et la corrosion dans les atmosphères à haute température.

2. Protection contre le rayonnement thermique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Dans un environnement thermique, les plaques d'alliage de tungstène peuvent réfléchir et absorber efficacement le rayonnement thermique et protéger les parties sensibles de l'équipement en raison de leur densité élevée et de leur point de fusion élevé.
- Il contribue à maintenir une distribution stable du champ thermique et à améliorer l'efficacité thermique.

3. Résistance à la fatigue thermique

- La plaque en alliage de tungstène présente une conception organisationnelle spéciale pour améliorer la résistance du matériau à la fatigue thermique et la stabilité du cycle thermique, prolongeant ainsi sa durée de vie.

3. Exemples d'application typiques

- Revêtement de four à haute température et plaques de protection, utilisés dans les fours de métallurgie, de frittage de céramique et de fabrication de semi-conducteurs ;
- Composants structurels des fours de traitement thermique et des fours à vide ;
- Panneaux isolants résistants à la chaleur pour réacteurs et échangeurs de chaleur à haute température.

4. Traitement des matériaux et points clés de la technologie

- Les plaques en alliage de tungstène doivent subir un traitement thermique de précision et un traitement de renforcement de surface pour améliorer la résistance aux températures élevées et la résistance à l'oxydation ;
- Optimiser la microstructure de la plaque, améliorer la densité et l'uniformité et améliorer les propriétés mécaniques à haute température ;
- Une technologie de formage avancée est utilisée pour garantir que la taille et la forme de la plaque répondent aux exigences d'installation de l'équipement.

V. Tendances de développement et défis techniques

- Améliorer les performances globales des plaques d'alliage de tungstène dans des environnements thermiques extrêmes, y compris la résistance à l'oxydation et la stabilité thermique ;
- Rechercher et développer des matériaux composites multifonctionnels en alliage de tungstène pour réaliser l'intégration de la résistance aux hautes températures, de la résistance à la corrosion et de la gestion thermique ;
- Réduisez le coût de production des plaques d'alliage de tungstène à haute température et réalisez une application à grande échelle.

VI. Résumé

Les plaques en alliage de tungstène garantissent un fonctionnement sûr et fiable des équipements industriels haute température grâce à leur excellente résistance aux hautes températures et à leur stabilité structurelle. À l'avenir, grâce aux progrès constants de la science des matériaux et des technologies de traitement, les plaques en alliage de tungstène joueront un rôle plus important et plus important dans le domaine des hautes températures.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.5 Revêtement de plaques composites en acier et de pièces mécaniques

Les plaques en alliage de tungstène sont largement utilisées dans les plaques composites en acier moulé et les matériaux de revêtement des pièces mécaniques en raison de leur densité élevée, de leur résistance élevée, de leur excellente résistance à l'usure et à la chaleur, améliorant ainsi les performances et la durée de vie de la structure globale. Associées à l'acier moulé et à d'autres matériaux, les plaques en alliage de tungstène améliorent non seulement la résistance à l'usure et aux chocs des pièces, mais résistent également efficacement aux températures élevées et aux environnements corrosifs, assurant ainsi un fonctionnement efficace et stable des structures mécaniques.

1. Contexte d'application et avantages des plaques composites en acier moulé

1. Conditions d'application

- Le moule est soumis à une pression élevée, à une température élevée et à un frottement à grande vitesse pendant le fonctionnement, de sorte que le matériau du moule doit avoir une dureté élevée, une résistance à l'usure élevée et une stabilité thermique ;
- La plaque en alliage de tungstène composite et l'acier à matrice peuvent atteindre une combinaison optimale de dureté de surface et de ténacité interne.

2. Avantages de la plaque en alliage de tungstène

- Les plaques en alliage de tungstène ont une dureté élevée et une excellente résistance à l'usure, prolongeant efficacement la durée de vie du moule ;
- La densité élevée contribue à améliorer la rigidité globale et la résistance à la déformation du moule ;
- Une bonne conductivité thermique favorise une répartition uniforme de la chaleur et réduit la concentration des contraintes thermiques.

2. Fonctions et exigences du revêtement des pièces mécaniques

1. Résistance à l'usure et à la corrosion

- Les revêtements pour pièces mécaniques sont souvent utilisés dans des environnements à forte usure et corrosion, tels que les sièges de roulements, les parois intérieures du corps de vanne, etc.
- Le revêtement en alliage de tungstène améliore la dureté de surface et la résistance à la corrosion des pièces et réduit la fréquence de maintenance.

2. Capacité de charge et stabilité

- Les plaques en alliage de tungstène améliorent la capacité de charge et la résistance aux chocs de la structure du revêtement ;
- Améliorer la stabilité globale et la durée de vie des pièces mécaniques.

3. Technologie et procédé composites

1. Composite de métallurgie des poudres

- l'alliage de tungstène et l'acier à matrice sont obtenus par un procédé de métallurgie des poudres pour garantir une interface dense et sans fissures ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Il peut réaliser une transition de gradient de composition et réduire les contraintes causées par la différence de dilatation thermique.

2. Liaison mécanique et soudage

- La technologie de fixation mécanique ou de soudage laser est utilisée pour réaliser la combinaison de plaques d'alliage de tungstène et d'acier, avec un processus flexible ;
- La qualité du soudage a un impact significatif sur les performances des composites et les paramètres du processus doivent être strictement contrôlés.

3. Traitement de surface

- La surface composite en alliage de tungstène est meulée, polie et revêtue pour améliorer la qualité de surface et la résistance à la corrosion ;
- Les revêtements tels que les revêtements céramiques améliorent encore la résistance à l'usure et la résistance aux températures élevées.

4. Cas d'application typiques

- Plaques composites moulées à haute résistance à l'usure pour moules de moulage de plastique et d'emboutissage de métal ;
- Sièges de roulements d'équipements mécaniques et garnitures de soupapes pour améliorer la résistance à l'usure et à la corrosion ;
- Matériau de revêtement pour pièces structurelles mécaniques à forte charge pour prolonger la durée de vie des équipements.

V. Tendances et défis du développement

- Rechercher et développer des matériaux composites en alliage de tungstène à haute résistance et haute ténacité pour répondre aux besoins de conditions de travail complexes ;
- Optimiser la structure de l'interface composite pour améliorer la force de liaison et la stabilité thermique ;
- Réduire les coûts de fabrication des composites et promouvoir l'application industrielle des plaques composites en alliage de tungstène.

VI. Résumé

Les plaques en alliage de tungstène utilisées dans les moules, les plaques composites en acier et les revêtements de pièces mécaniques améliorent efficacement la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la stabilité thermique des pièces mécaniques, contribuant ainsi à un fonctionnement efficace et durable des équipements. Grâce à une technologie composite et à un traitement de surface avancés, les matériaux composites en alliage de tungstène offrent de vastes perspectives d'application dans le domaine de la fabrication mécanique.

5.6 Structures de dissipation thermique/anti-rayonnement dans les instruments de précision et les produits électroniques

Avec le développement des technologies électroniques et des instruments de précision, les exigences en matière d'efficacité de dissipation thermique, de stabilité dimensionnelle et de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance aux radiations des matériaux sont de plus en plus élevées. Les plaques d'alliage de tungstène, grâce à leur densité élevée, leur conductivité thermique élevée et leur excellente résistance aux radiations, sont devenues des matériaux de structure essentiels pour la dissipation thermique et la protection des instruments de précision et des produits électroniques. Elles sont largement utilisées dans les équipements électroniques haut de gamme, les stations de base de communication, les dispositifs laser et les systèmes électroniques spatiaux.

1. Le rôle clé de la structure de dissipation thermique

1. Conductivité thermique élevée

- Les plaques en alliage de tungstène ont une bonne conductivité thermique, ce qui peut conduire efficacement et rapidement la chaleur générée par les composants électroniques pour éviter la surchauffe ;
- Une excellente conductivité thermique garantit une température stable de l'appareil pendant le fonctionnement à haute puissance, améliorant ainsi la fiabilité et la durée de vie.

2. Stabilité dimensionnelle

- La plaque en alliage de tungstène a un faible coefficient de dilatation thermique, ce qui garantit la stabilité de la taille de la structure lorsque la température change et empêche la dégradation des performances causée par la déformation thermique ;
- Il est particulièrement adapté aux supports de dissipation thermique dans les dispositifs microélectroniques qui nécessitent une précision dimensionnelle extrêmement élevée.

2. Exigences d'application des structures résistantes aux rayonnements

1. Rayonnement anti-électromagnétique

- Dans les équipements électroniques aérospatiaux, militaires et médicaux, les plaques d'alliage de tungstène sont utilisées comme matériaux de blindage pour bloquer efficacement les interférences électromagnétiques (EMI) ;
- Assurer la transmission stable des signaux électroniques et le fonctionnement normal des équipements.

2. Rayonnement antinucléaire

- Utilisées dans les équipements de médecine nucléaire et les instruments de détection radioactive, les plaques en alliage de tungstène peuvent protéger les particules à haute énergie et les composants sensibles ;
- Assurer un fonctionnement stable à long terme des équipements et améliorer la sécurité.

3. Scénarios d'application typiques

- Substrat de dissipation thermique pour stations de base de communication haute fréquence pour assurer un fonctionnement stable des équipements de communication ;
- Supports de dissipation thermique et couvercles de blindage dans les lasers et les instruments optiques ;
- Protection contre les radiations pour l'électronique aérospatiale ;
- Composants de radioprotection et de dissipation thermique dans les équipements électroniques médicaux.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Exigences de conception et de traitement

- Les plaques en alliage de tungstène doivent avoir une pureté élevée et une microstructure uniforme pour garantir la conductivité thermique et les propriétés mécaniques ;
- efficacité du contact thermique avec d'autres composants ;
- Un revêtement de surface peut être appliqué selon les besoins pour améliorer la résistance à la corrosion et les performances de blindage électromagnétique.

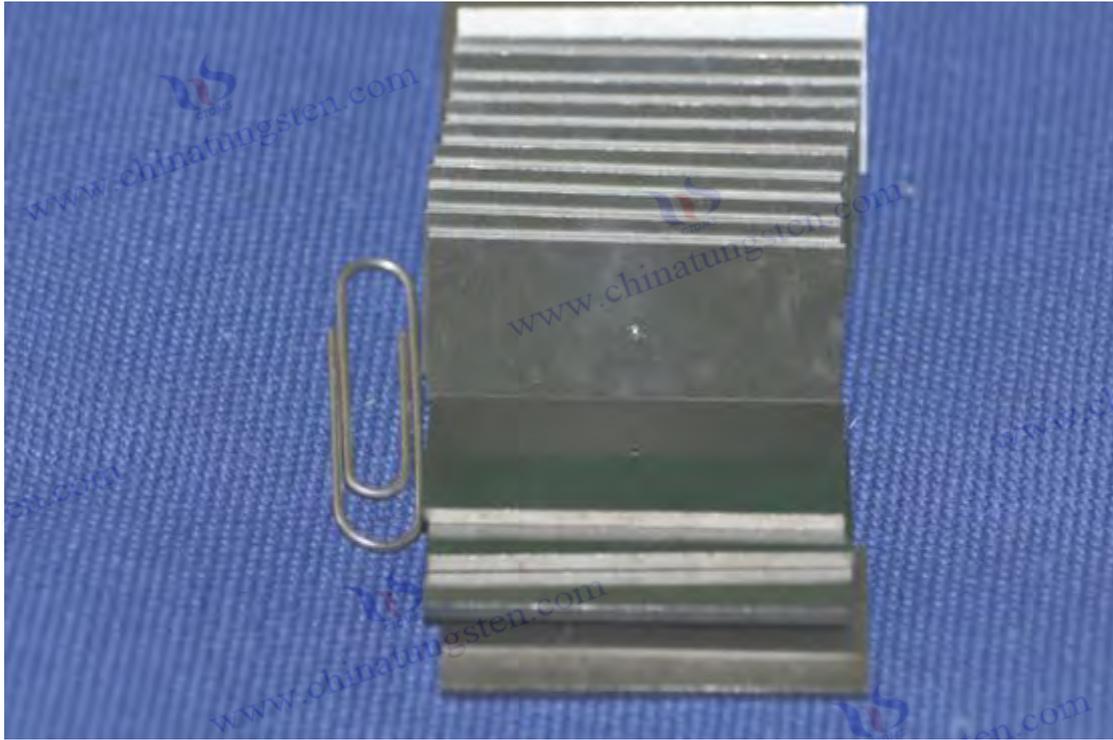
V. Tendances de développement et défis techniques

- Conception de structure de dissipation thermique intégrée et légère, combinée à un alliage de tungstène et à d'autres matériaux fonctionnels pour obtenir un composite multifonctionnel ;
- Améliorer le contrôle de la microstructure des plaques d'alliage de tungstène pour améliorer encore la conductivité thermique et la résistance aux radiations ;
- Réduire les coûts de fabrication et promouvoir la vulgarisation et l'application dans le domaine de l'électronique civile.

VI. Résumé

Les plaques en alliage de tungstène sont devenues un matériau essentiel pour garantir la performance et la durée de vie des équipements de dissipation thermique et de résistance aux radiations des instruments de précision et des produits électroniques, grâce à leur excellente conductivité thermique et à leurs excellentes propriétés de radioprotection. Avec le développement continu des technologies électroniques, les plaques en alliage de tungstène démontreront leur valeur irremplaçable dans les secteurs de l'électronique haut de gamme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 6 Recherche et développement et innovation de plaques spéciales en alliage de tungstène

Préparation et propriétés des plaques d'alliage de tungstène nanostructurées

Avec le développement de la science des matériaux, la nanotechnologie a progressivement été appliquée à la préparation de plaques d'alliage de tungstène, améliorant considérablement les propriétés mécaniques, la stabilité thermique et les caractéristiques fonctionnelles des plaques d'alliage de tungstène traditionnelles. Les plaques d'alliage de tungstène nanostructurées permettent d'affiner le grain, de renforcer l'interface et d'optimiser les phases en régulant la microstructure, améliorant ainsi considérablement les performances globales du matériau et offrant un nouveau choix pour les applications haut de gamme.

1. Technologie de préparation de plaques d'alliage de tungstène nanostructurées

1. Préparation de nanopoudres

- La poudre de tungstène et la poudre d'alliage à l'échelle nanométrique sont préparées à l'aide de technologies avancées telles que le broyage à billes à haute énergie, le dépôt en phase vapeur et la réduction chimique ;
- La taille des particules de poudre est affinée jusqu'à atteindre des dizaines de nanomètres, ce qui améliore la densification du matériau et les performances de liaison de l'interface.

2. Broyage à billes à haute énergie et mélange uniforme

- Un mélange uniforme et un alliage mécanique amélioré des poudres sont obtenus grâce au broyage à billes à haute énergie ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Affinez efficacement les grains et répartissez uniformément les phases de renforcement pour améliorer la résistance mécanique et la ténacité.

3. Technologie de frittage rapide

- Utiliser des procédés de frittage rapide tels que le frittage par plasma d'étincelles (SPS) et le frittage par micro-ondes pour raccourcir le temps de frittage et inhiber la croissance des grains ;
- Maintenir la structure nano-grain pour assurer une densité élevée et d'excellentes performances.

4. Optimisation du traitement thermique

- Utiliser un processus de traitement thermique à basse température pour stabiliser la structure nanocristalline et réduire les contraintes internes ;
- Ajustez l'état des tissus pour obtenir un équilibre de performance optimal.

2. Avantages de performance des plaques d'alliage de tungstène nanostructurées

1. Propriétés mécaniques améliorées

- Le raffinement du grain améliore considérablement la résistance à la traction et la limite d'élasticité, permettant d'obtenir une combinaison de résistance et de ténacité élevée ;
- Le mécanisme de renforcement de l'interface nano augmente la ténacité à la fracture et améliore la résistance aux chocs.

2. Stabilité thermique et résistance à l'usure

- Les plaques d'alliage de tungstène nanostructurées présentent une excellente stabilité thermique et peuvent résister à la croissance des grains et à la dégradation des performances à haute température ;
- La dureté de surface et la résistance à l'usure sont considérablement améliorées pour s'adapter aux conditions de travail difficiles.

3. Excellente conductivité thermique et propriétés électriques

- La structure nano-grain optimise le chemin de conduction thermique et améliore l'efficacité de la conduction thermique ;
- Il a une bonne conductivité électrique et peut répondre aux exigences de dissipation thermique des appareils électroniques et des équipements haute fréquence.

3. Domaines d'application typiques

- Pièces structurales à haute résistance et légères pour l'aérospatiale ;
- Panneaux de blindage résistants aux radiations pour l'industrie nucléaire ;
- Substrat de dissipation thermique électronique haute performance ;
- Moules de précision et pièces mécaniques à haute résistance à l'usure.

IV. Défis et orientations futures

- Le coût élevé de la préparation des nanopoudres et le processus de production complexe limitent l'application à grande échelle ;
- Les nanocristaux ont tendance à se développer dans des environnements à haute température, ce qui affecte la stabilité des performances à long terme ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les processus de frittage et de traitement thermique doivent être davantage optimisés pour atteindre un équilibre entre performances et coûts.

V. Résumé

Les plaques d'alliage de tungstène nanostructurées améliorent considérablement la résistance mécanique, la ténacité et les propriétés fonctionnelles des matériaux grâce à une microstructure fine, favorisant ainsi leur application et leur valorisation dans les domaines haut de gamme. À l'avenir, grâce à l'amélioration continue des technologies de préparation et à la réduction des coûts, les plaques d'alliage de tungstène nanostructurées constitueront une voie importante pour le développement des technologies des alliages de tungstène.

6.2 Stratégies de conception de microalliages et d'alliages multicomposants

Avec la diversification des exigences de performance des alliages de tungstène, le microalliage et la conception d'alliages multicomposants sont devenus des solutions techniques clés pour améliorer les performances globales des plaques en alliage de tungstène. L'introduction d'éléments d'alliage traces et de systèmes d'alliages multicomposants permet d'améliorer considérablement les propriétés mécaniques, la stabilité thermique et les caractéristiques fonctionnelles des alliages de tungstène, et de contrôler précisément les performances des matériaux pour répondre aux exigences strictes de l'aérospatiale, de l'industrie nucléaire et de la fabrication haut de gamme.

1. Aperçu de la technologie des microalliages

1. Définition et mécanisme d'action

- Le microalliage fait référence à l'ajout d'éléments d'alliage en très faibles concentrations (généralement inférieures à 1 %) à des alliages à base de tungstène ;
- Ces oligo-éléments améliorent la résistance et la ténacité de l'alliage grâce à des mécanismes tels que le renforcement de la solution solide, le renforcement par précipitation et le renforcement des joints de grains ;
- Les éléments de microalliage peuvent également affiner les grains, optimiser la microstructure et améliorer les performances globales des matériaux.

2. Éléments de microalliage couramment utilisés

- Titane (Ti), niobium (Nb), vanadium (V), zirconium (Zr), aluminium (Al), molybdène (Mo), etc.
- Les différents éléments ont des effets différents sur la dureté, la ténacité et la stabilité thermique des alliages de tungstène. Choisir la bonne combinaison d'éléments est essentiel à la conception.

2. Stratégie de conception d'alliage multi-éléments

1. Construction d'un système d'alliage multicomposant

- Adopter une conception de rapport multi-éléments pour obtenir l'effet synergique des éléments d'alliage ;
- Optimiser la microstructure et le gradient de performance en faisant correspondre correctement les éléments de matrice et de renforcement ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Par exemple, W-Ni-Fe-Ti, W-Ni-Cu-Mo et d'autres systèmes.

2. Application du concept d'alliages à haute entropie

- Présentation du concept de conception d'alliages à haute entropie, utilisant un mélange équimolaire de plusieurs éléments pour améliorer la stabilité du matériau et sa résistance à la fatigue thermique ;
- Cela permet aux plaques en alliage de tungstène de présenter une excellente durabilité dans des environnements extrêmes.

3. Microalliage et amélioration des performances des alliages multicomposants

1. Propriétés mécaniques

- Les éléments de microalliage favorisent le renforcement des grains fins et augmentent la limite d'élasticité et la résistance à la traction ;
- En contrôlant la phase de précipitation, la ténacité à la rupture et la résistance aux chocs du matériau peuvent être améliorées.

2. Stabilité thermique

- Les éléments de microalliage inhibent la croissance des grains et la transformation de phase et améliorent les performances à haute température ;
- Améliorez la correspondance de dilatation thermique, réduisez les contraintes thermiques et augmentez la durée de vie en fatigue thermique.

3. Caractéristiques

- Optimiser la conductivité électrique et les propriétés magnétiques pour répondre aux besoins des applications électroniques et magnétiques ;
- Améliorer la résistance aux radiations et renforcer la fiabilité des matériaux utilisés dans l'industrie nucléaire.

4. Processus de préparation et défis techniques

- La distribution uniforme des éléments d'alliage traces est difficile et nécessite un contrôle précis des processus de mélange de poudre et de frittage ;
- La conception de la composition des alliages est complexe et nécessite une combinaison de simulation informatique et de vérification expérimentale ;
- Le processus de préparation d'alliages multicomposants à haute entropie est encore au stade de la recherche et l'application industrielle nécessite de surmonter les goulots d'étranglement techniques.

V. Orientation future du développement

- Associés à une science des matériaux informatiques avancée, des alliages de tungstène microalliés hautes performances sont conçus ;
- Développer des procédés de préparation à faible coût et à haute efficacité pour réaliser une production à grande échelle d'alliages multicomposants ;
- les performances et le potentiel d'application des alliages de tungstène microalliés dans des conditions de travail extrêmes.

VI. Résumé

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le microalliage et la conception d'alliages multicomposants constituent un moyen important d'améliorer les performances des plaques en alliage de tungstène. Grâce au contrôle précis des éléments et à l'effet synergique de plusieurs composants, les propriétés mécaniques et les caractéristiques fonctionnelles du matériau sont pleinement optimisées. À l'avenir, grâce aux progrès constants de la théorie et de la technologie, les plaques en alliage de tungstène microalliées joueront un rôle croissant dans la fabrication haut de gamme.

plaques en alliage de tungstène résistant aux hautes températures.

La stabilité et les performances des plaques en alliage de tungstène dans des environnements à haute température affectent directement leur application dans l'aérospatiale, l'industrie nucléaire et la fabrication à haute température. Grâce à une optimisation raisonnable de l'organisation et à la conception du processus de traitement thermique, la résistance à haute température des plaques en alliage de tungstène, y compris la stabilité thermique, la résistance à l'oxydation et la résistance mécanique, peut être considérablement améliorée pour répondre aux exigences des conditions de service extrêmes.

1. Facteurs clés affectant la résistance à haute température des plaques en alliage de tungstène

1. Microstructure

- La taille des grains, les caractéristiques des limites des grains et la distribution de la deuxième phase affectent toutes directement la stabilité thermique du matériau ;
- Les grains raffinés et les phases de renforcement uniformément réparties aident à inhiber la croissance des grains et à améliorer la résistance à haute température.

2. Composition du matériau

- Les éléments d'alliage tels que le titane (Ti), le molybdène (Mo) et le niobium (Nb) améliorent la résistance à l'oxydation à haute température et la résistance au fluage en formant des phases stables ;
- Un rapport raisonnable peut optimiser les caractéristiques de dilatation thermique et réduire les contraintes thermiques.

2. Stratégie d'optimisation organisationnelle

1. Raffinage et homogénéisation des grains

- Adopter le broyage à billes à haute énergie, le frittage rapide et d'autres technologies pour obtenir une structure de grain fine et uniforme ;
- Le mécanisme de renforcement des limites des grains empêche efficacement la croissance des grains à des températures élevées.

2. Deuxième phase de renforcement

- Introduction de particules de seconde phase petites et stables pour renforcer les joints de grains et améliorer la résistance au fluage ;
- Les particules de la deuxième phase sont réparties uniformément pour éviter la formation de zones de concentration de contraintes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Conception du processus de traitement thermique

1. Traitement thermique de pré-frittage

- Réguler la taille des particules de poudre et l'uniformité de la composition pour éviter les défauts lors du frittage ;
- Adopter des conditions de température et d'atmosphère adaptées pour favoriser la densification.

2. Traitement de solution à haute température

- Grâce au traitement thermique de mise en solution à haute température, les phases sont dissoutes et séparées, les éléments d'alliage sont répartis uniformément et l'homogénéité du matériau est améliorée ;
- Prévenir la précipitation des phases grossières et maintenir la stabilité organisationnelle.

3. Traitement en temps opportun

- Contrôler la taille et la distribution de la phase précipitée pour améliorer la résistance à haute température ;
- Optimiser la température et le temps de vieillissement pour obtenir des propriétés mécaniques optimales.

4. Contrôle de l'atmosphère

- Le traitement thermique est effectué dans une atmosphère protectrice (comme l'argon, l'azote) pour réduire l'oxydation ;
- Certains procédés utilisent un traitement thermique sous vide pour garantir la qualité de la surface et la pureté interne.

4. Effet d'amélioration des performances

- Après traitement thermique, la plaque en alliage de tungstène présente des grains fins, une structure uniforme et une résistance au fluage considérablement améliorée ;
- La résistance à haute température et la ténacité à la rupture sont considérablement améliorées pour s'adapter aux charges à haute température et aux chocs thermiques ;
- La stabilité thermique améliorée prolonge la durée de vie du matériau dans les environnements à haute température.

5. Exemples d'application et tendances de développement

- Matériaux de protection haute température pour aubes de turbines et pièces structurelles de moteurs d'avion ;
- Matériaux de structure résistants à la chaleur pour composants à haute température des réacteurs nucléaires ;
- Composants clés résistants aux hautes températures dans les fours industriels à haute température et les équipements de traitement thermique.

À l'avenir, combiné à une technologie avancée de caractérisation de la microstructure et à une simulation numérique, la conception organisationnelle et le processus de traitement thermique des plaques d'alliage de tungstène résistant aux hautes températures seront encore optimisés pour réaliser des percées continues dans les performances des matériaux.

VI. Résumé

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'optimisation de l'organisation et le traitement thermique de précision sont les principaux moyens d'améliorer les performances des plaques en alliage de tungstène résistant aux hautes températures. Le contrôle de la granulométrie, le renforcement de la distribution des phases et les paramètres du traitement thermique permettent d'améliorer considérablement la stabilité thermique et les propriétés mécaniques à haute température du matériau, garantissant ainsi une application fiable des plaques en alliage de tungstène dans des environnements extrêmes.

6.4 Mécanisme de liaison d'interface des plaques composites tungstène-cuivre/tungstène-nickel

Les feuilles composites tungstène-cuivre (W-Cu) et tungstène-nickel (W-Ni) allient la densité élevée, le point de fusion élevé et la résistance mécanique du tungstène aux bonnes conductivités électrique et thermique et à la ténacité du cuivre et du nickel. Elles sont largement utilisées dans les domaines de la dissipation thermique électronique, de la gestion thermique et des matériaux de structure haute température. La performance des feuilles composites dépend en grande partie de la qualité et du mécanisme de liaison des interfaces. Une compréhension approfondie du processus de liaison des interfaces est essentielle à l'optimisation des propriétés des matériaux et des procédés de fabrication.

1. Caractéristiques de la structure de l'interface de la plaque composite tungstène-cuivre/tungstène-nickel

- Il existe des différences significatives dans les propriétés physiques et chimiques du tungstène, du cuivre et du nickel, notamment le point de fusion, le coefficient de dilatation thermique, la structure du réseau, etc.
- Il y a généralement une couche de transition ou une couche de diffusion dans la zone d'interface, qui affecte la résistance mécanique de la liaison et la conductivité thermique de l'interface ;
- Une excellente liaison d'interface nécessite une bonne mouillabilité et une bonne liaison métallurgique entre les métaux ainsi qu'une réduction des fissures et des pores d'interface.

2. Analyse du mécanisme de liaison de l'interface

1. Liaison mécanique

- Grâce au pressage physique et à la déformation plastique, le tungstène et le cuivre, la poudre ou la plaque de nickel sont en contact étroit pour former une liaison préliminaire ;
- La liaison mécanique fournit le support structurel de base de l'interface, mais la force de liaison est limitée.

2. Liaison métallurgique

- Lors du frittage à haute température ou de la diffusion thermique, le tungstène diffuse et se dissout avec les atomes de cuivre et de nickel ;
- Forme une couche de diffusion de transition pour améliorer la liaison de l'interface et la conductivité thermique ;
- Le tungstène et le nickel forment une certaine solution solide ou phase interstitielle, ce qui améliore la ténacité de l'interface.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Diffusion et réactions interfaciales

- Les éléments diffusent à l'interface, formant des phases d'alliage fines ou des phases de transition, qui facilitent le transfert de contraintes ;
- Le contrôle du processus de diffusion peut éviter la formation de phases cassantes et améliorer la stabilité de l'interface.

3. Facteurs clés affectant les performances de liaison des interfaces

1. Taille et distribution des particules de poudre

- Une poudre fine et uniforme aide à former une interface dense ;
- De grandes différences de taille de particules peuvent entraîner des défauts d'interface.

2. Température et atmosphère de frittage

- La température de frittage doit être suffisamment élevée pour favoriser la diffusion et la liaison métallurgique, mais éviter une croissance excessive des grains ;
- L'atmosphère protectrice empêche l'oxydation de l'interface et maintient l'interface propre.

3. Supprimez la pression et le temps

- Une pression suffisante permet d'éliminer les pores interfaciaux et d'améliorer la liaison mécanique ;
- Le temps de frittage affecte la profondeur de diffusion et l'uniformité de la structure de l'interface.

4. Impact de la liaison d'interface sur les performances

- Une bonne liaison d'interface améliore la conductivité thermique et la conductivité électrique du panneau composite, répondant aux besoins de dissipation thermique efficace ;
- La force de liaison de l'interface détermine directement la résistance mécanique et la résistance à la fatigue thermique du matériau ;
- Une mauvaise liaison interfaciale peut entraîner la formation de fissures et réduire la fiabilité globale du matériau.

5. Technologie d'ingénierie et d'optimisation des interfaces

- Les traitements d'activation de surface, tels que le nettoyage au plasma, améliorent la mouillabilité et la qualité de liaison ;
- Ajout d'activateurs d'interface ou de matériaux de couche d'interface pour favoriser la liaison par diffusion et la stabilisation de l'interface ;
- Adoptez une conception d'interface en alliage à gradient pour atténuer les différences de dilatation thermique et réduire les contraintes thermiques.

6. Exemples d'application

- Les plaques composites en cuivre tungstène sont largement utilisées dans les substrats de dissipation thermique des appareils électroniques et les dispositifs de commutation haute puissance ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les plaques composites tungstène-nickel sont utilisées pour les pièces structurelles résistantes à l'usure et à haute résistance et les matériaux de blindage de l'industrie nucléaire ;
- L'optimisation du collage des interfaces améliore la durée de vie et la stabilité des performances des panneaux composites dans des environnements extrêmes.

VII. Résumé

Les plaques composites tungstène-cuivre et tungstène-nickel sont un facteur clé de la performance des matériaux. L'optimisation de la liaison mécanique, de la diffusion métallurgique et de l'ingénierie des interfaces permet d'obtenir des matériaux composites à haute résistance, conductivité thermique et ténacité élevées, répondant aux exigences strictes en matière de dissipation thermique électronique et de matériaux de structure haute température. À l'avenir, le développement des technologies de conception et de contrôle des interfaces favorisera l'amélioration des performances et l'expansion des applications des plaques composites en alliage de tungstène.

6.5 Recherche et développement de revêtements de surface et de tôles résistantes à l'usure et à la corrosion

Dans de nombreuses applications industrielles, les plaques en alliage de tungstène sont souvent confrontées à des défis complexes tels que l'usure mécanique, la corrosion et l'oxydation à haute température. Afin d'améliorer la résistance à l'usure et à la corrosion des plaques en alliage de tungstène, la technologie de revêtement de surface est devenue un axe clé de recherche et développement. Grâce à la diversification des matériaux de revêtement et à des procédés de revêtement avancés, non seulement les propriétés de surface des plaques en alliage de tungstène ont été considérablement améliorées, mais leurs domaines d'application ont également été élargis.

1. Aperçu de l'usure et de la corrosion de la surface des plaques en alliage de tungstène

- Les plaques en alliage de tungstène sont sujettes à l'usure de surface dans les environnements à forte charge et à frottement fréquent, ce qui affecte leur durée de vie.
- L'oxydation à haute température et la corrosion chimique entraînent une dégradation de la surface, affaiblissant la résistance mécanique et les performances globales ;
- Les défauts de surface et les microfissures peuvent facilement devenir des sources de corrosion, entraînant des dommages matériels à plus grande échelle.

2. Types et caractéristiques de la technologie de revêtement de surface

1. Revêtement céramique

- Les matériaux couramment utilisés comprennent l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), l'oxyde de titane (TiO_2), le nitrure de silicium (Si_3N_4), etc.
- Il présente une dureté élevée, une résistance élevée à l'usure et une excellente résistance aux hautes températures ;
- Convient pour une utilisation dans des conditions d'usure extrême et de température élevée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Revêtement métallique

- Les revêtements métalliques tels que le cuivre, le nickel et le chrome sont obtenus par galvanoplastie, pulvérisation et autres méthodes ;
- Améliorer la conductivité de surface et la résistance à la corrosion ;
- Convient aux applications de refroidissement et de protection électroniques.

3. Revêtement composite

- Le revêtement composite céramique-métal combine les avantages des deux, avec à la fois dureté et ténacité ;
- Il est préparé à l'aide de procédés avancés tels que le dépôt physique en phase vapeur (PVD) et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD).

4. Technologie de nano-revêtement

- Utiliser des nanomatériaux pour préparer des revêtements à structure ultrafine afin d'améliorer l'adhérence et la résistance à l'usure ;
- Possède d'excellentes propriétés d'auto-réparation et anti-corrosion.

3. Processus de préparation du revêtement

1. Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

- Le film mince est déposé par technologie d'évaporation ou de pulvérisation cathodique, et le revêtement est dense et uniforme ;
- Couramment utilisé pour préparer des revêtements composites durs en céramique et en métal.

2. Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

- Convient pour un revêtement uniforme sur de grandes surfaces, avec une forte adhérence du revêtement ;
- La composition et l'épaisseur du revêtement peuvent être contrôlées pour répondre à des exigences de performance spécifiques.

3. Galvanoplastie et pulvérisation

- Le processus de galvanoplastie est simple et efficace, adapté aux applications de revêtement métallique ;
- La technologie de pulvérisation est flexible et adaptée aux revêtements épais et aux pièces de forme complexe.

4. Le rôle du revêtement de surface dans l'amélioration des performances

- Améliore considérablement la dureté de surface et la résistance à l'usure des plaques en alliage de tungstène et prolonge leur durée de vie ;
- Préviennent efficacement l'oxydation et la corrosion chimique et protègent la structure du matériau ;
- Améliorent la conductivité thermique et les propriétés électriques de surface pour répondre aux besoins de l'électronique haut de gamme et des instruments de précision.

V. Progrès et défis de la R&D

- De nouveaux matériaux de revêtement fonctionnels continuent d'émerger, tels que les céramiques ultra-dures et les nanocomposites ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La force de liaison et la correspondance de dilatation thermique entre le revêtement et le substrat de la plaque en alliage de tungstène constituent des difficultés techniques ;
- Il est nécessaire de développer des procédés de revêtement à basse température pour réduire la contrainte thermique du substrat et la dégradation des performances ;
- Tenez compte du respect de l'environnement et de la rentabilité du revêtement et favorisez son application industrielle.

VI. Orientation future du développement

- Recherche et développement de revêtements composites multifonctionnels pour obtenir une résistance à l'usure, une résistance à la corrosion, une conductivité thermique et une résistance aux radiations intégrées ;
- Technologies de revêtement intelligentes, telles que les matériaux de revêtement auto-réparateurs et respectueux de l'environnement ;
- Associée à la conception de la nanostructure de surface, l'adhérence et les performances sont encore améliorées ;
- Optimisez le flux de processus pour obtenir une préparation de revêtement efficace et économe en énergie.

VII. Résumé

La technologie de revêtement de surface est essentielle pour améliorer la résistance à l'usure et à la corrosion des plaques en alliage de tungstène. Grâce à l'innovation des matériaux et à l'optimisation des procédés, la durée de vie et la fiabilité des plaques en alliage de tungstène dans des conditions d'utilisation difficiles ont été considérablement améliorées, offrant de solides garanties pour leur application dans l'aérospatiale, l'industrie nucléaire, les appareils électroniques et d'autres secteurs.

6.6 Conception d'une plaque fonctionnelle en alliage de tungstène conductrice thermique et électrique/antimagnétique

Les plaques en alliage de tungstène sont largement utilisées dans des secteurs haut de gamme tels que l'électronique, l'aérospatiale et l'énergie nucléaire, en raison de leur excellente densité, de leur résistance et de leur point de fusion élevé. Avec le développement technologique, la conception fonctionnelle des plaques en alliage de tungstène s'est progressivement étendue aux propriétés de conductivité thermique, de conductivité électrique et d'antimagnétisme afin de répondre aux divers besoins dans des conditions de travail complexes. Grâce au contrôle de la composition, à la conception de la microstructure et à la technologie des composites, les performances thermique, électrique et magnétique des plaques en alliage de tungstène peuvent être efficacement améliorées.

1. Principe de conception d'une plaque en alliage de tungstène conductrice thermique et électrique

1. Contrôle de la composition de l'alliage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- L'introduction d'éléments métalliques à haute conductivité thermique, tels que le cuivre (Cu), l'argent (Ag) et l'aluminium (Al), améliore considérablement la conductivité thermique et la conductivité électrique du matériau ;
- Ajustez le rapport du tungstène aux autres éléments pour obtenir une répartition raisonnable de la matrice et de la phase conductrice, en tenant compte à la fois de la résistance et de la conductivité.

2. Optimisation de la microstructure

- Optimiser la taille des grains et la morphologie de la matrice de tungstène, réduire la résistance thermique des joints de grains et améliorer l'efficacité de la conduction thermique ;
- L'interface de phase est contrôlée par la métallurgie des poudres et un processus de frittage rapide pour réduire la résistance de l'interface et la résistance thermique.

3. Conception de matériaux composites

- Adopter des systèmes composites tungstène-cuivre, tungstène-argent et autres pour former un réseau conducteur continu afin de garantir une conductivité thermique et électrique élevée ;
- Développer des matériaux fonctionnellement gradués pour obtenir une optimisation zonée des performances de surface et internes.

Stratégie de conception d'une plaque en alliage de tungstène antimagnétique

1. Contrôle des éléments magnétiques

- Réduire ou éviter l'utilisation d'éléments magnétiques puissants (tels que le fer Fe, le cobalt Co, le nickel Ni) pour réduire la réponse magnétique du matériau ;
- Des métaux non magnétiques ou faiblement magnétiques sont utilisés comme éléments d'alliage pour garantir une faible perméabilité magnétique globale.

2. Structure cristalline et contrôle des défauts

- En affinant les grains et en réduisant la structure du domaine magnétique, l'anisotropie magnétique est augmentée et les performances magnétiques macroscopiques sont réduites ;
- Contrôler la morphologie et la distribution de la phase précipitée et réduire l'agrégation de la phase magnétique.

Caractéristiques de performance de la plaque fonctionnelle en alliage de tungstène

1. Conductivité thermique et électrique élevée

- La conductivité thermique peut atteindre plusieurs fois celle des alliages de tungstène traditionnels, répondant aux besoins de dissipation thermique des appareils électroniques et des communications haute fréquence ;
- La résistivité est réduite, garantissant de bonnes propriétés électriques, et convient aux matériaux de contact et aux structures d'électrodes.

2. Faibles caractéristiques de réponse magnétique

- Faible perméabilité magnétique et excellentes propriétés antimagnétiques, adaptées au contrôle de précision du champ magnétique et aux équipements de résonance magnétique médicale ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Réduisez les interférences du champ magnétique et améliorez la stabilité du système et la précision des mesures.

4. Domaines d'application

- Substrats de dissipation thermique et pièces structurelles conductrices pour dispositifs électroniques hautes performances ;
- Instruments et structures d'équipements dans l'aérospatiale sensibles aux interférences magnétiques ;
- L'industrie nucléaire a besoin de matériaux de protection qui prennent en compte à la fois la dissipation de la chaleur et les propriétés antimagnétiques ;
- Matériaux structurels clés dans les équipements d'imagerie par résonance magnétique (IRM) médicale.

5. Défis de conception et de fabrication

- L'équilibre entre la conductivité thermique et électrique et la résistance mécanique nécessite une optimisation complète dans de nombreux aspects ;
- Le contrôle de la résistance thermique et de la résistance électrique de l'interface composite est difficile et le processus de préparation nécessite des exigences élevées ;
- L'amélioration des propriétés antimagnétiques impose des exigences plus élevées en matière de sélection des éléments d'alliage et de contrôle de la microstructure.

6. Tendances de développement futures

- Utiliser la science des matériaux computationnels pour guider la conception des composants et obtenir un contrôle précis de la conductivité thermique, de la conductivité électrique et des propriétés antimagnétiques ;
- Développer des matériaux nanostructurés et à gradient fonctionnel pour améliorer les performances de l'interface et la stabilité globale ;
- Promouvoir l'application de la technologie de fabrication additive dans les plaques fonctionnelles en alliage de tungstène pour réaliser la fabrication intégrée de structures complexes ;
- Explorez la technologie des matériaux intelligents pour obtenir une réponse dynamique et un ajustement des performances des plaques en alliage de tungstène.

VII. Résumé

Grâce à une conception scientifique de leur composition et à un contrôle de leur microstructure, les plaques fonctionnelles en alliage de tungstène, conductrices de chaleur, d'électricité et antimagnétiques, répondent aux multiples exigences de gestion thermique, de propriétés électriques et magnétiques des applications haut de gamme. Avec les progrès de la technologie des matériaux et des procédés de fabrication, ce type de plaque fonctionnelle en alliage de tungstène jouera un rôle de plus en plus important dans les secteurs de l'aérospatiale, des communications électroniques, de l'industrie nucléaire et des équipements médicaux.

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

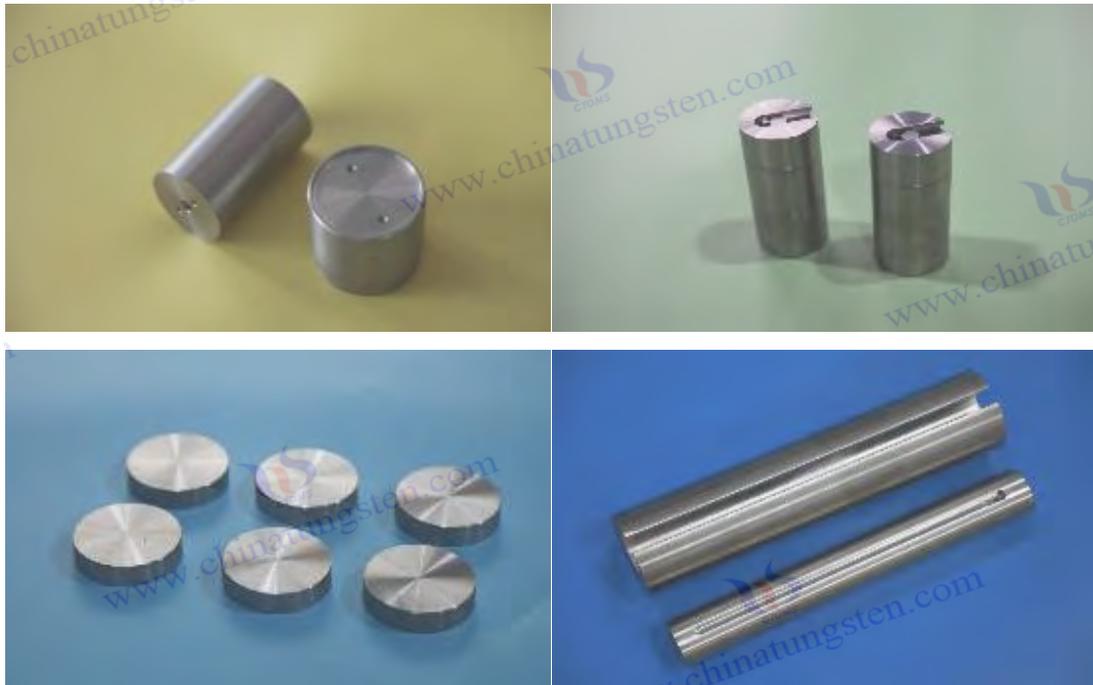
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

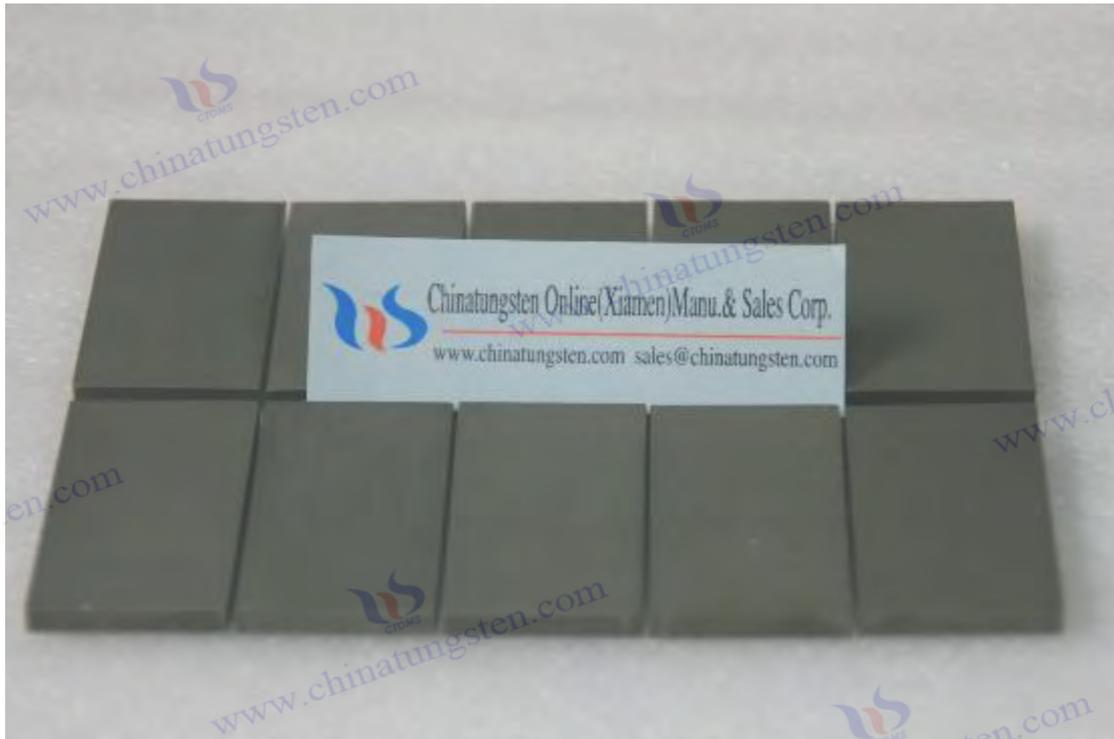
Official website: www.tungsten-alloy.com



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 7 Normes internationales et système de qualité des plaques en alliage de tungstène

7.1 Normes relatives aux plaques d'alliage de tungstène chinoises (GB/T, YS/T)

En tant que l'un des principaux fournisseurs et fabricants mondiaux de tungstène, la Chine a établi un système de normes relativement complet pour les produits en tungstène et en alliages de tungstène, couvrant les conditions techniques, les méthodes d'essai, les tolérances dimensionnelles, la qualité de surface, les indicateurs de performance et les spécifications d'essai des plaques en alliage de tungstène. La norme nationale (GB/T) et la norme industrielle des métaux non ferreux (YS/T) constituent ensemble la base de qualité et les spécifications industrielles des plaques en alliage de tungstène sur le marché chinois.

1. Aperçu du système standard

1. Norme nationale (GB/T)

- Les normes GB/T sont des normes nationales recommandées jouissant d'une grande autorité et d'une grande universalité ;
- Il est principalement utilisé pour guider la taille, la tolérance, les conditions techniques et les méthodes de test des plaques en alliage de tungstène ;
- Il s'applique aux critères d'évaluation de la qualité dans divers domaines industriels généraux, aux produits d'exportation et aux contrats d'approvisionnement nationaux.

2. Norme industrielle (YS/T)

- La norme YS/T est formulée par l'Association chinoise de l'industrie des métaux non ferreux et reflète le dernier niveau technique de l'industrie ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Plus spécifique et détaillé, souvent utilisé dans les exigences d'indexation technique des plaques spéciales en alliage de tungstène ;
- Il présente une meilleure prévoyance et une meilleure applicabilité pour les produits en alliage de tungstène avec de nouveaux matériaux et de nouveaux procédés.

2. Exemples de normes nationales couramment utilisées (GB/T)

Norme n°	Nom standard	Contenu
GB/T 4187	Plaque de tungstène	Spécifie la classification, la taille, l'apparence, les propriétés mécaniques et les méthodes d'essai des plaques de tungstène
GB/T 3462	Tolérances dimensionnelles pour les tôles de métaux rares	Couvre les normes de tolérance d'épaisseur et de largeur pour les plaques de tungstène, de molybdène et autres
GB/T 2040	Méthodes d'analyse chimique des produits à base de tungstène	Applicable à l'analyse de W, Fe, Ni, Cu et d'autres éléments dans les plaques d'alliage de tungstène
GB/T 8170	Règles d'arrondi numérique	le contrôle de la taille et l'inspection des plaques de tungstène

Remarque : dans le cadre de l'approvisionnement et de l'acceptation réels, la norme GB/T 4187 est souvent largement utilisée comme norme de base.

3. Exemples de normes industrielles couramment utilisées pour les métaux non ferreux (YS/T)

Norme n°	Nom standard	Champ d'application
YS/T 519	Produits en alliage de tungstène lourd	applicable aux plaques de tungstène nickel fer, tungstène nickel cuivre et autres produits
YS/T 795	Plaque en alliage de tungstène	Fournir des indicateurs clairs sur les performances et l'apparence des plaques épaisses, des plaques moyennes et des plaques minces
YS/T 670	Méthodes d'essai pour les matériaux en tungstène issus de la métallurgie des poudres	Spécifications de test pour les propriétés microscopiques telles que la densité et la porosité
YS/T 629	Méthode d'analyse de la composition chimique d'un alliage à base de tungstène	Méthodes d'analyse de haute précision impliquant la détection simultanée de plusieurs éléments

IV. Principaux indicateurs du contenu normatif

1. Contrôle des dimensions et des tolérances

- Écart d'épaisseur, écart de largeur, planéité de la surface du panneau ;
- Uniformité des bords, contrôle du gauchissement, etc.

2. Propriétés mécaniques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Résistance à la traction, limite d'élasticité, allongement ;
- Indice de dureté (HV, HB), ténacité aux chocs, etc.

3. Qualité de surface

- Aucune fissure, écaillage, écailles d'oxyde ou inclusions ne sont autorisés ;
- Rugosité de surface $Ra \leq$ valeur spécifiée, de légères rayures sont autorisées.

4. Défauts internes et contrôle organisationnel

- Spécifier des méthodes de test telles que les ultrasons, la tomographie et d'autres tests non destructifs ;
- La microstructure est uniforme, sans inclusions ni trous significatifs.

5. Gamme de composition chimique

- Teneur en éléments principaux et impuretés tels que W, Ni, Fe, Cu et Mo ;
- Conforme aux classifications de qualité spécifiques (par exemple, qualité 1, qualité 2, qualité spéciale).

V. Mise en œuvre des normes et pratiques de certification de la qualité

1. Objets applicables

- Pour les entreprises de production, les unités d'achat, les instituts de recherche scientifique et les services d'inspection de la qualité ;
- Fournir un soutien technique unifié pour le commerce, l'exportation et les appels d'offres pour les projets.

2. S'aligner sur les normes internationales

- Ces dernières années, les normes chinoises se sont rapprochées de celles de l'ISO et de l'ASTM ;
- Améliorer la compatibilité internationale des normes en adoptant une conversion équivalente, des explications supplémentaires et d'autres méthodes.

3. Normes de contrôle interne de l'entreprise

- Certaines entreprises leaders ont formulé des spécifications techniques d'entreprise plus strictes basées sur la mise en œuvre de GB/T et YS/T ;
- Par exemple, une précision dimensionnelle plus élevée, des limites d'impuretés plus faibles et une qualité de surface plus fine.

VI. Résumé

Le système chinois de normes pour les plaques en alliage de tungstène fournit une base et un support technique pour la conception, la production, les essais et la distribution des produits. La norme GB/T reflète les spécifications nationales unifiées de gestion technique, tandis que la norme YS/T reflète le niveau de développement technologique du secteur. Avec l'essor des plaques en alliage de tungstène dans les domaines d'application haut de gamme, ces normes sont constamment révisées et améliorées, jouant un rôle essentiel pour garantir la qualité des produits et promouvoir les mises à niveau technologiques.

7.2 Interprétation des normes américaines (ASTM, MIL)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En tant que leader mondial des matériaux haut de gamme, les États-Unis ont mis en place un système de normes relativement complet et largement utilisé pour le tungstène et ses alliages. Ce système est principalement composé des **normes ASTM (American Society for Testing and Materials)** et MIL (US Military Standards). Il fournit non seulement des spécifications techniques pour les secteurs militaire, aérospatial, électronique et autres, mais joue également un rôle important dans le commerce mondial, la gestion de la qualité et la certification internationale.

1. Aperçu du système de normes ASTM

1. Nature de la norme

Les normes ASTM (American Society for Testing and Materials) sont **un système de normes techniques internationalement accepté** qui met l'accent sur les propriétés des matériaux, les méthodes de test et les spécifications générales, et sont largement utilisées dans la fabrication industrielle, le contrôle qualité, la conformité commerciale et d'autres domaines.

Normes ASTM typiques relatives aux plaques en alliage de tungstène

Norme n°	Nom standard	Champ d'application
ASTM B702	Spécifications pour les produits de métallurgie des poudres à base d'alliages de tungstène lourds	Y compris les exigences techniques pour divers produits tels que les plaques, les barres, les gâteaux ronds et les pièces forgées
ASTM B777	Norme de produit en alliage de tungstène haute densité	Clarifier les propriétés mécaniques, la composition chimique et la tolérance dimensionnelle des matériaux
ASTM B760	Spécifications techniques des plaques, feuilles et bandes de tungstène et de molybdène	Convient pour la préparation et le contrôle qualité des plaques épaisses et minces
ASTM E1477	Méthodes de référence pour la détection des métaux rares	Analyse spectrale, thermique et détection structurelle de matériaux tels que le tungstène et le molybdène

3. Points clés de la norme

- **Exigences de composition** : spécifier la teneur en tungstène, le rapport des éléments d'alliage et les limites d'impuretés ;
- **Dimensions et tolérances** : y compris l'épaisseur, la largeur, la planéité et le façonnage des bords ;
- **Propriétés mécaniques** : résistance à la traction, limite d'élasticité, ductilité ;
- **Méthodes d'essai** : y compris essai de traction, essai de dureté, essai par ultrasons, etc.
- **Qualité de surface** : Oxydation, écaillage, inclusions, etc. sont clairement définis.

2. Aperçu du système de normes militaires MIL

1. Nature de la norme

norme MIL-STD (Military Standard) est **un système de normes pour produits militaires développé par le Département de la Défense des États-Unis** et largement utilisé dans des applications de haute technologie telles que l'armement militaire, l'aérospatiale et l'ingénierie de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

précision. Ce système met l'accent sur la fiabilité, la sécurité et la constance dans des conditions extrêmes.

Normes représentatives relatives aux plaques en alliage de tungstène

Norme n°	Nom standard	Caractéristiques
MIL-T-21014	Matériau standard en alliage de tungstène haute densité	Y compris les exigences de taille, de performance et de processus des plaques, des tiges et des anneaux
MIL-C-14550	Normes relatives au procédé de nickelage des surfaces métalliques	Exigences de galvanoplastie et adaptabilité environnementale des matériaux à base de tungstène
MIL-STD-45662	Normes de contrôle des équipements de mesure et d'essai	Pour l'inspection des matériaux et la gestion de la traçabilité de la qualité
MIL-STD-883	Normes de test des composants électroniques	Convient aux alliages de tungstène utilisés dans les plaques de support de puces ou les matériaux de dissipation thermique

3. Caractéristiques standard militaires

- **Exigences élevées en matière d'adaptabilité environnementale** : accent mis sur des performances stables dans des environnements à haute température, à rayonnement et à impact ;
- **Fiabilité mécanique stricte** : limites inférieures claires pour la résistance, la ténacité à la rupture et les performances en fatigue ;
- **Contrôle strict de la cohérence des lots** : une bonne traçabilité et une vérification de la cohérence sont requises ;
- **Une attention égale est portée à la certification en matière de sécurité et d'environnement** : couvrant les restrictions sur les éléments nocifs, les tests de vieillissement des matériaux, etc.

3. Relation complémentaire entre les normes ASTM et MIL

Dimensions de comparaison	Normes ASTM	Norme MIL
Zones applicables	Industrie générale, usage civil, recherche scientifique	Industrie aérospatiale, de défense et militaire
Type standard	Spécifications du produit + Méthodes de test	Performances des applications + adaptabilité environnementale
Objectif de l'inspection	Propriétés des matériaux	Fiabilité du système et adaptation des conditions de fonctionnement
Ouverture standard	Les ressources publiques, largement adoptées	Antécédents militaires, partiellement confidentiels

Remarque : lors de la conception et de la production de plaques en alliage de tungstène haut de gamme, les entreprises doivent souvent répondre aux exigences ASTM et MIL.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Application à la production et à l'exportation de plaques en alliage de tungstène

- **Base du contrat technique** : ASTM B702, B777, etc. sont souvent utilisés comme normes de base pour les marchés publics internationaux et les accords techniques ;
- **Interface du système de gestion de la qualité** : les normes MIL exigent une compatibilité avec les systèmes ISO 9001, AS9100 et autres ;
- **Certification internationale** : La conformité aux normes ASTM/MIL permet de pénétrer les marchés haut de gamme tels que l'Amérique du Nord et l'Union européenne ;
- **Orientations sur les méthodes d'essai** : Les méthodes d'essai physiques et chimiques spécifiées dans la norme sont largement adoptées comme base pour les essais.

V. Résumé

Les normes ASTM et MIL constituent un pilier important de la gestion de la qualité des alliages de tungstène aux États-Unis. Leur rigueur, leur systématisation et leur autorité sont reconnues dans le monde entier. L'ASTM fournit des critères généraux d'évaluation des performances des matériaux, tandis que la norme MIL se concentre sur la fiabilité des services en conditions extrêmes. Face à la concurrence internationale, les entreprises chinoises devraient activement se comparer aux normes ASTM/MIL afin d'améliorer l'adaptabilité internationale et la compétitivité de leurs produits sur le marché haut de gamme.

7.3 Compilation des normes européennes et ISO relatives aux plaques en alliage de tungstène

Avec le développement et l'expansion des applications des alliages de tungstène à travers le monde, l'Europe et l'Organisation internationale de normalisation (ISO) ont également établi un ensemble de normes relatives aux plaques en alliage de tungstène, largement applicables et hautement reconnues. Ces normes servent non seulement à la fabrication industrielle locale, à la supervision commerciale et au respect de l'environnement en Europe, mais constituent également une référence internationale, favorisant ainsi l'utilisation généralisée des plaques en alliage de tungstène dans des secteurs haut de gamme tels que l'énergie nucléaire, l'aéronautique, l'électronique et le traitement médical.

1. Introduction au système de normes internationales ISO

1. Nature des normes ISO

- L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est l'organisation de normalisation la plus autorisée et la plus influente au monde ;
- Ses normes relatives aux matériaux en tungstène sont principalement gérées par des comités techniques tels que l'ISO/TC 119 (comité technique de la métallurgie des poudres) et l'ISO/TC 261 (fabrication additive) ;
- Les normes ISO se concentrent sur l'universalité, la coordination et la reconnaissance mutuelle et sont largement utilisées dans le commerce international, la certification et les inspections de conformité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Exemples de normes ISO courantes relatives aux alliages de tungstène

Norme n°	Nom standard	Contenu impliqué
ISO 4499	Méthode d'analyse de la microstructure des poudres métalliques et de leurs produits	de poudre de tungstène et de plaque d'alliage de tungstène fritté
ISO 5755	Méthode de détermination de la densité du matériau tungstène	Détermination de la densité par méthodes archimédiennes et géométriques
ISO 6892-1	Essai de traction des matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai à température ambiante	Appliqué au test des propriétés de traction des plaques en alliage de tungstène
ISO 3928	Essai de pliage de matériaux métalliques	Test de la ductilité et du comportement à la rupture des plaques en alliage de tungstène

Les normes ISO utilisent principalement des méthodes d'essai communes, complétant l'ASTM, et certaines ont été intégrées aux normes de l'UE.

2. Aperçu du système européen de normes EN

1. Source standard

- Les normes EN (normes européennes) sont formulées de manière uniforme par le Comité européen de normalisation (CEN) ;
- Les normes impliquant des plaques en alliage de tungstène sont principalement dérivées des normes des pays membres telles que la DIN allemande, la NF française, la BS britannique et l'UNE espagnole ;
- Il a un effet juridique au sein de l'UE et constitue la base de conformité pour les produits entrant sur le marché européen.

2. Exemples de normes EN typiques

Norme n°	Nom standard	Norme nationale originale
EN 2516	Spécifications du matériau en alliage de tungstène haute densité	Dérivé de la norme de l'industrie aéronautique française (NF L)
EN 10204	Normes relatives aux documents de certification de la qualité des matériaux	Largement utilisé dans le système de traçabilité de la qualité des plaques d'alliage de tungstène
EN ISO 6507	Méthode d'essai de dureté Micro-Vickers des métaux	Équivalent à la norme ISO 6507 pour les essais de dureté
EN ISO 9001	Exigences relatives au système de gestion de la qualité	pour les fabricants de plaques en alliage de tungstène

3. Mise en œuvre et caractéristiques des normes européennes

1. Affinement des indicateurs techniques

- Il existe des classements plus détaillés pour le contrôle de l'épaisseur des plaques, le degré de tolérance, le façonnage des bords, etc.
- Les exigences en matière de contrôle de la qualité de surface, de la microstructure, des inclusions non métalliques, etc. sont élevées.

Exigences élevées en matière de protection et de conformité environnementale

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Accent sur la conformité RoHS (Restriction des substances dangereuses) et REACH (Enregistrement et évaluation des produits chimiques) ;
- Fixer des limites strictes pour les impuretés nocives telles que le plomb, le cadmium et le mercure ;
- La fiche de données de sécurité (FDS/MSDS) et les informations sur le cycle de vie complet du matériau sont requises.

3. Le système de certification est hautement standardisé

- Les produits doivent passer la certification du marquage CE, la déclaration de conformité RoHS et les tests par des tiers ;
- L'entreprise doit obtenir les certifications ISO 9001, ISO 14001 (environnement) et autres certifications de systèmes de gestion ;
- Les chaînes d'approvisionnement militaires, nucléaires et aéronautiques doivent en outre respecter des systèmes avancés tels que les normes EN 9100 et ISO/TS 16949.

4. L'importance internationale des normes ISO et EN

- **Acceptées à l'échelle mondiale** : les normes ISO sont largement utilisées dans les documents techniques et les protocoles d'acceptation pour le commerce international ;
- **Coordination technique** : Les normes EN ISO accélèrent la reconnaissance mutuelle des normes de qualité européennes et internationales ;
- **Promouvoir les exportations** : Si les fabricants chinois de plaques en alliage de tungstène obtiennent la certification ISO/EN, il leur sera plus facile d'entrer sur les marchés haut de gamme en Europe et aux États-Unis ;
- **Intégration technologique** : La plupart des importateurs et utilisateurs finaux européens préfèrent utiliser des produits doublement certifiés ISO/EN.

5. Implications pour les entreprises manufacturières chinoises

direction	suggestion
Mise à niveau technologique	Analyse comparative des normes EN 2516, ISO 4499 et autres pour améliorer la structure et les performances des produits
Système de qualité	Mettre en place un système de contrôle qualité complet conforme aux exigences ISO/EN
Conformité environnementale	Renforcer la recherche et la mise en œuvre de réglementations environnementales telles que RoHS et REACH
Certification internationale	Obtenir activement les certifications CE, ISO et EN pour renforcer l'influence internationale de la marque

VI. Résumé

Le système de normes européen et ISO pour les plaques en alliage de tungstène est hautement standardisé, respectueux de l'environnement et technologiquement avancé. Il constitue le seul moyen pour les fabricants chinois et internationaux d'accéder au marché haut de gamme. Son contenu normatif ne se limite pas aux performances des matériaux et aux méthodes d'inspection, mais intègre également des exigences plus systématiques telles que la sécurité environnementale, la gestion du cycle de vie et la certification des systèmes. Pour les acteurs de la filière des plaques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en alliage de tungstène, l'analyse comparative et l'adaptation actives à ces normes constituent une étape clé pour renforcer la compétitivité internationale et favoriser un développement durable.

7.4 Exigences de conformité environnementale RoHS, REACH et MSDS

Alors que l'attention mondiale portée à la protection de l'environnement et à la santé humaine ne cesse de croître, la production, l'utilisation et la distribution des plaques en alliage de tungstène doivent également respecter une série de réglementations environnementales internationales et de normes de sécurité des matériaux. Parmi celles-ci, le système de conformité représenté par **la directive européenne RoHS, le règlement REACH et les fiches de données de sécurité (FDS)** est devenu un préalable indispensable à l'entrée sur le marché international. Les fabricants de plaques en alliage de tungstène doivent accorder une grande importance à l'intégrité et à la précision de la composition de leurs matériaux, à la gestion des produits chimiques et à la divulgation des informations.

1. Directive RoHS (restriction de l'utilisation de certaines substances dangereuses)

1. Introduction à la directive RoHS

La directive RoHS (Restriction of Hazardous Substances Directive) est une directive environnementale obligatoire émise par l'Union européenne. Elle restreint l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les produits électroniques et électriques. Son objectif est de protéger la santé humaine et l'environnement, et de promouvoir le remplacement progressif des éléments nocifs dans les produits électroniques.

2. Applicabilité des plaques en alliage de tungstène

Bien que les plaques en alliage de tungstène ne soient pas des produits finis électroniques et électriques typiques, **lorsqu'elles sont utilisées dans des pièces structurelles d'équipements électroniques, des dissipateurs thermiques, des plaques de base conductrices thermiques ou des composants d'emballage**, elles doivent répondre aux exigences RoHS, en particulier lorsqu'elles sont exportées vers l'Europe ou impliquées dans des produits terminaux électroniques.

3. Substances restreintes et valeurs limites

Substances restreintes	Concentration maximale autorisée (dans un matériau homogène)
Plomb (Pb)	0,1 % (1 000 ppm)
Cadmium (Cd)	0,01 % (100 ppm)
Mercure (Hg)	0,1 % (1 000 ppm)
Chrome hexavalent (Cr ⁶⁺)	0,1%
Polybromobiphényles (PBB)	0,1%
Éthers diphényles polybromés (PBDE)	0,1%
Phtalates (DEHP, BBP, DBP, DIBP)	0,1 % chacun

4. Mesures de conformité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Contrôler strictement la source des matières premières d'alliage et des éléments d'impureté ;
- Mettre en place un système de test RoHS (tel que les tests XRF) ;
- Obtenir une déclaration de conformité RoHS ou un rapport de test tiers ;
- Le symbole RoHS doit être marqué sur l'emballage et les étiquettes des produits.

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

1. Introduction à REACH

REACH (enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques) est la réglementation chimique la plus stricte de l'UE. Elle s'applique à **tous les produits chimiques et produits contenant des substances chimiques fabriqués ou mis sur le marché dans l'UE** et vise à évaluer leur impact sur la santé humaine et l'environnement.

2. Exigences relatives aux plaques en alliage de tungstène

- Bien que le tungstène lui-même ne soit pas restreint, si la plaque d'alliage de tungstène contient **des substances extrêmement préoccupantes (SVHC)**, telles que certaines impuretés de métaux lourds, des adhésifs, des matériaux de revêtement de surface, etc., elle doit être déclarée ;
- Les plaques d'alliage dont le volume annuel de production ou d'importation dépasse 1 tonne doivent être enregistrées ;
- Les produits contenant $\geq 0,1$ % de SVHC doivent être notifiés de manière proactive aux clients et soumis à l'ECHA (Agence européenne des produits chimiques) pour notification.

3. Stratégie de conformité

- Toujours mettre à jour la liste des SVHC publiée par l'ECHA ;
- classification de conformité des produits chimiques utilisés dans les plaques en alliage de tungstène ;
- Coopérer avec les clients en aval pour compléter les déclarations REACH ;
- Mettre en place un système de suivi pour garantir la transparence de la chaîne d'approvisionnement.

3. FDS (Fiche de données de sécurité)

1. Le rôle et le statut des FDS

La FDS (Fiche de Données de Sécurité) est un document d'information sur la sécurité chimique accepté à l'échelle internationale qui répertorie les informations sur la composition du matériau, les propriétés physiques et chimiques, les dangers, le traitement d'urgence, le transport et l'élimination, etc. Il s'agit des informations de base pour le commerce d'exportation, la gestion de la sécurité, l'utilisation par le client et la déclaration de conformité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Exigences MSDS pour les plaques en alliage de tungstène

- Les plaques en alliage de tungstène sont généralement considérées comme **des produits solides**, mais une fiche de données de sécurité est toujours requise pour référence client, en particulier en cas de contact avec de la poussière ou du liquide de coupe ;
- La fiche signalétique doit couvrir tous les éléments d'alliage, les impuretés et les informations sur les risques de traitement ;
- Doit être conforme au format SGH (Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques).

3. Éléments de contenu d'échantillon de fiche de données de sécurité (16 éléments au total)

1. Informations sur le produit et l'entreprise
2. Ingrédients
3. Identification des dangers
4. Mesures de premiers secours
5. Mesures de lutte contre l'incendie
6. Traitement d'urgence en cas de fuite
7. Exigences de manutention et de stockage
8. Contrôles de l'exposition et protection individuelle
9. Propriétés physiques et chimiques
10. Stabilité et réactivité
11. Informations toxicologiques
12. Informations écologiques
13. Méthodes d'élimination
14. Informations d'expédition
15. Informations réglementaires
16. Autres informations

Remarque : la fiche de données de sécurité doit être rédigée en anglais et des versions multilingues (telles que le chinois, l'allemand, le japonais, etc.) doivent être fournies si nécessaire.

4. Pratiques de conformité et suggestions pour les entreprises de fabrication de plaques en alliage de tungstène

Directive de conformité	de	Stratégie de réponse de l'entreprise
Sélection des matériaux	des	Évitez d'utiliser des éléments restreints ou très préoccupants et établissez un système d'examen des matières premières
Système de test		Dépistage rapide RoHS/REACH/XRF et tests ICP pendant la phase d'approvisionnement
Gestion des fichiers		Établir des fichiers de conformité MSDS, RoHS, REACH et autres et les mettre à jour régulièrement
Collaboration client		Fournir de manière proactive des déclarations de conformité, des rapports de test et des documents d'assistance technique
Certification par un tiers		Renforcez la confiance grâce à la certification d'organismes faisant autorité tels que SGS, TÜV et Intertek

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

V. Résumé

RoHS, REACH et MSDS constituent les trois principaux systèmes de conformité environnementale pour les plaques en alliage de tungstène destinées à entrer sur le marché international, notamment sur le marché européen. Ces réglementations limitent non seulement l'utilisation et l'émission de substances dangereuses dans les plaques en alliage de tungstène, mais exigent également des entreprises une plus grande responsabilité quant à la composition de leurs matériaux, à leurs caractéristiques de sécurité et à leur impact environnemental. Face à des barrières environnementales mondiales de plus en plus strictes, les fabricants de plaques en alliage de tungstène doivent mettre en place un mécanisme systématique de gestion de la conformité environnementale, renforcer les concepts de conception écologique et améliorer considérablement la compétitivité durable de leurs produits.

7.5 Systèmes de gestion de la qualité dans les domaines de l'aviation, de l'énergie nucléaire et de la médecine (AS9100, ISO 13485, etc.)

Les plaques en alliage de tungstène sont largement utilisées dans des secteurs clés tels que l'aérospatiale, l'énergie nucléaire et les équipements médicaux, en raison de leur densité élevée, de leur résistance élevée, de leur résistance aux hautes températures et aux radiations. Cependant, ces secteurs ont des exigences extrêmement strictes en matière de fiabilité, de sécurité, de traçabilité et de régularité des matériaux. Par conséquent, si les entreprises souhaitent pénétrer ces marchés haut de gamme avec des plaques en alliage de tungstène, elles doivent mettre en place et respecter scrupuleusement des systèmes de gestion de la qualité spécifiques à leur secteur, tels que les normes AS9100 (aérospatiale), ISO 13485 (dispositifs médicaux), NQA-1 (énergie nucléaire) et autres normes.

1. AS9100 : Système de gestion de la qualité aérospatiale

1. Introduction à la norme

L'AS9100 est une norme de système de gestion de la qualité spécifique au secteur aérospatial, développée par l'International Aerospace Quality Group (IAQG). Elle complète la norme ISO 9001 et répond aux exigences spécifiques des secteurs de l'aéronautique, de l'aérospatiale et de la défense. Il s'agit d'une norme mondiale commune à la chaîne d'approvisionnement d'entreprises telles que Boeing, Airbus, la NASA et Lockheed.

2. Exigences clés

- **Traçabilité des produits** : Le processus de production, la source des matières premières, les paramètres du processus et les enregistrements de test de chaque lot de plaques en alliage de tungstène doivent être traçables ;
- **Gestion des risques** : Identifier et contrôler les risques tels que les défauts de matières premières, les écarts de processus et les retards de livraison ;
- **Contrôle des modifications** : Toute modification de la conception, du processus ou des matériaux du produit doit être strictement approuvée ;
- **Capacités anti-contrefaçon et anti-interférence** : empêcher les matériaux contrefaits et de qualité inférieure de pénétrer dans le système aéronautique ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Amélioration continue et satisfaction client** : met l'accent sur la collaboration des processus et l'optimisation continue entre les fournisseurs et les clients.

3. L'importance de l'application dans les plaques en alliage de tungstène

Si des plaques en alliage de tungstène sont utilisées comme **composants tels que des structures de vol aérospatiales, des contrepoids de satellites, des éléments inertiels, etc.**, elles doivent passer le contrôle AS9100 pour prouver qu'elles répondent aux exigences complètes du domaine de l'aviation en matière de fiabilité des matériaux, de propriétés mécaniques et de cohérence.

2. ISO 13485 : Système de gestion de la qualité des dispositifs médicaux

1. Introduction à la norme

La norme ISO 13485 est une norme internationale de gestion de la qualité développée pour les dispositifs médicaux. Elle s'applique à toutes les entreprises impliquées dans la conception, la production, l'installation et la maintenance de dispositifs médicaux, avec une attention particulière portée à **la sécurité des produits, à la conformité réglementaire et à la maîtrise des risques**.

2. Contenu principal

- **Cohérence réglementaire** : exiger que les produits soient conformes aux réglementations médicales en vigueur sur différents marchés à travers le monde (comme le MDR de l'UE, la FDA américaine, etc.) ;
- **Contrôle de l'hygiène et prévention de la pollution** : Les matières premières, les produits semi-finis et les produits finis doivent éviter toute contamination biologique ou infection croisée ;
- **Évaluation de la biocompatibilité** : Si des plaques en alliage de tungstène sont utilisées pour **la protection des équipements de radiothérapie, des composants des appareils d'imagerie**, etc., leur sécurité de contact avec l'environnement humain doit être évaluée ;
- **Gestion des dossiers et des documents** : Établir des dossiers de qualité détaillés, des informations de traçabilité et un mécanisme de traitement des réclamations des clients ;
- **Gestion des risques** : couvrant la conception, la production, le stockage et le recyclage du cycle de vie du produit.

3. Scénarios d'application

Les plaques d'alliage utilisées **dans les composants de protection des accélérateurs médicaux, le blindage contre les rayons X, les dispositifs de transport de médecine nucléaire**, etc. doivent établir des processus de contrôle de la production et d'examen de la qualité basés sur la norme ISO 13485.

3. NQA-1 / ASME / RCC-M : Exigences de qualité pour l'industrie de l'énergie nucléaire

1. Aperçu des normes de l'industrie de l'énergie nucléaire

- **NQA-1 (Nuclear Quality Assurance)** : Développée par l'ASME (American Society of Mechanical Engineers), c'est la norme d'assurance qualité pour les installations nucléaires et l'approvisionnement en matériaux de qualité nucléaire ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ASME Sec III** : Normes techniques pour la conception, la fabrication et l'inspection des équipements et matériaux des systèmes d'énergie nucléaire ;
- **RCC-M (Code français de conception et de fabrication des structures d'îlots nucléaires)** : Utilisé pour l'évaluation matérielle et structurelle des projets nucléaires européens.

2. Application et exigences de qualité des plaques en alliage de tungstène

Les plaques en alliage de tungstène sont couramment utilisées dans le domaine de l'énergie nucléaire :

- Structure de blindage du cœur de l'énergie nucléaire ;
- barres de contrôle et composants d'absorbeurs de neutrons ;
- Conteneurs pour le transport et le stockage de matières radioactives.

3. Facteurs clés du contrôle de la qualité

Dimension de contrôle	de	Description de la demande
Composition matériau	du	Limiter strictement les impuretés radioactives et les substances activées par les neutrons (telles que le bore, le cobalt, etc.)
Propriétés mécaniques		Répond aux exigences de résistance à haute température et de résistance au fluage dans un environnement d'irradiation
Essais destructifs	non	Toutes les plaques en alliage de tungstène doivent subir des tests non destructifs complets tels que UT, RT et poudre magnétique
Intégrité fichiers	des	Les dossiers de qualité traçables et les rapports d'évaluation par des tiers doivent être conservés pendant plus de 20 ans

IV. Suggestions de pratiques d'intégration et de certification des systèmes

Nom du système	Zones applicables	Pratiques recommandées
AS9100	Aérospatial	Établir un processus de documentation professionnel et un système de contrôle des modifications techniques
ISO 13485	Dispositifs médicaux	Optimiser les contrôles de nettoyage, la validation de la chaîne d'approvisionnement et les évaluations de biosécurité
NQA-1 / ASME	Ingénierie de l'énergie nucléaire	Renforcer le système d'enregistrement de la qualité et accepter l'autorisation, la certification et la supervision de tiers

Les entreprises peuvent parvenir à une intégration standard et à une optimisation des coûts grâce au ****Système de gestion intégré (IMS)****, par exemple en utilisant la norme ISO 9001 comme cadre général et en ajoutant des modules AS9100 ou ISO 13485 pour améliorer l'efficacité de la gestion.

V. Résumé

Les plaques en alliage de tungstène utilisées dans les secteurs de l'aviation, de l'énergie nucléaire et des soins médicaux s'appuient sur un système complet et rigoureux de gestion de la qualité, couvrant la conception, les matériaux, la fabrication et le service après-vente. Les normes telles

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que AS9100, ISO 13485 et NQA-1 sont non seulement un gage de qualité, mais aussi un atout majeur pour l'internationalisation. Si l'industrie chinoise des alliages de tungstène souhaite atteindre le haut de gamme et s'internationaliser, elle doit commencer par la construction d'un système complet d'assurance qualité, conforme aux normes techniques mondiales.



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

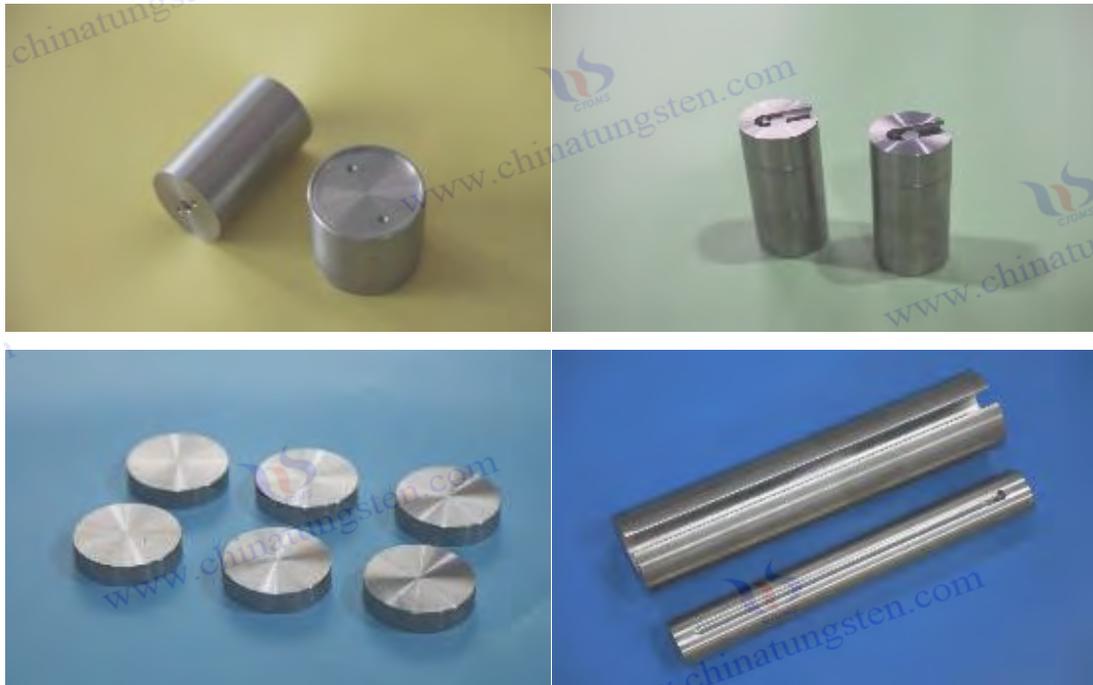
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

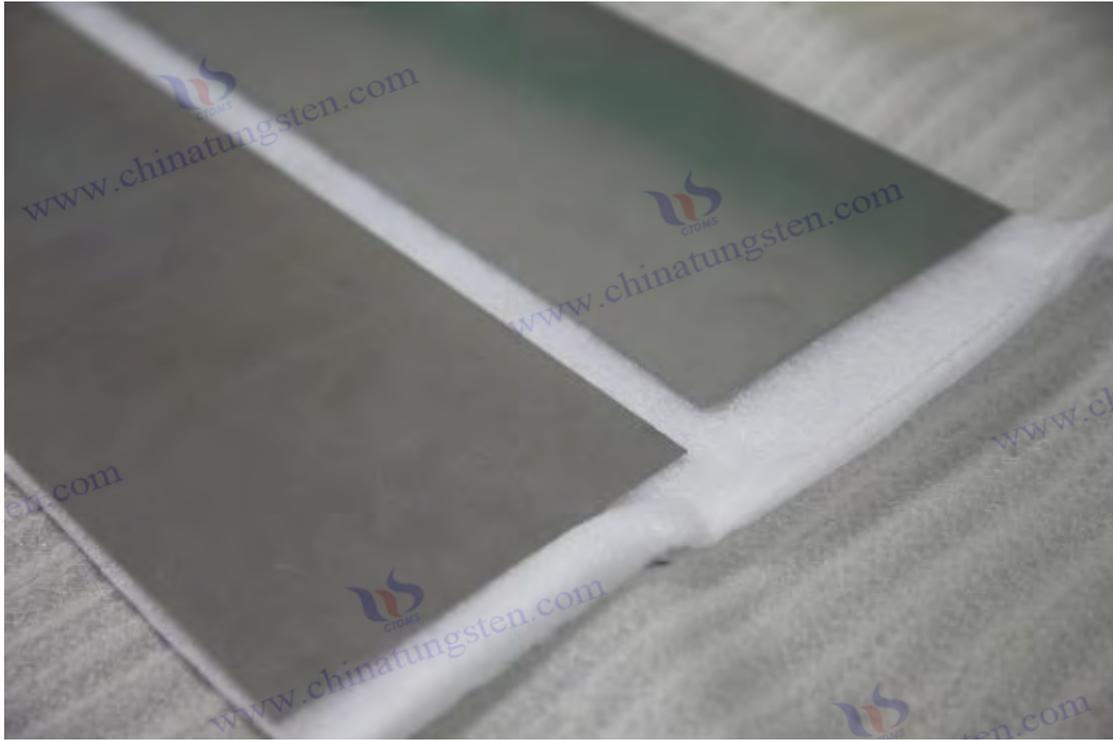
Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 8 Emballage, stockage et transport des plaques d'alliage de tungstène

8.1 Matériaux et formes d'emballage (emballage sous vide, déshydratant, emballage en barquette)

Les plaques en alliage de tungstène présentent une densité élevée, une forte valeur ajoutée et des exigences de qualité de surface et de précision extrêmement élevées. Après la production et les tests, l'emballage est non seulement une simple étape logistique, mais aussi un moyen important de garantir la stabilité de la qualité et l'intégrité de l'apparence pendant le transport, le stockage et la livraison. Un choix judicieux des matériaux d'emballage, des formes d'emballage scientifiques et une isolation efficace des facteurs environnementaux sont essentiels pour garantir que les plaques en alliage de tungstène ne subissent ni oxydation, ni corrosion, ni dommages mécaniques, ni déformation, ni autres problèmes pendant le transport.

1. Principes de base et objectifs de l'emballage

L'emballage des plaques en alliage de tungstène doit suivre les principes de base suivants :

- **Anti-oxydation, résistant à l'humidité, à la poussière et aux chocs mécaniques ;**
- **Facile à transporter, à empiler et à transporter ;**
- **Se conformer aux exigences réglementaires internationales en matière de commerce et de douanes ;**
- **Identification claire et traçabilité forte ;**
- **Les matériaux verts, respectueux de l'environnement et recyclables sont privilégiés .**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'emballage ne répond pas seulement aux besoins logistiques, mais doit également être inclus dans la gestion de l'ensemble du processus de production dans le cadre du système de contrôle de la qualité de livraison des produits.

2. Matériaux d'emballage couramment utilisés et leurs fonctions

Type de matériau	Fonction principale	Notes d'application
Film de polyéthylène (PE)	Résistant à l'humidité et à la poussière	Utilisé pour recouvrir la surface des plaques de tungstène afin d'empêcher l'oxydation et l'adhérence des particules
Film composite aluminium-plastique sous vide	Résistant à l'humidité et à l'oxydation	Emballage sous vide de plaques en alliage de tungstène pour le stockage à long terme ou l'exportation
Joint en mousse/coton perlé EPE	Amorti et antichoc	Placer dans l'espace entre les plaques pour éviter les frottements ou la casse
Déshydratant (gel de silice/tamis moléculaire)	Absorption d'humidité et déshumidification	Placer dans un emballage scellé pour maintenir un environnement sec
Palettes en bois (fumigation ou sans fumigation)	Support et manipulation	Transport de produits finis en alliage de tungstène, pratique pour le chargement et le déchargement par chariot élévateur et l'expédition par conteneur
Ruban d'étanchéité/film étirable	Structure d'emballage extérieure fixe	Empêcher le glissement des feuilles et la fissuration de l'emballage

3. Forme d'emballage typique d'une plaque en alliage de tungstène

1. Emballage sous vide

Convient pour le stockage à long terme, le transport à l'exportation ou lorsque les clients ont des exigences extrêmement élevées en matière de qualité de surface.

- Utilisez un film composite aluminium-plastique pour sceller une ou plusieurs plaques de tungstène dans un sac ;
- Mettre dans un dessiccant (généralement du gel de silice, un tamis moléculaire ou du charbon actif) avant de sceller ;
- Évacuer jusqu'à plus de -0,08 MPa et thermosceller ;
- Peut être utilisé avec un gaz de remplacement (comme l'azote) pour améliorer la résistance à la corrosion ;
- L'extérieur est protégé par des cartons durs ou des caisses en bois pour éviter toute collision générale.

Avantages : Isole efficacement l'air et l'humidité et prolonge la durée de conservation de la surface brillante de la plaque de tungstène.

2. Emballage empilé (tampon inter-cartes + scellage plastique)

- Placez de la mousse ou du coton perlé de 1 à 2 mm d'épaisseur entre chaque plaque en alliage de tungstène ;
- L'ensemble de la pile est enveloppé d'un film étirable PE ou d'un film plastique composite ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Si les conditions le permettent, ajouter du carton pour renforcer la protection de la surface du panneau ;
- Convient aux panneaux passivés ou au transport à court terme.

Avantages : tampon puissant, fonctionnement pratique, faible coût, adapté à la distribution domestique.

3. Emballage sur palette et emballage en caisses en bois

Utilisé pour les expéditions en vrac, particulièrement adapté aux conditions d'exportation et de fret maritime.

- L'ensemble de la planche est placé sur une palette en bois (elle doit être fixée avec du ruban de cerclage) ;
- Protection supplémentaire de caisse en bois ou de caisse latérale en acier ;
- Une palette à haute capacité de charge ou une structure renforcée doit être sélectionnée en fonction du poids ;
- Il doit y avoir des trous pour chariot élévateur au bas de la palette pour faciliter le chargement et le déchargement.

Le bois d'emballage d'exportation doit être conforme aux **normes phytosanitaires internationales NIMP 15** et utiliser des matériaux traités thermiquement ou sans fumigation.

4. Identification des emballages et gestion des étiquettes

La gestion scientifique des étiquettes d'emballage est non seulement un élément de la gestion de la qualité, mais aussi un moyen important de prévenir les erreurs logistiques et les confusions d'identification des clients. Elle doit inclure les informations de base suivantes :

- **Nom du produit, spécification, modèle, quantité, numéro de lot ;**
- **Poids net, poids brut, dimensions, date d'emballage ;**
- **Nom et coordonnées du fabricant ;**
- **Marquage de conformité** : tel que RoHS, REACH, numéro MSDS ;
- **Panneaux de transport** : icônes telles que résistant à l'humidité, résistant à la pression, vers le haut et centre de gravité ;
- **Informations de personnalisation du client** (telles que le numéro de projet, le numéro de commande, etc.).

Les systèmes de codes-barres ou de codes QR peuvent être utilisés pour soutenir une gestion intelligente de la traçabilité.

5. Exigences d'emballage spéciales et services personnalisés

Dans les commandes personnalisées haut de gamme, certains clients (tels que les agences d'énergie nucléaire, les sociétés aérospatiales et les instituts de recherche scientifique) mettront en avant les exigences d'emballage spéciales suivantes :

- **Emballage propre** : l'emballage sous vide est réalisé dans une salle blanche de classe 1000 ;
- **Protection sous vide par sac métallique multicouche** : empêche les matériaux de protection radioactifs de pénétrer ou d'absorber l'humidité ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Emballage antistatique** : utilisé pour les plaques en alliage de tungstène pour équipements électroniques ;
- **Solution d'emballage combinée** : différentes tailles d'emballages classés, structure fixe du tube à manchon.

une base de données de solutions d'emballage standard et un mécanisme de réponse d'emballage personnalisé en fonction des besoins des clients.

VI. Résumé

L'utilisation de plaques en alliage de tungstène est non seulement liée à l'apparence et à la sécurité du produit, mais aussi à la stabilité de la qualité des matériaux et à la satisfaction client pendant le transport. Le choix de matériaux d'emballage, de formes structurelles et de systèmes de gestion d'étiquetage adaptés, ainsi que l'intégration de designs différenciés aux spécificités sectorielles des clients, permettent de réduire efficacement les risques liés au transport et d'améliorer l'image de marque et les capacités d'exportation. À mesure que l'accès aux marchés internationaux s'améliore, l'emballage écologique, l'identification intelligente et les systèmes de palettes standardisés deviendront des axes importants pour le développement des emballages en plaques en alliage de tungstène.

8.2 Exigences relatives à l'environnement de stockage et mesures anti-oxydation et anti-humidité

Matériau de haute densité, de haute précision et à forte valeur ajoutée, les plaques d'alliage de tungstène sont sujettes à **l'oxydation de surface, aux points de corrosion, à la dilatation dimensionnelle ou aux défauts d'emballage en raison de l'humidité ambiante, de l'exposition à l'oxygène, de la pollution par la poussière ou des variations de température si elles ne sont pas correctement gérées pendant le stockage post-production**, ce qui affecte gravement leur disponibilité et la satisfaction client. Il est donc essentiel d'établir des normes d'environnement de stockage scientifiques et normalisées, ainsi que des mesures pratiques de protection contre l'humidité et l'oxydation, afin de garantir la qualité et la sécurité des plaques d'alliage de tungstène, que ce soit à court ou à long terme.

1. Exigences de base pour l'environnement de stockage

les plaques en alliage de tungstène doivent répondre aux indicateurs de contrôle suivants :

Facteurs de contrôle	Gamme recommandée	illustrer
température	5°C~30°C	Évitez les fluctuations brusques de température, la condensation ou la dilatation thermique
humidité relative	≤ 50 % HR	Une humidité relative trop élevée accélérera l'oxydation de la surface du tungstène et la corrosion par l'hydrogène.
propreté de l'air	Environnement sans poussière ou à faible teneur en poussière (classe ISO 8 ou supérieure)	Empêche les particules de poussière d'adhérer, évite les rayures mécaniques et la pollution conductrice

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lumière directe du soleil	éviter	L'exposition aux UV peut provoquer une décoloration de la surface ou un vieillissement du matériau
Gaz corrosif	Interdit (tels que NH ₃ , Cl ₂ , H ₂ S, etc.)	Les gaz contenant du soufre et du chlore réagissent lentement avec le tungstène
Débit d'air	Bonne ventilation mais pas de ventilations fortes	Gardez l'air sec et évitez l'accumulation d'humidité

Si l'entreprise dispose des conditions nécessaires, elle peut mettre en place un entrepôt à température et humidité constantes ou un entrepôt propre pour réaliser une gestion de stockage précise et à long terme des plaques d'alliage de tungstène haut de gamme.

2. Technologies et mesures anti-oxydation courantes

Bien que le tungstène lui-même présente une bonne stabilité chimique, les plaques d'alliage de tungstène (en particulier les alliages contenant des métaux liants tels que le Ni et le Cu) peuvent néanmoins subir une légère oxydation ou corrosion électrochimique **dans des environnements humides ou riches en oxygène. Par conséquent, les mesures suivantes doivent être prises pour améliorer la résistance à l'oxydation :**

1. Traitement de passivation de surface

- Après le décapage, le lavage alcalin ou le lavage neutre de la plaque d'alliage de tungstène, utilisez un agent passivant pour la traiter ;
- Il peut former un film protecteur dense sur la surface pour inhiber la réaction entre l'oxygène et l'eau ;
- Les passivants courants comprennent l'acide citrique, les chromates, les phosphates, etc.
- Il est particulièrement adapté au traitement des produits finis avant de quitter l'usine pour améliorer la stabilité au stockage.

2. Scellage sous vide ou à l'azote

- Sceller sous vide ou remplir d'azote la plaque d'alliage de tungstène finie pour empêcher l'intrusion d'oxygène et de vapeur d'eau ;
- Convient aux plaques avec des exigences extrêmement élevées en matière de lissé et d'état de surface ;
- Il est généralement utilisé avec des sacs composites aluminium-plastique et des films à haute barrière.

3. Méthode de revêtement par micro-huile (huile scellée)

- Appliquez légèrement de l'huile d'étanchéité neutre sur la surface de la carte pour former une couche d'isolation physique ;
- Peut isoler efficacement le contact direct avec l'oxygène, la vapeur d'eau et le sulfure dans l'air ;
- Il peut être nettoyé avec de l'alcool ou de l'eau alcaline avant utilisation ;
- Couramment utilisé pour le stockage à moyen et long terme de plaques de tungstène de qualité industrielle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Mesures de contrôle de l'humidité et gestion de l'humidité

Si les plaques d'alliage de tungstène sont stockées dans un environnement humide, leur surface risque de noircir en raison de l'adsorption de vapeur d'eau et de l'oxydation lente, voire de la corrosion intergranulaire. Des mesures de protection contre l'humidité doivent être mises en œuvre simultanément dans trois domaines : l'emballage, les équipements de stockage et le contrôle environnemental.

1. Ajouter un déshydratant dans le processus d'emballage

- Utiliser des matériaux de séchage tels que des packs de gel de silice et des adsorbants minéraux activés ;
- Le déshydratant doit être placé dans un sac sous vide ou une boîte scellée ;
- Vérifiez régulièrement le dessiccant pour voir s'il est saturé et remplacez-le si nécessaire.

2. Utilisez un déshumidificateur/climatiseur à humidité constante pour contrôler l'humidité dans l'entrepôt

- zone de stockage pour plaques en alliage de tungstène ;
- Un fonctionnement 24 heures sur 24 est particulièrement nécessaire pendant la saison des pluies ou dans un climat pluvieux ;
- Le maintien d'une HR $\leq 50\%$ est particulièrement important pour les plaques en alliage de tungstène à surface brillante.

3. Espace de rangement surélevé/coussin étanche à l'humidité

- Les plaques en alliage de tungstène doivent **éviter tout contact direct avec le sol** ou le mur ;
- Utilisez des palettes, des étagères et des structures à ossature en bois pour le support, avec des cloisons étanches à l'humidité en bas ;
- Empêchez l'humidité et la condensation d'affecter la plaque de tungstène.

4. Stratégie de stockage à plusieurs niveaux et contrôle du cycle

Selon les différentes utilisations et périodes de stockage des plaques d'alliage de tungstène, une stratégie de gestion hiérarchique doit être formulée :

Classification	Utilisations typiques	Méthode de stockage recommandée	Durée de conservation recommandée
Panneau de haute pureté	Médical, énergie nucléaire, appareils électroniques	Joint sous vide + dessiccant + chambre à humidité constante	12-18 mois
Carte industrielle standard	Moules et structures mécaniques	Revêtement PE + étuve de séchage	6-12 mois
Tableau de rotation temporaire	Pour le traitement interne	Emballage ordinaire, stockage à court terme	≤ 3 mois

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les plaques à cycle long doivent être régulièrement inspectées pour vérifier l'état de surface et la stabilité dimensionnelle afin de garantir qu'elles répondent toujours aux exigences de performance avant utilisation.

V. Résumé

La gestion des plaques en alliage de tungstène est une tâche systématique. Il est nécessaire non seulement de prêter attention aux propriétés physiques du matériau et à la sensibilité de la composition de l'alliage à l'environnement, mais aussi d'élaborer une stratégie de résistance à l'humidité et à l'oxydation offrant une forte adaptabilité et une grande opérabilité, en tenant compte des installations de stockage, des conditions climatiques et des cycles d'utilisation. Face à l'amélioration constante des normes mondiales de stockage et de transport des matériaux haute performance, les entreprises doivent impérativement mettre en place un **mécanisme complet d'évaluation des risques liés au stockage et un système de suivi de la qualité des stocks** afin de garantir la stabilité, la fiabilité et la régularité des plaques en alliage de tungstène tout au long de la chaîne d'approvisionnement.

8.3 Précautions et réglementations relatives au transport national et international

En tant que matériau métallique à forte densité, résistant à la corrosion et à forte valeur ajoutée, le transport des plaques d'alliage de tungstène est non seulement lié à la sécurité physique et aux pertes économiques, mais aussi aux délais de livraison, à la gestion de la conformité internationale et à la réputation de la marque. En particulier dans des contextes complexes tels que le commerce transfrontalier, le transport aérien et le transport maritime par conteneurs, l'absence de standardisation des méthodes de transport ou des processus de déclaration peut engendrer des problèmes tels que la détérioration des plaques, la rouille, les fausses déclarations, voire les retours. Il est donc essentiel que les fournisseurs de matériaux, le personnel du commerce extérieur et les responsables de l'entreposage et de la logistique maîtrisent les précautions clés et les exigences réglementaires lors du transport des plaques d'alliage de tungstène, en Chine comme à l'étranger.

1. Défis et risques fondamentaux du transport des plaques d'alliage de tungstène

Les plaques en alliage de tungstène sont principalement confrontées aux problèmes suivants lors du transport :

- **Déformation et détérioration sous charge de forte densité** : La densité d'une plaque en alliage de tungstène peut atteindre 17 à 19 g/cm³. Si le support est instable pendant un transport prolongé, il est très facile de le comprimer, de le plier et de l'endommager aux angles.
- **Rayures et abrasions de surface causées par les vibrations et les chocs** : Un mauvais emballage dans les camions et les cabines de navires peut provoquer le frottement des plaques les unes contre les autres ou contre le métal de la palette ;
- **Oxydation, condensation ou dilatation hygroscopique provoquées par des changements de température et d'humidité** : notamment lors du transport à travers des zones climatiques sans protection de séchage ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Les déclarations d'exportation incomplètes entraînent des retards de dédouanement ou des retours** : les douanes exercent une gestion stricte sur les produits métalliques rares, et les déclarations irrégulières sont sujettes à détention ;
- **Différences dans les réglementations applicables en matière de sécurité des transports et d'environnement** : Par exemple, certains pays européens et américains classent certains alliages de tungstène comme matériaux stratégiques ou militaires sensibles, qui nécessitent une autorisation spéciale.

2. Précautions relatives au transport intérieur

plaques d'alliage de tungstène par voie terrestre ou aérienne en Chine, les points suivants doivent être notés :

1. Stabilité de l'emballage et contrôle de l'empilage

- Les palettes doivent être fabriquées en bois massif ou en plastique avec une capacité de charge élevée et une plaque de fond uniforme ;
- plaques en alliage de tungstène et utilisation de protections d'angle aux quatre coins ;
- Utilisez des sangles en nylon, du film rétractable ou des sangles en acier pour éviter que l'ensemble du colis ne glisse ;
- d'autres objets lourds sur la plaque de tungstène pour éviter la compression et la déformation.

2. Sélection du mode de transport et évaluation de l'itinéraire

- Pour les plaques de tungstène de grande valeur ou de précision, il est recommandé de privilégier la **livraison par véhicule spécial, par avion express** ou par **des canaux logistiques à faible vibration** ;
- Lors d'un transport sur de longues distances, évitez les zones à risque telles que les saisons à haute température et à forte humidité, les longues vacances concentrées et les routes cahoteuses dans les zones montagneuses ;
- Nous pouvons coopérer avec des sociétés de logistique de métaux professionnelles tierces expérimentées, telles que SF Express Large Cargo, Deppon Heavy Cargo et Sinotrans Logistics.

3. Étiquetage et instructions de manipulation clairs

- L'extérieur de l'emballage doit être imprimé avec des icônes telles que « Veuillez soulever des objets lourds », « Résistant à l'humidité » et « Ne pas retourner » ;
- Si le poids total de la palette dépasse 500 kg, elle doit être déplacée par chariot élévateur ou grue. Le déchargement forcé manuel est strictement interdit.

III. Normes internationales de transport et gestion de la conformité

1. Méthodes courantes de transport à l'exportation

Mode de transport	Scénarios applicables	Caractéristiques
Fret maritime (FCL/LCL)	Exportations à grande échelle	Le cycle de transport est long et un traitement anti-humidité est nécessaire
Fret aérien (DHL, FedEx, SF Express)	Commande urgente, plaque lumineuse	Coût élevé, certification aéronautique requise
Chemin de fer/Express	Économique et pratique pour	La vitesse est moyenne et le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chine-Europe	l'exportation vers l'Europe	dédouanement est requis
Express international (UPS, etc.)	Échantillons de petits lots	Déclaration douanière pratique, taille et poids limités

2. Normes de déclaration en douane et classification des codes

Les plaques en alliage de tungstène sont généralement classées dans le code douanier chinois (code SH) comme suit :

- **8101.99.10** : Plaques et feuilles en alliage de tungstène (non traitées ou prétraitées)
- **8101.99.90** : Autres produits en tungstène (préciser la teneur en alliage et l'usage)

Les documents requis pour l'exportation comprennent :

- Facture du produit et liste de colisage ;
- Certificat d'origine (par exemple produits chinois exportés vers les pays membres de l'UE ou du RCEP) ;
- Confirmation du code douanier et description normalisée du nom de la marchandise ;
- Si des utilisations militaires, nucléaires ou de haute technologie sont impliquées, **une licence d'exportation ou une déclaration d'utilisation finale peut être requise** .

3. Notes sur les conteneurs d'expédition

- Essayez d'utiliser des armoires lourdes de 20 pieds (20GP) pour charger les plaques d'alliage de tungstène et évitez de les empiler et de les mélanger dans des boîtes en bois ordinaires ;
- Un espace tampon doit être réservé entre chaque palette de plaques pour éviter les collisions lors du transport longue distance ;
- Installez des packs déshydratants et des tapis anti-humidité pour garantir que l'humidité relative à l'intérieur du conteneur est inférieure à 60 % ;
- Des étiquettes telles que « Produit en métal lourd à haute densité » et « Emplacement du point de levage » doivent être apposées à l'extérieur de la porte de l'armoire.

4. Certification internationale et conformité en matière de sécurité des transports

Si le produit est exporté vers l'Europe, l'Amérique, le Japon, la Corée du Sud et d'autres régions ayant des exigences élevées, les conditions de conformité de transport suivantes doivent être respectées :

- **Fiche de données de sécurité MSDS** : doit indiquer les propriétés physiques et chimiques de l'alliage de tungstène et les recommandations de transport et de stockage ;
- **RoHS / REACH Description** : Certifie que le produit ne contient pas de métaux lourds nocifs ni de polluants organiques ;
- **Déclaration des réglementations applicables au transport (marchandises non dangereuses)** : La plupart des plaques d'alliage de tungstène ne sont pas classées comme marchandises dangereuses, mais une déclaration de stabilité du matériau est requise pour faciliter le dédouanement ;
- **Marque d'emballage ONU ou description de pièce non ONU** : comme requis pour indiquer que l'article transporté ne contient pas d'articles figurant sur la liste des marchandises dangereuses des Nations Unies.

IV. Mécanisme de prévention et d'assurance des accidents de transport

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

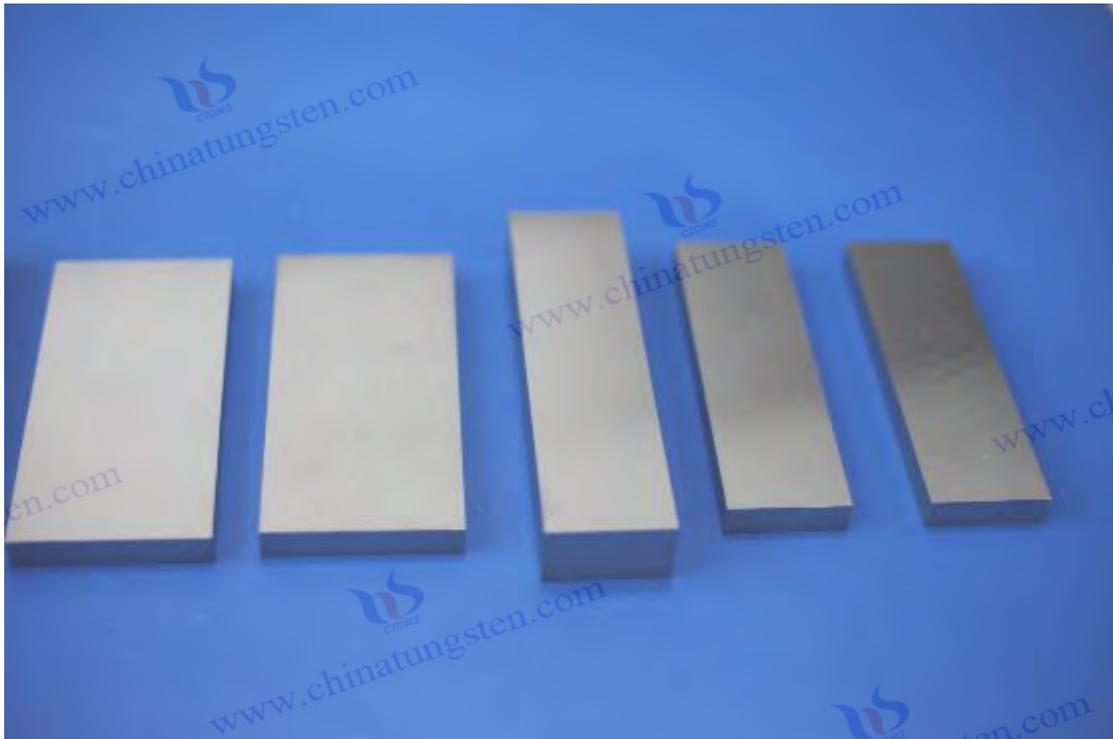
Les plaques d'alliage de tungstène endommagées, perdues ou livrées par erreur pendant le transport entraînent souvent des pertes économiques importantes. Il est donc recommandé de mettre en place un mécanisme de gestion des risques :

- **Prendre des photos et les archiver avant de quitter l'usine** : enregistrer l'état du produit fini comme base pour les réclamations logistiques ;
- **Assurance transport complète** : Vous pouvez choisir une « assurance transport à valeur totale » pour couvrir les pertes, les dommages, les retards de livraison, etc.
- **Accord de coopération logistique** : Signer un contrat avec l'entreprise de transport pour définir clairement les limites des responsabilités et éviter toute ambiguïté dans les responsabilités ;
- **Utilisez le système de suivi logistique GPS** : suivi en temps réel des itinéraires de transport pour les commandes clés.

V. Résumé

Les plaques en alliage de tungstène constituent l'un des maillons de la chaîne d'approvisionnement les plus sensibles aux impacts environnementaux et de gestion. Du niveau national à l'international, des méthodes d'emballage aux processus de déclaration, une coordination multidimensionnelle est nécessaire pour garantir la sécurité, la conformité et l'efficacité de la production en termes de physique, de réglementation et d'expérience client. Pour les entreprises exportatrices, la mise en place d'un système de normes de transport éprouvé, d'une bibliothèque de modèles de déclarations douanières et d'un mécanisme de gestion des risques logistiques renforcera considérablement la confiance des clients et les capacités de livraison sur le marché.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 9 Structure industrielle et tendance du marché des plaques en alliage de tungstène

9.1 État des ressources mondiales en tungstène et chaîne de traitement des plaques

Le tungstène est un métal rare stratégique. Il est largement utilisé dans des secteurs clés tels que la défense nationale, l'aérospatiale, l'énergie nucléaire, l'électronique et les soins médicaux en raison de son point de fusion élevé, de sa densité élevée, de sa dureté élevée et de ses excellentes propriétés thermiques, électriques et mécaniques. Les plaques d'alliage de tungstène sont un élément important des produits de traitement en profondeur du tungstène et un intermédiaire clé pour obtenir des applications structurelles et fonctionnelles de haute performance. Le développement de sa chaîne industrielle est étroitement lié à la répartition mondiale des ressources en tungstène.

1. Répartition mondiale des ressources en tungstène et structure des réserves

Selon les statistiques 2024 de l'United States Geological Survey (USGS), les réserves mondiales prouvées de tungstène s'élèvent à environ 3,5 millions de tonnes de métal, avec une distribution montrant **une concentration régionale et des caractéristiques nationales** :

Pays/Région	Réserves de minerai de tungstène (10 000 tonnes)	Part mondiale	Principales zones minières
Chine	190	Environ 54%	Dayu, Jiangxi, Shizhuyuan, Hunan, Luanchuan, Henan
Russie	120	Environ 34%	région du Transbaïkal, Extrême-Orient

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Vietnam	9	< 3%	Mine Percy
Bolivie	5	< 2%	Province d'Oruro
Autres pays (Portugal, Autriche, Corée du Sud, etc.)	Moins de 5%	Plus dispersé	—

La Chine est le premier propriétaire et producteur mondial de ressources en tungstène . Elle contrôle non seulement plus de la moitié des ressources minérales, mais domine également plus de 70 % des exportations mondiales de tungstène et des capacités de transformation primaire, et exerce une influence majeure sur la chaîne industrielle mondiale du tungstène.

2. Processus d'extraction et de fusion primaire des ressources en minerai de tungstène

Le tungstène se trouve principalement dans les minéraux de tungstate, notamment la wolframite (teneur élevée en WO_3), la scheelite et la tungsténite. Le procédé d'extraction industrielle est le suivant :

- Exploitation minière et traitement du minerai :** L'exploitation minière souterraine et l'exploitation minière à ciel ouvert sont utilisées pour obtenir un concentré de tungstène à haute teneur par séparation par gravité, flottation et séparation électromagnétique ;
- Conversion chimique :** Le concentré de tungstène est converti en **paratungstate d'ammonium (APT) ou en tungstate de sodium** par décomposition alcaline, précipitation acide et cristallisation.
- Fusion par réduction :** l'APT est réduit avec de l'hydrogène pour produire de la poudre de tungstène de haute pureté ;
- Préparation de poudre pour traitement en profondeur :** La poudre de tungstène est classée par granulométrie et utilisée pour le pressage par métallurgie des poudres ou la coulée à haute température ;

Ce procédé constitue **la base de ressources en amont pour la fabrication de plaques en alliage de tungstène .**

3. Structure de la chaîne de production des plaques en alliage de tungstène

Les plaques en alliage de tungstène se composent de « ressources minérales → purification métallurgique → conception d'alliage → formage de plaques → traitement de surface → intégration d'applications », qui peuvent être divisées selon les liens suivants :

1. Matières premières

- Y compris l'APT, la poudre de tungstène métallique, la poudre d'alliage tungstène-nickel-fer, la poudre d'alliage tungstène-cuivre, etc.
- Cela nécessite une grande pureté, une taille de particules contrôlable et une bonne uniformité de distribution.

2. Alliage et pressage

- molybdène et autres métaux de liaison en proportion ;
- La dalle est formée par moulage par compression ou pressage isostatique.

3. Frittage et traitement thermique

- Frittage à haute température (1300~1600°C) sous hydrogène ou atmosphère inerte ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les processus de traitement secondaires ultérieurs comprennent le laminage à chaud, le pressage isostatique à chaud, le traitement sous vide, etc.

4. Finition de surface des plaques et optimisation des performances

- Y compris le polissage, le décapage, la galvanoplastie, le dépôt physique en phase vapeur (PVD), etc.
- Pour améliorer la finition de surface, la conductivité thermique, la résistance à l'oxydation et d'autres propriétés.

5. Applications intégrées en aval

- Pièces structurelles aérospatiales, blindages de radioprotection, masques de radiothérapie, pièces structurelles de four à vide à haute température, composants de refroidissement électroniques et autres domaines.

4. Caractéristiques de la division de la chaîne industrielle mondiale des plaques en alliage de tungstène

Les plaques en alliage de tungstène reflètent les caractéristiques évidentes de **la division mondiale du travail et de la coordination régionale** :

- **Chine** : Elle possède la chaîne industrielle du tungstène la plus complète, comprenant l'exploitation minière, la fusion, l'alliage et le formage de plaques, et constitue la principale source d'approvisionnement mondiale ;
- **Pays européens et américains** : ils sont performants dans les applications à forte valeur ajoutée, la technologie militaire et les systèmes de test normalisés. Certaines plaques spéciales en alliage de tungstène sont importées ou traitées sur mesure.
- **Japon et Corée du Sud** : Spécialisé dans le traitement de précision des alliages de tungstène, le traitement thermique sous vide et les technologies de revêtement de surface. Nos produits sont utilisés dans les secteurs de l'électronique haut de gamme et de la médecine.
- **Pays en développement** (comme le Vietnam et la Bolivie) : riches en ressources mais faibles en capacités de transformation, servant principalement de destinations d'exportation de matières premières.

V. Résumé

Les ressources en tungstène déterminent le niveau élevé et le contenu technologique de l'industrie des plaques d'alliage de tungstène. En tant que premier pays producteur et centre de transformation de tungstène au monde, la Chine bénéficie d'avantages sur toute la chaîne, de la mine à la plaque. Cependant, elle est également confrontée à de multiples défis, tels que **la modernisation des normes techniques, la diversification de la demande en aval et l'intensification de la concurrence internationale**. Dans ce contexte, la construction d'un système de traitement des plaques de tungstène écologique, efficace et à forte valeur ajoutée, ainsi que l'expansion du marché international haut de gamme, constitueront les axes principaux du développement futur.

9.2 Analyse de la capacité du marché des plaques en alliage de tungstène et de la croissance future

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Produits de traitement en profondeur du tungstène, les plaques en alliage de tungstène occupent une place incontournable dans de nombreux secteurs haut de gamme grâce à leurs excellentes propriétés physiques et chimiques. Ces dernières années, sous l'impulsion de l'industrie manufacturière mondiale haut de gamme, de l'industrie militaire et de la stratégie de sécurité énergétique, ainsi que de la croissance de la demande sur les marchés émergents tels que le médical et l'électronique, le marché des plaques en alliage de tungstène a connu une expansion constante. Cette section analyse la capacité de production, la structure de la demande, les moteurs de croissance du marché et les tendances futures du développement des plaques en alliage de tungstène, tant sur le marché mondial que sur le marché chinois.

1. Aperçu du marché mondial des plaques en alliage de tungstène

Selon les données de l'International Tungsten Industry Association (ITIA) et de plusieurs instituts d'études de marché, d'ici 2024, la capacité du marché mondial des plaques en alliage de tungstène sera d'environ **1,4 à 1,6 milliard de dollars américains**, avec un taux de croissance annuel composé moyen de **6 % à 8 %**, et présentera les caractéristiques suivantes :

1. Structure de marché diversifiée

Les plaques en alliage de tungstène sont largement utilisées dans de nombreux domaines, notamment la défense nationale, l'aérospatiale, l'énergie, le traitement médical, la fabrication mécanique et l'électronique de précision.

Industrie	Proportion (estimée en 2024)
Aérospatiale et militaire	30%
L'énergie nucléaire et les nouvelles énergies	20%
Rayonnement médical et protection	15%
Métallurgie à haute température et fabrication d'équipements	10%
Semi-conducteurs et emballage électronique	15%
Autres (moisissures, recherche scientifique, etc.)	10%

En particulier dans **les plaques de protection contre les radiations, les plaques de structure de dissipation thermique et les composants de champ thermique à haute température**, les plaques en alliage de tungstène présentent des avantages qui ne peuvent pas être remplacés par des matériaux traditionnels tels que le plomb, l'acier et le cuivre.

2. La proportion de produits à haute valeur ajoutée a augmenté

Les domaines d'application tendant à devenir plus précis et fonctionnels, la demande du marché en plaques d'alliage de tungstène de haute pureté, haute résistance et haute densité ne cesse de croître. La proportion de produits incluant des plaques nanostructurées, des matériaux à gradient fonctionnel et des plaques composites revêtues augmente d'année en année.

2. Tendances de développement du marché des plaques en alliage de tungstène en Chine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En tant que première ressource et premier producteur mondial de tungstène, l'industrie chinoise des plaques en alliage de tungstène s'est transformée au cours de la dernière décennie, passant d'une industrie d'exportation de ressources à une industrie de transformation en profondeur des matériaux. Actuellement, le marché chinois des plaques en alliage de tungstène est estimé à plus de **3 milliards de RMB (environ 400 millions de dollars américains)** et continue de croître dans les domaines suivants :

1. Forte demande de fabrication d'équipements haut de gamme

Les stratégies nationales telles que « Fabrication haut de gamme 2025 » et « Intégration militaro-civile » ont favorisé la forte croissance des plaques en alliage de tungstène dans les domaines suivants :

- Contrepoids de véhicule hypersonique et structure de protection thermique ;
- Plaques de protection du cœur nucléaire et d'absorption des neutrons ;
- Composants de blindage de précision dans les systèmes de radiothérapie et d'imagerie CT ;
- Composants d'isolation thermique dans les équipements de traitement laser et les équipements plasma.

2. Expansion rapide de la capacité de production et itération technologique continue

Un certain nombre d'entreprises clés représentées par China Tungsten High-Tech, AVIC Matt, Xiamen Golden Heron, CTIA GROUP LTD et d'autres entreprises ont continué à accroître leurs investissements dans le domaine des plaques en alliage de tungstène et ont présenté les éléments suivants :

- Ligne de production de plaques de métallurgie des poudres à haute densité ;
- Ligne de production de plaques laminées à chaud sous vide ;
- Ligne de processus de revêtement de surface composite ;
- Système de production de plaques de précision de haute pureté pour plaques de protection nucléaire médicale.

Cette série d'investissements a non seulement amélioré la capacité d'approvisionnement du marché intérieur, mais a également renforcé la compétitivité des exportations internationales.

3. Principal moteur de la croissance du marché

Le marché des plaques en alliage de tungstène est principalement déterminé par les aspects suivants :

1. Les nouvelles demandes d'applications continuent d'émerger

Par exemple, l'énergie nucléaire de troisième génération, les dispositifs de fusion nucléaire, l'énergie nucléaire aérospatiale, la métallurgie à très haute température et les matériaux à haute conductivité thermique pour l'emballage des puces électroniques imposent tous des exigences de performance plus élevées pour les plaques d'alliage de tungstène et stimulent la croissance de sa demande en matériaux.

2. Stratégie de relocalisation de la production mondiale et de substitution nationale

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les puissances manufacturières telles que les États-Unis, l'Allemagne et le Japon favorisent le retour des industries haut de gamme et achètent continuellement des matériaux fonctionnels à base de tungstène ; dans le même temps, la Chine procède à une substitution nationale des « matériaux goulot d'étranglement » et accélère les percées dans les plaques d'alliage de tungstène hautes performances dans des domaines clés.

3. Améliorations matérielles induites par des politiques de protection de l'environnement vert

Sous les restrictions des réglementations environnementales telles que RoHS et REACH, les plaques en alliage de tungstène présentent des avantages évidents en tant que substituts du plomb dans la radioprotection et les matériaux électroniques, et leur taux de pénétration du marché continue d'augmenter.

IV. Prévisions de croissance du marché pour les cinq prochaines années (2025-2030)

Compte tenu des orientations politiques mondiales, de l'intensité de la demande en aval et de la vitesse d'évolution technologique, le marché des plaques en alliage de tungstène devrait maintenir **une tendance de croissance moyenne à élevée au cours des cinq prochaines années :**

années	Taille du marché mondial (milliards de dollars américains)	Taille du marché chinois (100 millions de yuans)	Remarques
2024	15,5	30	Estimations actuelles
2025	16,8	34	La demande en énergie nucléaire et en électronique a considérablement augmenté
2026	18,5	39	Le secteur médical et les nouvelles énergies stimulent la sortie de nouvelles lignes de production
2027	20.3	44	Alliages multi-éléments et intégration de fabrication intelligente
2028	22.0+	50+	Les nano-feuilles et les matériaux fonctionnels composites deviennent de plus en plus populaires

Parmi eux, **les panneaux de protection haute densité à usage médical , les panneaux de structure de refroidissement électronique supraconducteurs et les panneaux de revêtement de protection thermique laser** deviendront les segments de marché à la croissance la plus rapide.

V. Résumé

Les plaques en alliage de tungstène occupent une place de plus en plus importante dans l'industrie manufacturière haut de gamme mondiale, jouant un rôle essentiel à l'intersection des matériaux stratégiques et fonctionnels. Avec l'expansion continue des applications, l'amélioration continue des normes de performance et le renforcement constant des exigences environnementales, le marché des plaques en alliage de tungstène évoluera vers **une haute précision, une fonctionnalité et une efficacité élevées** . Saisir la dynamique de modernisation de la chaîne

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

industrielle et la demande mondiale sera la clé du succès des fabricants de plaques en alliage de tungstène au cours des cinq prochaines années.

9.3 CTIA GROUP LTD Plaque en alliage de tungstène

En tant que promoteur important dans le domaine des nouveaux matériaux en alliage de tungstène en Chine, CTIA GROUP LTD se concentre sur la recherche et le développement, la production et l'application industrielle du tungstène et de ses alliages pour la transformation en profondeur. Spécialement dans le domaine des plaques en alliage de tungstène, l'entreprise a mis en place un système technique et une matrice de produits complets et systématiques, avec de solides capacités d'intégration technique, de développement d'équipements et une influence industrielle considérable. Elle occupe une place importante sur le marché national des plaques en alliage de tungstène haut de gamme.

1. Présentation de l'entreprise et positionnement stratégique

CTIA GROUP LTD se positionne comme un fournisseur de solutions en alliages de tungstène haute performance. S'appuyant sur les atouts industriels de la Chine en matière de ressources en tungstène, de technologie métallurgique et d'équipements de métallurgie des poudres, elle se concentre sur le développement systématique d' **alliages de tungstène haute densité, de plaques de tungstène haute pureté et de pièces structurales en alliages de tungstène de formes spéciales** . Ses produits sont largement utilisés dans des secteurs haut de gamme tels que l'aérospatiale, l'ingénierie nucléaire, les équipements médicaux, les équipements haute température et l'électronique de précision.

L'entreprise se concentre sur des stratégies concurrentielles différenciées et se concentre sur les orientations stratégiques suivantes :

- **substitution des plaques de tungstène haut de gamme : réaliser des percées nationales** dans les variétés de plaques de tungstène qui dépendent des importations, telles que les plaques de blindage nucléaire, les plaques de contrôle thermique de précision, les plaques de protection médicale, etc.
- **Services personnalisés diversifiés** : Nous pouvons développer différents systèmes d'alliages (tels que W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, W-Mo-Ti, etc.) et spécifications de taille de plaques selon les exigences du client ;
- **Mise à niveau des processus intelligents : Promouvoir** la construction de lignes de production intelligentes intégrées pour le traitement des poudres - pressage - frittage - laminage - finition ;
- **Fabrication verte et exportations conformes** : Suivez strictement les systèmes de protection de l'environnement tels que RoHS, REACH, ISO14001 et établissez des canaux de qualité pour les marchés internationaux tels que l'Europe, l'Amérique, le Japon et la Corée du Sud.

2. Système principal de produits en alliage de tungstène

China Tungsten Intelligence couvre principalement les types suivants :

Catégorie de conseil	Système	Masse	Domaines d'application
----------------------	---------	-------	------------------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	d'alliage	volumique typique (g/cm ³)	
Plaque en tungstène à haute densité	W-Ni-Fe, W-Ni-Cu	17,0~18,5	Aérospatiale, composants inertiels, masses d'équilibrage
Plaque de protection médicale	Type non magnétique W-Ni-Cu	17,0~17,8	Équipement de radiothérapie, radioprotection CT
Panneau de blindage pour l'ingénierie nucléaire	W-Mo, W-Re	18,0~19,0	Protection des réacteurs nucléaires, structure d'absorption des neutrons
Dissipateur thermique de précision	W ou W-Cu de haute pureté	17,5~19,0	Dissipateur thermique microélectronique, substrat d'emballage
Panneaux structurels ultra-haute température	W-Ti-Cr	18,0~18,8	Composants du champ thermique, revêtement du dispositif de réaction
Plaques fonctionnellement graduées	Structure composite W-FGM	Concevable	Structure laminée multifonctionnelle

La gamme de tailles de produits couvre **une épaisseur de 0,3 mm à 50 mm, une largeur de 10 mm à 300 mm, une longueur de 20 mm à 1500 mm**, et des plaques de forme spéciale, des plaques perforées, des plaques rainurées, des plaques revêtues et d'autres pièces structurelles peuvent être personnalisées selon les dessins.

3. Avantages de la technologie de base

Les avantages techniques de CTIA GROUP LTD dans le domaine des plaques en alliage de tungstène se reflètent principalement dans les aspects suivants :

1. Préparation et contrôle du classement des poudres

- Développé indépendamment un procédé de préparation de poudre de tungstène par réduction en plusieurs étapes ;
- Réalisez un contrôle de la taille des particules dans la plage de 0,5 à 10 μm et prenez en charge des paramètres de distribution personnalisés ;
- Optimiser le mécanisme de dispersion active en fonction des différents rapports du système d'alliage.

2. Capacité de formation de chemin multi-processus

- Moulage par compression : adapté aux tailles régulières et à la production de masse ;
- Pressage isostatique : utilisé pour les exigences de haute densité et de forme complexe ;
- Laminage à chaud + recuit sous vide : améliore l'uniformité des plaques et les performances de traitement ;
- Le traitement composite par meulage de surface/décapage/PVD sous vide répond à de multiples exigences de performance telles que la conductivité thermique et la résistance à la corrosion.

3. Système de production intelligent

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Introduction du système de gestion MES pour assurer la traçabilité des données tout au long du processus de production ;
- Mettre en place un système automatique de reconnaissance d'images de défauts de plaques ;
- Dispositif de protection à faible teneur en oxygène développé par nos soins pour améliorer la pureté de la carte.

IV. Coopération industrielle et résultats des applications commerciales

Les plaques en alliage de tungstène de CTIA GROUP LTD ont été largement utilisées dans de nombreux projets nationaux et d'entreprise clés, notamment :

- Plaques à ultra-haute densité développées conjointement avec **China Aerospace Science and Technology Corporation pour contreponds inertiels ;**
- Fournir des plaques de blindage de qualité nucléaire pour **CGN et CNNC Engineering ;**
- plaques de protection en alliage de tungstène pour les fabricants d'équipements médicaux tels que **Shanghai United Imaging et Mindray Medical ;**
- Fournir des plaques de tungstène conductrices thermiques et des pièces structurelles composites de dissipation thermique à **Huawei, BYD Electronics, etc.**

V. Défis et perspectives de développement

Bien que CTIA GROUP LTD ait établi une position solide sur le marché intérieur, elle devra encore faire face aux défis suivants à l'avenir :

- Les matières premières de haute pureté dépendent des importations et sont soumises à des contraintes de coûts ;
- Il existe encore un écart entre nous et les géants internationaux en termes de systèmes de test et de barrières techniques ;
- La recherche fondamentale dans des domaines particuliers tels que l'absorption des neutrons et la dissipation de chaleur à haute fréquence doit être renforcée.

À cette fin, l'entreprise se concentrera sur les axes suivants :

- Construire **notre propre ligne de production de poudre de haute pureté** pour réduire les coûts et contrôler les risques ;
- Coopérer en profondeur avec les instituts de recherche scientifique pour promouvoir la recherche et le développement de pointe **des plaques fonctionnelles en tungstène ;**
- Renforcer la collaboration personnalisée avec les clients finaux et développer une solution intégrée de « plaque de tungstène + traitement + emballage + application ».

VI. Résumé

Dans le secteur des plaques en alliage de tungstène, CTIA GROUP LTD, fabricant traditionnel de matériaux, évolue vers un fournisseur de solutions complètes. L'optimisation continue de ses gammes de produits, de ses capacités de traitement et du développement de ses applications a non seulement amélioré la qualité globale de ses plaques en alliage de tungstène haute performance produites localement, mais a également insufflé un nouvel élan à l'industrie mondiale des plaques en alliage de tungstène grâce à sa stratégie « Capacité de production chinoise + Fabrication intelligente chinoise ».

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.4 Analyse du lien entre les coûts des matières premières, les prix de l'énergie et les prix des plaques

Les plaques en alliage de tungstène sont influencées conjointement par les fluctuations du prix des matières premières en amont, les coûts de consommation énergétique, la complexité des procédés de fabrication et les fluctuations de la demande en aval. Parmi ces facteurs, les matières premières (poudre de tungstène, liant métallique), l'énergie (électricité, gaz atmosphérique), les investissements en équipements et les coûts de main-d'œuvre occupent une place centrale dans la structure des coûts des plaques en alliage de tungstène. Cette section analysera en profondeur le mécanisme interne de formation des prix des plaques en alliage de tungstène et explorera la voie de transmission et le cycle de réponse des variations des prix des matières premières et de l'énergie aux prix du marché des plaques en alliage de tungstène.

1. Analyse de la structure des coûts des plaques en alliage de tungstène

D'une manière générale, le coût de fabrication d'une plaque en alliage de tungstène se compose des éléments suivants :

Composantes des coûts	Plage de pourcentages (estimation typique)
Coûts des matières premières (APT, poudre de tungstène, Ni/Cu/Fe)	45% ~ 60%
Consommation d'énergie (électricité, hydrogène, gaz inerte)	10% ~ 20%
Procédés de fabrication et amortissement des équipements	10% ~ 15%
Coûts de main-d'œuvre et de gestion	5% ~ 10%
Traitement de surface et contrôle qualité	5% ~ 10%

On peut constater que **les prix des matières premières et la consommation d'énergie** sont les principales variables qui dominent les fluctuations de prix des plaques en alliage de tungstène.

2. Mécanisme de transmission du prix de l'APT et de la poudre de tungstène au prix de la plaque

1. Impact des fluctuations des prix des matières premières en amont

Les plaques en alliage de tungstène sont principalement constituées d'APT (paratungstate d'ammonium), réduit par l'hydrogène pour obtenir de la poudre de tungstène, puis additionné de Ni, de Cu et d'autres métaux de liaison. Le prix de l'APT est étroitement lié à celui du concentré de tungstène et présente une certaine périodicité et une certaine brutalité. Les fluctuations du prix de la poudre de tungstène se répercutent sur le prix final des plaques en alliage de tungstène par les voies suivantes :

Prix du concentré de tungstène ↑ → Prix de l'APT ↑ → Prix de la poudre de tungstène ↑ → Coût de la poudre d'alliage ↑ → Le prix unitaire des plaques augmente
une période de décalage d'environ 2 à 4 semaines dans ce processus de transmission, mais s'il s'agit d'un changement de tendance à long terme, les entreprises de fabrication réduisent souvent

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

les risques en signant des contrats d'approvisionnement trimestriels/annuels et en ajustant les stratégies d'inventaire.

2. Synergie des prix des métaux obligataires

- **Les prix du nickel (Ni) fluctuent considérablement** et ont été considérablement affectés par la demande de nouvelles énergies (batteries) ces dernières années ;
- **Les prix du cuivre (Cu) et du fer (Fe) sont plus proches des fluctuations cycliques des métaux industriels** , mais leurs fluctuations globales ont moins d'impact que la poudre de tungstène.

Bien que les variations de coût du métal liant ne soient pas aussi drastiques que celles de la poudre de tungstène, ses fluctuations dans les plaques d'alliage en vrac (comme le système W-Ni-Cu) affecteront également de manière significative le prix final.

3. L'impact des prix de l'énergie sur les coûts de production des tôles

La fabrication de plaques en alliage de tungstène est un procédé très énergivore, la principale consommation d'énergie étant concentrée dans :

- **Étape de frittage sous atmosphère protectrice d'hydrogène ;**
- **Four électrique à haute température nécessaire au laminage à chaud et au recuit ;**
- **Entretien de l'air comprimé, de l'eau de refroidissement et de l'électrolyte nécessaire au traitement à froid et au traitement de surface .**

Les prix de l'énergie sur les plaques de tungstène sont les suivants :

Prix de l'électricité et de l'hydrogène ↑ → Coût énergétique unitaire de la tôle ↑ → Coût marginal de production de la tôle ↑ → Hausse des prix du marché

En prenant comme exemple l'évolution des prix de l'électricité industrielle dans certaines provinces de Chine entre 2022 et 2024, une augmentation de 15 à 30 % des prix de l'électricité peut augmenter le coût de consommation énergétique unitaire des plaques d'alliage de tungstène de 3 à 5 %, en particulier pour les entreprises utilisant des fours électriques sous vide et des procédés de frittage par pressage isostatique.

4. Fluctuations des prix des plaques en alliage de tungstène : cycle et lien avec le marché

Les plaques en alliage de tungstène présentent les **caractéristiques régulières suivantes** :

1. Type cyclique : l'effet de superposition du cycle des matières premières et des stocks industriels

- Lorsque l'APT ou la poudre de tungstène entre dans le canal ascendant, les entreprises préparent les matériaux à l'avance, ce qui fait grimper le prix des plaques ;
- Lorsque la demande en aval est insuffisante et que les stocks s'accumulent, les prix des plaques chutent avec un certain décalage.

2. Type de structure : différenciation de prix entre les panneaux haut de gamme et les panneaux standards

- les plaques minces de haute pureté, de haute densité et de petite taille personnalisées fluctuent davantage et sont davantage affectées par la consommation de main-d'œuvre et d'énergie ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les panneaux standards bénéficient de fortes économies d'échelle et de prix relativement stables, ce qui leur permet de devenir facilement des prix de référence pour l'industrie.

3. Régional : les différents pays ont des mécanismes de transmission des prix différents

- La Chine utilise principalement une tarification basée sur les coûts, et les prix sont fortement influencés par le lien entre l'APT et l'énergie ;
- Les entreprises européennes et américaines ont tendance à adopter des accords d'approvisionnement à long terme et une tarification fonctionnelle (comme une tarification basée sur l'efficacité du blindage contre les radiations), ce qui rend les fluctuations de prix plus « atténuées ».

5. Résumé et perspectives de tendance

Le prix des plaques d'alliage de tungstène reflète une triple relation : **les matières premières jouent un rôle prépondérant, l'énergie joue un rôle synergique et le marché joue un rôle régulateur**. On s'attend à ce qu'au cours des cinq prochaines années, avec le resserrement des stratégies mondiales en matière de ressources en tungstène et la persistance des prix élevés de l'électricité et de l'hydrogène, les prix des plaques de tungstène continuent de fluctuer selon un modèle de « fluctuations importantes et de différenciation structurelle ».

Les fabricants de plaques en alliage de tungstène doivent :

- Renforcer les capacités d'achat, de négociation et de réserve d'APT et de poudre de tungstène ;
- Améliorer l'efficacité énergétique des processus et le ratio d'automatisation des équipements ;
- Évitez les risques de prix grâce à une tarification fonctionnelle et à des stratégies de produits différenciées.

C'est seulement de cette manière que nous pourrions obtenir des bénéfices stables et renforcer la résistance au risque du marché dans un environnement de ressources et d'énergie volatil.

9.5 Obstacles techniques et stratégie de développement approfondie de la chaîne industrielle

Représentant des matériaux fonctionnels métalliques haut de gamme, les plaques d'alliage de tungstène sont largement utilisées dans la protection nucléaire, l'aérospatiale, les équipements médicaux, l'électronique de précision, la fabrication à haute température et d'autres domaines exigeant des exigences extrêmement élevées en matière de performance, de précision, de constance et de fiabilité. Par conséquent, ce secteur présente d'importantes barrières techniques et à l'entrée. Parallèlement, la chaîne industrielle mondiale évolue vers la haute précision, la personnalisation et l'écologisation, ce qui pose des défis accrus pour la coordination intégrée des activités en amont, en milieu de chaîne et en aval.

Cette section analysera les principaux obstacles et les plans de réponse stratégique de l'industrie des plaques en alliage de tungstène du point de vue des seuils techniques, des difficultés du processus de base, des mécanismes de coordination en amont et en aval, des goulots d'étranglement de substitution nationaux et des voies de développement approfondies.

1. Analyse des principaux obstacles techniques des plaques en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La fabrication de plaques en alliage de tungstène fait appel à de multiples disciplines interdisciplinaires, telles que la métallurgie, l'ingénierie thermique, la science des matériaux et l'ingénierie des surfaces. Ses principaux obstacles techniques se manifestent dans les aspects suivants :

1. Technologie de contrôle de la pureté des matières premières et des poudres

- La production de plaques d'alliage de tungstène haute performance doit être basée sur de l'APT de haute pureté et les impuretés (telles que Mo, Si, P, O, C) doivent être contrôlées au niveau ppm ;
- La distribution granulométrique de la poudre doit être contrôlée avec précision dans une plage de 1 à 10 μm . Différentes tailles de particules ont un impact significatif sur le taux de densification, la densité de frittage et l'uniformité de l'organisation.
- Le contrôle de l'activité de la poudre (comme la teneur en oxygène de surface) est directement lié à la ductilité de la feuille et au contrôle du retrait de frittage.

2. Technologie de frittage et de densification

- Les équipements de frittage isostatique à haute température et haute pression sont coûteux et complexes à contrôler ;
- Le contrôle de l'atmosphère protectrice de l'hydrogène nécessite un réglage précis du potentiel d'oxygène, du débit et de la distribution du champ thermique ;
- Pour les plaques de formes spéciales et les plaques de très grande taille, il existe des problèmes tels que la difficulté de contrôler la déformation de frittage et le risque de fissuration sous contrainte.

3. Procédé de laminage et de traitement thermique des plaques

- l'alliage de tungstène conduit à une fenêtre de laminage à chaud très étroite, qui est sujette à des défauts tels que des fissures de bord, des déformations et des grains grossiers ;
- Le laminage à froid doit être combiné avec un recuit intermédiaire pour éviter que la concentration de contraintes ne provoque des fissures ;
- Un contrôle précis de l'épaisseur, de la planéité et de la tolérance des tôles ($\pm 0,02$ mm) est indispensable pour les marchés à forte valeur ajoutée tels que les panneaux médicaux.

4. Traitement de surface et contrôle de la fonction composite

- Oxydation à haute température, contrôle de la rugosité de surface et exigences élevées en matière d'adhérence de galvanoplastie/revêtement ;
- Les panneaux à gradient fonctionnel et les technologies de panneaux composites multicouches sont encore au stade pilote et n'ont pas encore été commercialisés à grande échelle ;
- La régulation de l'activité de surface (hydrophile/hydrophobe, résistance aux radiations) repose toujours sur des matériaux membranaires importés à haute performance.

2. Les principaux goulots d'étranglement dans la profondeur de la chaîne industrielle des plaques en alliage de tungstène

1. Le phénomène de goulot d'étranglement dans la liaison des matières premières

- La production d'APT de haute pureté et de poudre de tungstène de haute activité est encore concentrée dans quelques entreprises leaders, et la pureté et la stabilité des matières premières ont un impact important sur le rendement des produits en aval ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les métaux liants (tels que Ni, Re et Mo) sont principalement importés ou dépendent de la fusion en petits lots, sont sensibles aux prix et ont des chaînes d'approvisionnement fragiles.

2. Les équipements de pointe dépendent des importations

- La plupart des équipements de processus clés, tels que les fours de frittage sous vide à haute température, les laminoirs de précision, les systèmes PVD plasma et les équipements de contrôle non destructif CT, dépendent des importations en provenance d'Europe, des États-Unis, du Japon et de Corée du Sud, et présentent des problèmes tels que des cycles de maintenance des équipements longs, la confidentialité technique et des coûts de mise à niveau élevés.

3. Système de contrôle qualité imparfait

- Les clients haut de gamme (énergie nucléaire, industrie militaire et médicale) ont des exigences extrêmement élevées en matière de cohérence et de stabilité d'un lot à l'autre, mais les systèmes de qualité de certaines entreprises nationales ne correspondent pas ;
- Il existe un manque de plateformes de tests non destructifs standardisées et de systèmes de simulation physique de haute précision.

3. Comparaison internationale : écart technologique et orientation des avancées technologiques

projet	Europe, Amérique, Japon et Corée du Sud (entreprises représentatives)	Situation actuelle en Chine (entreprises représentatives)	Direction de l'écart
Pureté des plaques et uniformité des tissus	Plansee, Tosoh, Hitachi	CTIA GROUP LTDFabrication	Contrôler la consistance granulométrique et la densification par frittage
Panneaux structuraux composites et intégration fonctionnelle	Toshiba, MolyWorks	La plupart d'entre eux sont des projets expérimentaux ou militaires	Revêtement PVD, technologie FGM
Système d'inspection et de test de précision	GE, Bruker, Zeiss	Dépendance à certaines importations	Équipement CT/NDT haut de gamme
Système de certification de la qualité militaire/nucléaire	Parfait (AS9100, MIL-SPEC, ISO13485)	Accélérer les progrès	La plupart sont encore en phase de mise en correspondance et de conversion

4. Suggestions sur la stratégie de développement approfondie de la chaîne industrielle des plaques en alliage de tungstène

1. Extension en amont : Renforcement de l'autosuffisance en poudre de tungstène de haute pureté et en métaux liants haut de gamme

- Promouvoir l'intégration des capacités de traitement en profondeur des ressources en tungstène et améliorer les capacités de raffinage APT et de réduction en plusieurs étapes ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Soutenir la construction de lignes de production nationales de matériaux microalliages de métaux rares et précieux (tels que Re et Ta) ;
- Construire un système de production complet pour la poudre d'alliage à base de tungstène afin d'obtenir un contrôle intégré de la taille/pureté/fluidité des particules.

2. Percée intermédiaire : technologie de production intelligente et développement indépendant d'équipements clés

- Présentation d'un système de contrôle intelligent pour réaliser une régulation en boucle fermée du frittage-laminage-travail à froid-traitement thermique ;
- Surmonter le problème de la substitution nationale des fours de pressage isostatique/frittage sous vide et promouvoir l'intégration numérique des équipements ;
- Construire une plateforme « pilote au niveau de la ligne de production + tests collaboratifs avec les clients » pour accélérer la vérification de la production par lots de nouveaux matériaux.

3. Collaboration en aval : développement de panneaux fonctionnels et innovation conjointe avec les utilisateurs finaux

- Intégrer en profondeur les entreprises d'électronique, d'énergie nucléaire et d'équipements médicaux et développer des produits personnalisés centrés sur « l'intégration des performances + la réduction du poids structurel + l'adaptation précise » ;
- Développer des capacités de livraison intégrées, des matières premières aux plaques d'alliage de tungstène jusqu'aux dispositifs semi-finis ou aux unités d'assemblage ;
- Promouvoir le système de traçabilité numérique de la qualité et établir la capacité de suivre l'ensemble du cycle de vie des matériaux, des produits et des applications.

4. Construction d'un système standard et d'un projet de talent

- Formuler des normes techniques et des spécifications d'essais couvrant l'ensemble de la chaîne des structures composites poudre-feuille ;
- Constituer une équipe de R&D composite couvrant la science des matériaux en tungstène, l'ingénierie de surface, la simulation physique, etc.
- Encourager les universités, les instituts de recherche et les entreprises à construire conjointement le « Centre de recherche sur les technologies de fabrication avancées de plaques en alliage de tungstène ».

V. Résumé

L'industrie des plaques en alliage de tungstène doit passer d'une approche axée sur les ressources à une approche axée sur la technologie. Elle doit surmonter une série d'obstacles techniques tels que les matières premières de haute pureté, le frittage dense, les composites fonctionnels, l'ingénierie de surface et l'usinage de précision, et promouvoir l'innovation collaborative tout au long de la chaîne industrielle. Seules une intégration approfondie de la chaîne industrielle, l'introduction de systèmes de fabrication intelligents et l'amélioration du système de normes permettront de consolider la compétitivité de la marque et l'initiative stratégique des plaques en alliage de tungstène « Made in China » dans un contexte de concurrence mondiale acharnée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

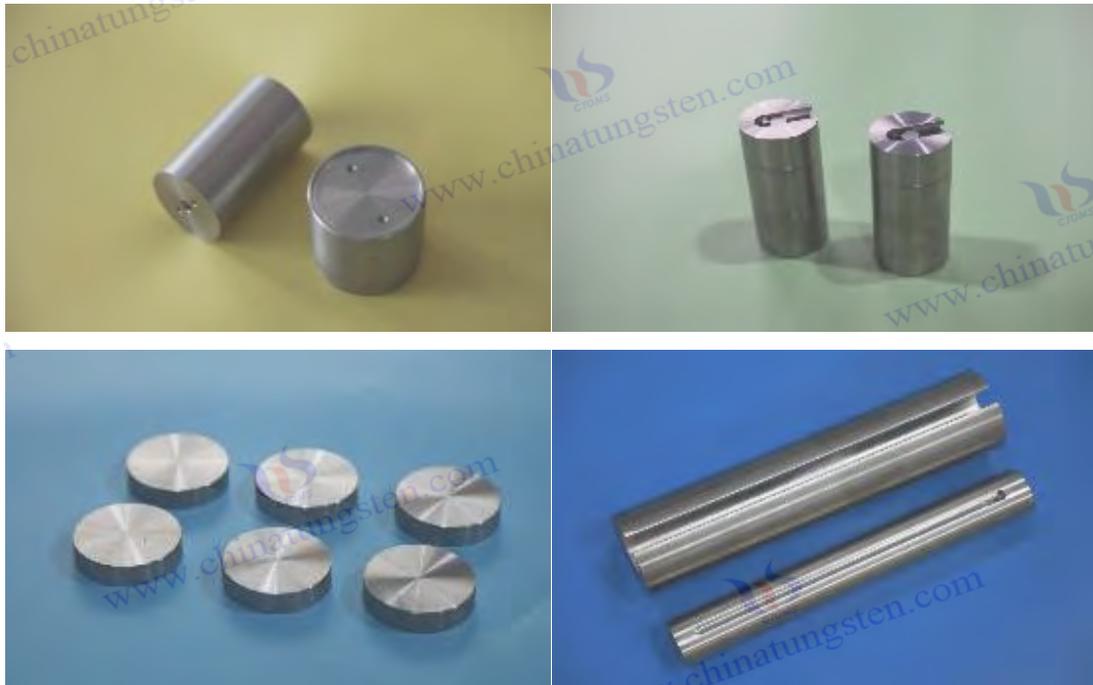
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

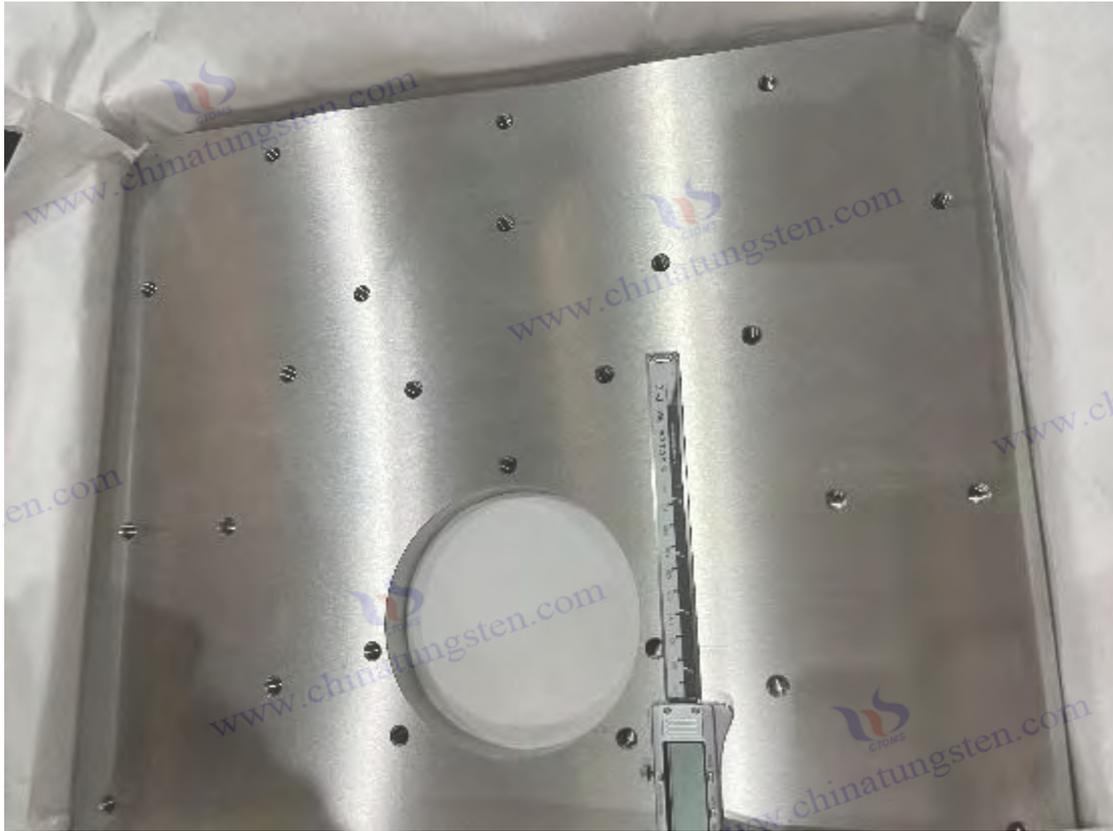
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Chapitre 10 Frontières de la recherche et orientations de développement des plaques en alliage de tungstène

10.1 Mécanisme de densification d'une plaque en alliage de tungstène à très haute densité

Face à la recherche effrénée de densité des matériaux dans les domaines de la protection de l'énergie nucléaire, de l'absorption de particules à haute énergie, des contrepoids inertiels et des équipements médicaux de haute précision, les plaques d'alliage de tungstène à très haute densité (densité $\geq 18,5 \text{ g/cm}^3$) deviennent un nouvel axe de recherche. Le tungstène possède une densité intrinsèque extrêmement élevée ($19,25 \text{ g/cm}^3$), mais lors de l'alliage et du formage des plaques, la densité du produit final est souvent inférieure à la valeur théorique en raison de facteurs tels que la porosité organisationnelle, les inclusions d'impuretés ou un rapport métal-liant excessif. **La densification ultime (quasi-totale) des plaques d'alliage de tungstène** constitue l'un des principaux obstacles à l'application industrielle de ces matériaux haut de gamme.

Cette section discutera systématiquement du mécanisme microscopique, des facteurs d'influence, des principales méthodes et des derniers progrès de la recherche sur la densification des plaques en alliage de tungstène.

1. Principes de base et définitions de la densification

La densification fait référence au processus d'élimination des pores entre les particules et de réduction de la distance entre les atomes par chauffage et pressurisation pendant le processus de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

formage par métallurgie des poudres, améliorant ainsi la densité volumique et l'intégrité structurelle du matériau.

La densité relative est un indicateur important pour mesurer la qualité des plaques d'alliage de tungstène. La méthode de calcul est la suivante :

$$\text{Densité (\%)} = \text{densité réelle} / \text{densité théorique} \times 100 \%$$

Dans les plaques d'alliage de tungstène, la densité théorique dépend du rapport entre le tungstène et le métal de liaison (tel que Ni, Cu), tandis que la densité réelle est affectée par des facteurs tels que la morphologie des particules, le retrait de frittage et les pores résiduels.

2. Mécanisme microscopique du processus de densification

1. Réarrangement des particules de poudre et optimisation du contact

Au cours du processus de pressage, les espaces entre les particules sont minimisés par moulage ou pressage isostatique, l'angle de contact entre les particules est optimisé et une structure préliminaire est formée.

2. Diffusion de surface et formation de col

Au début du chauffage, la diffusion se produit sur la surface des particules pour former un « col de frittage », et les atomes migrent le long de la surface vers la zone de basse énergie, rétrécissant les pores.

3. Liaison interparticulaire et diffusion en masse

Au stade de haute température, la diffusion des joints de grains et la diffusion en masse se produisent, les pores se rétrécissent, des liaisons intermétalliques se forment entre les particules et une structure dense s'établit progressivement.

4. Fermeture et contraction des pores

Dans l'étape de frittage ultérieure, les pores fermés diffusent le gaz vers l'extérieur, les micropores se rétrécissent, l'organisation devient homogène et une microstructure proche de la densité théorique se forme.

3. Facteurs clés affectant la densification

1. Caractéristiques de la poudre

- **Répartition granulométrique** : la poudre fine est plus propice à une densification élevée, mais s'oxyde facilement ; la poudre grossière réduit l'activité de frittage ;
- **Morphologie et structure** : La poudre sphérique a une bonne fluidité, ce qui est propice au pressage et au formage et une densité uniforme ;
- **Teneur en oxygène et impuretés** : une teneur élevée en oxygène formera des résidus WO_3 , entravant la densification et affectant la stabilité des tissus.

2. Rapport de phase liante

- Les métaux tels que Ni et Cu en tant que phases de liaison peuvent améliorer considérablement la densité et la plasticité, mais une proportion trop élevée réduira la densité finale ;
- Le rapport optimal nécessite une conception équilibrée de la résistance, de la ductilité et de la densité du panneau.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Pression et méthodes de répression

- Une bonne densité initiale peut être obtenue en contrôlant la pression de moulage à 150~300 MPa ;
- Le pressage isostatique (CIP) peut éliminer efficacement la directionnalité du formage et améliorer la cohérence de la densité.

4. Température et atmosphère de frittage

- la plaque en alliage de tungstène est de 1350 à 1550 °C et doit être réalisée dans un environnement d'hydrogène de haute pureté ou sous vide ;
- Le temps de frittage affecte la fermeture des pores et l'uniformité de la microstructure.

5. Post-traitement

- Le pressage isostatique à chaud (HIP) améliore encore le taux de densification après frittage ;
- Le laminage intermédiaire + recuit permet d'éliminer les micropores et d'améliorer la densité des grains.

4. Principales pistes techniques pour améliorer le niveau de densification

Parcours technique	Avantages	Points clés
CIP	Pression uniforme et haute tolérance à la complexité des formes	Moule à haute résistance + technologie d'emballage de poudre précise
Frittage en phase liquide	Ajoutez un métal de liaison à bas point de fusion pour faciliter la diffusion	Contrôle du rapport métal de liaison + optimisation de la fenêtre de température
Pressage isostatique à chaud (HIP)	Élimine les micropores résiduels et améliore l'uniformité microscopique	Contrôle de l'environnement à haute température et haute pression + conception de cavité étanche à l'air
Homogénéisation de poudre nano + ultra-fine	Augmenter le taux de diffusion et améliorer l'efficacité de la formation du col	Contrôle de la nano-agglomération + traitement de surface pour inhiber l'oxydation
Laminage à froid multiple + recuit intermédiaire	Réduire la porosité et améliorer la densité de la texture	Taux de déformation contrôlé + libération des contraintes résiduelles
Refusion laser/refusion sous laitier électrolytique et autres nouveaux procédés	Densification de surface + remodelage de la microstructure	Uniformité de l'apport de chaleur + contrôle du grain de surface

5. Dernières recherches et orientations futures

1. Modélisation du frittage multi-échelle

La méthode des éléments finis (FEM), la dynamique moléculaire (MD), la simulation de champ de phase (Phase-Field) et d'autres technologies sont utilisées pour simuler l'évolution des pores et le chemin de conduction des contraintes pendant le processus de frittage des plaques d'alliage de tungstène et optimiser le chemin de densification.

2. Technologie de consolidation rapide (comme SPS)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le frittage par plasma d'étincelles présente les avantages d'un effet thermique élevé et d'un taux de compression élevé, et peut atteindre une densité proche de la théorie en peu de temps, ce qui convient à la préparation rapide et au criblage expérimental des plaques de tungstène.

3. Développement de panneaux structuraux composites à haute densité

Développer une structure à gradient de densité, une plaque en alliage de tungstène sandwich (haute densité au milieu, ténacité en surface) ou une plaque revêtue pour obtenir un équilibre de plusieurs propriétés.

4. Recherche sur le processus de densification élevée + faible déformation

Grâce à la combinaison du préfrittage à moyenne-basse température et à haute pression avec le recuit sous vide secondaire, le frittage sous pression auxiliaire et d'autres procédés composites, la contradiction entre la densité ultra-élevée et la stabilité de la déformation est résolue, ce qui convient à la préparation de plaques de très grande surface.

VI. Résumé

Les plaques en alliage de tungstène constituent non seulement un moyen essentiel d'améliorer leur résistance structurelle, leur résistance aux radiations et leurs propriétés de gestion thermique, mais représentent également le cœur de la compétitivité de la technologie de transformation des alliages de tungstène. À l'avenir, des recherches approfondies sur le mécanisme de densification continueront de favoriser des avancées technologiques dans des domaines clés tels que le contrôle des propriétés des poudres, les modèles physiques de frittage et les procédés de pressage des composites, permettant ainsi une application plus large des plaques en alliage de tungstène dans des environnements extrêmes et des équipements haut de gamme.

10.2 Fabrication additive et plaque intelligente en alliage de tungstène

Alors que l'industrie manufacturière évolue du traitement par lots traditionnel vers la numérisation, la personnalisation et l'intelligence artificielle, la fabrication additive (FA) s'intègre progressivement aux systèmes de matériaux hautes performances, notamment les alliages de tungstène. En particulier, pour les composants en alliage de tungstène présentant des structures complexes, des exigences personnalisées et des performances élevées, la FA offre une nouvelle voie pour surmonter les limites des procédés conventionnels. De plus, avec le développement de l'Industrie 4.0, les systèmes de fabrication intelligents intégrant la détection intelligente, le développement piloté par les données et le contrôle en boucle fermée établissent le paradigme de production de nouvelle génération pour les alliages de tungstène.

Cette section abordera systématiquement les changements perturbateurs apportés par l'intelligence et la fabrication additive dans le domaine des plaques en alliage de tungstène sous l'angle des principes de la technologie de fabrication additive, de l'adaptabilité des plaques en alliage de tungstène, de l'intégration du système de fabrication intelligent et de ses perspectives industrielles.

1. Potentiel d'application de la technologie de fabrication additive dans les plaques en alliage de tungstène

1. Introduction à la fabrication additive

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La fabrication additive est un processus de fabrication **couche par couche** qui construit une structure tridimensionnelle selon un modèle numérique par laser, faisceau d'électrons, jet, dépôt en fusion, etc. Il convient à la fabrication de tôles, de coques complexes, de structures de cavités internes et de pièces intégrées fonctionnelles.

2. Défis et progrès de la fabrication additive dans les alliages de tungstène

Le point de fusion élevé de l'alliage de tungstène (> 3 400 °C), sa conductivité thermique élevée et sa faible plasticité entraînent les défis suivants dans la technologie AM traditionnelle :

- Les fissures sont susceptibles de se produire et les déformations et gauchissements sont graves ;
- Le faisceau laser/électronique présente une réflectivité élevée et un faible taux d'absorption d'énergie ;
- La poudre est difficile à sphéroïdiser et présente une faible fluidité.

Cependant, avec la maturité des technologies suivantes, la fabrication additive a réalisé des percées dans la préparation de plaques d'alliage de tungstène :

- **Fusion par faisceau d'électrons (EBM)** : fait fondre la poudre de tungstène sous vide pour réduire l'oxydation et la formation de fissures ;
- **Dépôt d'énergie dirigé (DED)** : Convient à la réparation et au formage quasi net de plaques d'alliage de tungstène de grande taille ;
- **Fusion Laser sur Lit de Poudre (LPBF)** : Excellente densité (>98%) dans la préparation de petites pièces en tungstène haute densité ;
- **Revêtement plasma** : réaliser le composite d'une couche de tungstène à gradient fonctionnel et d'un substrat.

2. Avantages de la fabrication additive pour améliorer les performances des plaques en alliage de tungstène

Limites des procédés traditionnels	La fabrication additive apporte une percée
Difficile de contrôler la consistance de l'épaisseur de la plaque	Peut être imprimé en couches, avec un contrôle précis de l'épaisseur et de la texture
Les structures complexes sont difficiles à traiter	Des structures poreuses et des cavités fonctionnelles peuvent être construites en même temps
Taux de gaspillage de matériaux élevé	Forme quasi nette, taux d'utilisation élevé du matériau (jusqu'à 90 %)
La conception du moule à cycle long dépend de	Éliminez les étapes de moulage et itérez rapidement les prototypes
L'uniformité des ingrédients est difficile à contrôler	Des ingrédients personnalisés et une construction de composition en gradient peuvent être obtenus

des structures fonctionnelles telles que **des canaux de conduction thermique, des couches de microstructure et des systèmes de refroidissement** dans la plaque pour réaliser l'évolution de « l'intégration structure-fonction » des plaques en alliage de tungstène.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Tendence d'intégration de la fabrication intelligente dans la production de plaques en alliage de tungstène

1. Système de contrôle qualité basé sur les données

Le processus de frittage/laminage est contrôlé par la surveillance des capteurs (champ de température, puissance laser, morphologie du bain de fusion) et le retour d'information du modèle jumeau numérique, ce qui améliore considérablement la cohérence de fabrication des plaques de tungstène.

2. Optimiser de manière autonome les processus de fabrication

paramètres additifs (trajet de balayage, puissance laser), etc. basés sur des données historiques et des algorithmes d'auto-apprentissage pour réaliser une fabrication adaptative.

3. Intégration des lignes de production et unités de fabrication flexibles

Grâce à l'intégration des systèmes MES (Manufacturing Execution System), ERP et CAM, nous avons construit une ligne de production de fabrication intelligente à processus complet de « poudre de tungstène → plaque de tungstène → composants de précision » pour répondre aux besoins des commandes en petits lots, de grande variété et de haute précision.

4. Conception de matériaux et identification des défauts pilotées par l'IA

- Utiliser des algorithmes d'apprentissage automatique pour prédire l'impact de la formulation des alliages sur les performances et accélérer le cycle de conception des matériaux ;
- Utilisez des modèles de reconnaissance d'images pour analyser des images CT ou métallographiques afin de réaliser une détection rapide et non destructive de défauts tels que des microfissures et des inclusions.

4. Principaux goulots d'étranglement techniques et contre-mesures pour la fabrication additive de plaques en alliage de tungstène

Difficultés techniques	Analyse des causes	Chemin de réponse
Difficile de préparer de la poudre	Les métaux à point de fusion élevé ne sont pas faciles à atomiser et ont une faible sphéricité	Développement d'équipements d'atomisation de gaz inerte et de sphéroïdisation au plasma
Les fissures sont susceptibles de se produire et les contraintes thermiques sont importantes	Grand gradient de température élevé + faible ductilité	Stratégie de numérisation optimisée + traitement thermique + nano-alliage
Déformation de la plaque difficile à contrôler	Le taux de retrait du matériau est élevé et la couche de formage est mince	Appliquez des structures de support, optimisez les chemins de numérisation et imprimez avec des panneaux sandwich
La cohérence du produit AM est instable	Variation des lots de poudre + fenêtre de processus étroite	Présentation du système de surveillance en ligne + retour d'informations en boucle fermée
Manque de normes et de méthodes de test	L'industrie des plaques d'alliage de tungstène AM en est encore aux	Promouvoir la formulation de normes ISO/ASTM et la construction d'une base de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	premiers stades de développement	données de processus
--	----------------------------------	----------------------

5. Tendances futures et orientations de pointe

1. Fabrication hybride : laminage traditionnel + reconstruction additive

En laminant la matrice de grandes plaques, AM construit des zones locales fonctionnelles pour atteindre l'unité de résistance structurelle et d'exigences fonctionnelles.

2. Fabrication collaborative multi-matériaux

L'alimentation en poudre synchrone laser est utilisée pour fabriquer des plaques composites de tungstène multifonctionnelles telles que le tungstène-cuivre et le tungstène-céramique, qui peuvent s'adapter à des charges complexes et à des conditions de travail extrêmes.

3. Jumeaux numériques et génie génétique des matériaux

En intégrant la base de données de paramètres de fabrication additive, les données volumineuses de performance organisationnelle et le modèle de prédiction de performance, une boucle fermée de contrôle intelligent à cycle complet de plaques en alliage de tungstène avec le concept de « conception-fabrication-performance » est construite.

4. Conception de poudre de tungstène pour la fabrication additive

Le développement d'une poudre d'alliage de tungstène à haute sphéricité, haute fluidité et faible teneur en oxygène spécifiquement pour la fabrication additive améliorera considérablement la cohérence du produit et la qualité de formage.

VI. Résumé

La fabrication additive et la fabrication intelligente deviennent les moteurs clés de la transformation et de la modernisation de l'industrie des plaques en alliage de tungstène. Elles repoussent non seulement les limites de la complexité structurelle et de l'intégration des performances des plaques, mais favorisent également une avancée majeure en termes d'efficacité de production, d'utilisation des matériaux et de capacités de fabrication personnalisées. Grâce à l'intégration poussée des lasers, des systèmes de contrôle, des algorithmes d'IA et de la métallurgie des poudres, une nouvelle génération de plaques en alliage de tungstène hautes performances, personnalisables et intelligemment contrôlables émergera à l'avenir, répondant pleinement aux multiples exigences de l'énergie nucléaire, des équipements haut de gamme, de l'aérospatiale et d'autres secteurs en matière de matériaux « légers, précis, résistants et intelligents ».

10.3 Intégration et extension des applications des panneaux composites multifonctionnels

Dans le contexte du développement de la fabrication haut de gamme, des équipements pour environnements extrêmes et des dispositifs fonctionnels de couplage multi-domaines, les plaques métalliques à performances uniques ne peuvent plus répondre aux besoins d'ingénierie diversifiés et systématiques. Les **Plaques composites multifonctionnelles à base de tungstène**, en tant que nouvelle génération de matériaux de structure d'ingénierie, favorisent l'évolution des plaques en alliage de tungstène du « support structurel » à la « structure + fonction » grâce à la conception structurelle, à l'ingénierie des interfaces et à l'intégration fonctionnelle.

Cette section explorera en profondeur les types, les mécanismes de connexion d'interface, les méthodes de préparation et le potentiel d'expansion des panneaux composites multifonctionnels

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dans différents scénarios d'application, et analysera les défis techniques actuels et les tendances de développement futures.

1. Types et concepts de conception de panneaux composites multifonctionnels

Propriétés fonctionnelles multiples, telles que la chaleur, la force, l'électricité, le magnétisme et la radioprotection, dans une matrice d'alliage de tungstène, par conception structurelle ou introduction de matériaux. Ses principales catégories sont :

taper	Structure de composition	Caractéristiques principales
Plaque composite tungstène-cuivre (W-Cu)	Matrice de tungstène + réseau de cuivre / couche intermédiaire	Haute conductivité thermique, faible dilatation thermique, anti-corrosion, anti-arc
Plaque composite tungstène-acier (W-SS)	Matrice de tungstène + base/surface en acier inoxydable	Combinaison solide et résistante, résistance aux chocs, bonne usinabilité
Plaque composite tungstène-céramique (W- Al₂O₃ , etc.)	Particules/revêtement en tungstène + céramique	Anti-usure, anti-corrosion, résistance à l'oxydation à haute température
Stratifiés tungstène-polymère/résine composite	Couche de tungstène + couche de polymère renforcé de fibres de carbone	Léger, protégeant des interférences électromagnétiques, améliorant les capacités d'absorption des chocs et d'absorption d'énergie
Matériaux à gradient fonctionnel (FGM)	Modifications de la composition ou de la microstructure le long du gradient d'épaisseur	Détente des contraintes, équilibre des contraintes thermiques, intégration fonctionnelle multicouche

Ce type de structure composite est largement nécessaire dans les dispositifs de fusion nucléaire, les éléments de contrôle thermique du plasma, les radiateurs d'aviation, les capots de protection, etc.

2. Mécanisme de liaison d'interface et facteurs de contrôle clés des plaques composites en alliage de tungstène

La performance des plaques composites dépend de la qualité de l'interface entre les différents matériaux. En raison des différences de coefficients de dilatation thermique et de capacités de diffusion atomique entre l'alliage de tungstène et d'autres matériaux (tels que le cuivre, l'acier et la céramique), des concentrations de contraintes interfaciales, des délaminages et des microfissures sont susceptibles de se produire. Il est donc essentiel de renforcer la liaison métallurgique par l'ingénierie des interfaces.

1. Méthode de liaison d'interface

- **Type de morsure mécanique** : améliore le frottement de l'interface à travers une surface rugueuse ;
- **Liaison par diffusion intermétallique** : L'interdiffusion atomique dans des conditions de chauffage forme une couche de transition ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Liaison par diffusion de réaction (comme la couche intermédiaire Ti, Cr) :** introduction d'éléments actifs entre le tungstène et d'autres métaux pour former des composés intermétalliques afin d'améliorer la force de liaison ;
- **Revêtement métallurgique de surface :** Une couche de transition est formée localement par fusion laser/arc pour réaliser une connexion métallurgique entre les couches.

2. Principaux facteurs d'influence

- **Correspondance thermique :** Les coefficients de dilatation thermique des deux matériaux sont proches, ce qui réduit la fatigue thermique ;
- **Activité interfaciale :** formation d'une couche de réaction interfaciale bénigne plutôt qu'une interphase cassante ;
- **Méthodes de prétraitement :** y compris l'élimination du film d'oxyde, le traitement de rugosité et le placage de couches d'alliage ;
- **Cheminement du processus :** la séquence de pressage, l'atmosphère de frittage et la courbe de température doivent être coordonnées.

3. Principales méthodes de préparation des plaques composites à base de tungstène

Processus de préparation	de	Introduction au principe	Fonctionnalités de l'application
Méthode de composition par explosion (EXW)		L'onde de choc de l'explosion pousse les métaux à entrer en collision à grande vitesse pour réaliser une liaison métallurgique	Résistance de liaison intercouche élevée, adaptée au revêtement de grandes surfaces de plaques d'acier au tungstène et de cuivre au tungstène
Procédé composite de pressage isostatique à chaud (HIP)		Pressage de poudre et collage par diffusion sous haute température et haute pression	Haute densité, adapté à la fusion de poudres hétérogènes et de structures en grille
Méthode composite de laminage à chaud		Les matériaux composites multicouches sont chauffés et laminés pour former des liaisons métallurgiques	Applicable aux composites à couches de gradient multi-métaux, forte uniformité de contrôle
Revêtement laser / dépôt directionnel		-dépôt in situ de couches fonctionnelles ou de couches intermédiaires tampons sur la surface de la plaque de tungstène	L'épaisseur peut être contrôlée avec précision, ce qui convient à la fabrication personnalisée de petits lots de composants hautes performances
pulvérisation à froid		Le gaz vecteur à grande vitesse pousse la micropoudre à frapper le substrat pour former une liaison mécanique	Procédé doux, adapté aux systèmes composites sensibles à la chaleur (tels que tungstène + polymère)
Collage/revêtement + composite de frittage		Externalisation/intégration d'une variété de matériaux, amélioration de la densité globale et de la force de liaison grâce au frittage sous vide	Procédé flexible, adapté aux formes complexes ou aux panneaux composites microstructurés

4. Extension d'application typique des plaques composites multifonctionnelles en tungstène

1. Protection de l'industrie nucléaire et composants structurels

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **la première structure de paroi** dans les dispositifs de fusion nucléaire ;
- Les plaques composites tungstène-cuivre sont utilisées pour **les composants thermiques orientés vers le plasma dans les réacteurs à fusion** et présentent une excellente conductivité thermique et une excellente résistance à l'ablation.

2. Aéronautique

- Les plaques composites W-Cu à haute conductivité thermique sont utilisées dans les radiateurs de satellites et les systèmes de propulsion des engins spatiaux ;
- Les structures de plaques de tungstène à gradient fonctionnel présentent des avantages d'absorption d'énergie multicouche dans les blindages anti-micrométéores/anti-impact.

3. Domaine des équipements médicaux

- Les plaques composites tungstène-polymère sont utilisées dans des structures de blindage légères et réglables pour **les appareils de radiothérapie** ;
- Les plaques composites en tungstène sont utilisées pour la suppression de la diffusion et l'amélioration de l'image dans les équipements SPECT/PET haute résolution.

4. Industrie des hautes températures et ingénierie du contrôle thermique

- Les plaques composites tungstène-céramique sont largement utilisées dans les couches réfléchissantes des fours à vide, les pièces structurelles à champ thermique à haute température et les revêtements pour la croissance cristalline ;
- Les plaques composites à microcanaux sont utilisées pour le transfert rapide de chaleur dans les équipements laser et à faisceau d'électrons.

V. Défis actuels et orientations de développement futures

Questions clés	Défis correspondants	Solutions potentielles
Inadéquation thermique de matériaux différents	Décollement d'interface, fissures de fatigue thermique	Introduire la couche de transition de gradient et concevoir la structure du tampon
Les paramètres des processus composites sont difficiles à normaliser	Chaque système composite doit être ajusté indépendamment	Faire progresser la construction de bases de données et la modélisation thermodynamique des interfaces
La qualité de l'interface composite est difficile à surveiller	Les microfissures et inclusions internes sont difficiles à détecter de manière non destructive	Présentation des technologies de reconnaissance des défauts par tomographie, ultrasons multiéléments et intelligence artificielle
Coût élevé et préparation complexe	Les applications haut de gamme sont limitées	Production modulaire + fabrication de précision + formage d'équipements par lots
Cycle de vérification de la fiabilité des applications long	En particulier dans les scénarios avec des exigences de fiabilité élevées tels que l'énergie nucléaire et l'aérospatiale	Mettre en place un système expérimental de simulation du comportement de service à long terme et d'adaptabilité environnementale

VI. Résumé

Les plaques composites multifonctionnelles en alliage de tungstène constituent une avancée majeure dans l'utilisation des matériaux à base de tungstène, du support structurel aux applications de couplage multi-domaines. Grâce à la conception composite et au contrôle des interfaces, les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

plaques en alliage de tungstène combinent de multiples propriétés, notamment la résistance mécanique, la conductivité thermique, la résistance aux radiations et la résistance à la corrosion, répondant ainsi aux exigences de performance les plus strictes dans les environnements complexes. À l'avenir, grâce aux progrès de la simulation des matériaux, de la fabrication additive et des plateformes de procédés à haut rendement, les plaques composites multifonctionnelles en alliage de tungstène serviront un large éventail d'industries stratégiques, notamment la défense, l'énergie, l'aérospatiale, la santé et l'électronique, offrant des performances supérieures, une fiabilité accrue et des procédés de fabrication plus flexibles.

10.4 Étude sur l'évolution des performances de service dans des environnements extrêmes (irradiation, haute température, corrosion)

Les plaques en alliage de tungstène sont largement utilisées dans **des environnements extrêmes** tels que l'énergie nucléaire, l'aérospatiale, les systèmes de contrôle thermique et la protection militaire, en raison de leur point de fusion élevé, de leur densité élevée, de leur faible pression de vapeur et de leur excellente stabilité thermique. Cependant, dans des conditions de fonctionnement difficiles, telles que de forts rayonnements, des variations de température élevées et une atmosphère fortement corrosive (gaz halogène, sels fondus et plasma), leurs performances peuvent subir des variations complexes, notamment une évolution organisationnelle, une atténuation des performances et une dégradation de l'interface. Par conséquent, des recherches approfondies sur le comportement en service des plaques en alliage de tungstène dans des environnements extrêmes sont essentielles pour améliorer leur fiabilité à long terme et leur applicabilité technique.

Cette section analysera systématiquement l'effet du rayonnement, la réponse à la charge thermique à haute température, le mécanisme de dégradation dans un environnement corrosif et les méthodes de conception et d'évaluation ciblées pour construire une « image panoramique de l'évolution des performances » des plaques d'alliage de tungstène dans des conditions extrêmes.

1. Modifications microstructurales et effets mécaniques dans un environnement de forte irradiation

1. Sources de rayonnement et niveaux d'énergie typiques

- Irradiation neutronique (réacteurs de fission/fusion nucléaire) : $>10^{18}$ n/cm² ;
- Implantation ionique (He⁺, H⁺, Fe⁺) : peut simuler des dommages par déplacement et des effets de bulles ;
- Rayons gamma/rayons X : simulent les effets thermiques et ionisants des rayonnements.

2. Évolution de la microstructure

- **Boucles de dislocations et agrégation de lacunes** : formation de défauts d'irradiation à l'échelle nanométrique, réduisant la ductilité ;
- **Formation et agrégation de bulles** : précipitation aux joints de grains ou secondes phases, provoquant facilement fragilisation et écaillage ;
- **Ségrégation induite par irradiation** : enrichissement local en éléments d'alliage tels que Ni et Fe, modifiant l'énergie des joints de grains ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Affinage et réorganisation des grains** : un comportement de nano-recristallisation peut être induit sous irradiation à long terme.

3. Dégradation des performances macroéconomiques

- Réduit l'allongement et la résistance aux chocs et augmente la sensibilité à la rupture fragile ;
- Le module d'élasticité et la conductivité thermique diminuent ;
- La durée de vie en fatigue thermique est raccourcie et le mode de défaillance passe de la défaillance plastique à la rupture fragile.

2. Dégradation des performances et évolution organisationnelle sous service à haute température

Les plaques en alliage de tungstène fonctionnent à des températures supérieures à 1000°C, elles sont confrontées à des phénomènes induits par les températures élevées tels que le grossissement des grains, la dégradation de l'interface et la migration des éléments, qui affectent leur stabilité structurelle et leur conductivité thermique.

1. Mécanisme microscopique à haute température

- **Croissance des grains** : entraînée par l'énergie de surface, en particulier dans les systèmes de tungstène pur ou d'alliage avec une faible énergie aux joints de grains ;
- **Redistribution des éléments** : Les éléments d'alliage (tels que Ni et Cu) se ségrèguent ou s'évaporent à haute température ;
- **Transformation par dissolution/précipitation en deuxième phase** : affecte la dureté et le comportement au fluage ;
- **Croissance des vides et des fissures** : les microvides entraînés par les contraintes thermiques évoluent en microfissures et finissent par se rompre.

2. Dégradation des propriétés mécaniques à haute température

- La limite d'élasticité diminue (la température d'initiation du fluage diminue) ;
- La vitesse de fluage augmente et la durée de vie du fluage diminue ;
- Les cycles de fatigue thermique conduisent à un glissement des joints de grains et à un délaminage interlaminaire.

3. Comportement du couplage de charge thermique

- Les cycles de chauffage-refroidissement à haute fréquence accélèrent la fracture de l'interface ;
- Le gradient thermique induit une migration des composants et une accumulation de contraintes internes ;
- La tolérance aux chocs thermiques sous des impulsions transitoires à haute température (telles que le retour d'un vaisseau spatial et la décharge d'impulsions de dispositifs de fusion) doit être prise en compte.

3. Chemins de défaillance et stratégies de protection dans les environnements corrosifs

L'alliage de tungstène peut être confronté à de graves risques de corrosion dans certains milieux, en particulier dans des environnements tels que les gaz halogènes, la vapeur d'eau à haute température, les sels fondus acides et les électrolytes.

1. Type et milieu de corrosion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Corrosion en phase gazeuse** (Cl_2 , H_2O , O_2) : provoque la formation et le décollement de la couche d'oxyde ;
- **Corrosion par sels fondus** (NaCl - KCl , LiF - BeF_2) : pénètre les joints de grains et forme une couche cassante ;
- **Corrosion électrochimique** : En particulier dans les composants électroniques médicaux, les électrodes et autres applications, le système tungstène-Cu est plus sensible ;
- **Corrosion plasma** : La température élevée excite les particules qui bombardent la surface, provoquant une ablation et une désorption atomique.

2. Mécanisme de défaillance par corrosion

- La dissolution anodique locale ou l'oxydation des joints de grains entraîne un délestage des grains ;
- Après la rupture du film de passivation de surface, la corrosion s'intensifie ;
- Le processus d'oxydoréduction alterné affaiblit la densité de surface ;
- Associé à une température/irradiation élevée, le taux de corrosion augmente considérablement.

3. Mesures de protection

- **Revêtement de surface** (CrN , Al_2O_3 , SiC) : assure une protection par passivation à haute température ;
- **Optimisation des éléments d'alliage** : introduire des éléments anticorrosion (Re , Ta , Mo) pour améliorer la résistance à l'oxydation des solutions solides ;
- **Conception de structures composites** : utilisation de plaques composites W-SS/W-Cu pour inhiber l'expansion de la couche de corrosion ;
- **Procédé de densification de surface** : revêtement laser, PVD, etc. sont utilisés pour réduire la porosité de surface.

4. Progrès dans les méthodes d'essai et la recherche en simulation dans les environnements extrêmes

1. Plateforme de test de durée de vie accélérée et de simulation

- Utiliser un équipement d'irradiation externe du réacteur et d'implantation ionique pour simuler l'environnement nucléaire ;
- Une table chauffante à cycle haute fréquence et un dispositif de choc thermique transitoire simulent les charges thermiques aérospace ;
- Le brouillard salin à haute température, la chambre de corrosion électrochimique et la chambre de pulvérisation d'acide fluorhydrique simulent les environnements de corrosion industrielle.

2. Étude de simulation de couplage multi-champs

- Etablir un modèle numérique multi-domaines de chaleur-mécanique-irradiation-corrosion pour prédire l'évolution des performances ;
- Utiliser **la méthode du champ de phase, la dynamique moléculaire, Monte Carlo**, etc. pour simuler le comportement des joints de grains ;
- En combinant la mécanique de la rupture et la théorie de la fatigue, un modèle de prédiction de durée de vie est construit.

3. Surveillance en ligne et évaluation des dommages

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Interféromètre laser pour mesurer la contrainte ;
- Thermographie infrarouge pour évaluer les gradients thermiques ;
- Contrôles non destructifs (ultrasons, scanner à rayons X) pour suivre l'évolution des dommages internes ;
- La reconnaissance d'images par IA est utilisée pour suivre les microfissures et quantifier la progression de la corrosion.

V. Orientation future du développement et stratégies de réponse technique

Orientation du développement	Importance de l'ingénierie
Construction de bases de données Extreme Service	Fournir une base de données pour la sélection des matériaux et la prévision de la durée de vie
Système de contrôle intelligent de perception et de rétroaction	Créer un système de surveillance des dommages en temps réel et d'auto-ajustement des performances pour améliorer la sécurité des matériaux en service
Développement de structures composites multifonctionnelles	Intégrez la résistance à la corrosion, la résistance aux radiations, la résistance aux chocs thermiques et d'autres capacités pour améliorer les performances de service dans des environnements extrêmes
Méthode de conception de durée de vie à haute fiabilité pour la fusion/l'aérospatiale	Répondre aux exigences strictes de durée de vie des plaques de tungstène pour des projets stratégiques tels qu'ITER, l'exploration spatiale et la propulsion à ultra-haute température

VI. Résumé

La résistance des plaques en alliage de tungstène aux environnements extrêmes, tels que les fortes irradiations, les gradients de température élevés et la forte corrosion, est contrôlée par des mécanismes microscopiques complexes. Leur stabilité structurelle et les lois d'évolution de leurs performances déterminent directement leur fiabilité technique. Une compréhension approfondie des modifications microstructurales induites par l'irradiation, de l'évolution des grains et des mécanismes d'endommagement des interfaces à haute température, ainsi que des voies de défaillance en milieu corrosif, permettra de guider le développement de nouveaux systèmes de matériaux et la conception de nouvelles structures. À l'avenir, nous devrions renforcer l'intégration interdisciplinaire, la modélisation numérique et les liens entre la vérification sur le terrain afin de promouvoir les plaques en alliage de tungstène vers l'objectif de « matériaux de structure adaptatifs aux environnements extrêmes ».

10.5 Matériaux alternatifs hautes performances et stratégies futures de développement durable pour les plaques de tungstène

Alors que l'industrie mondiale évolue vers un poids plus léger, des performances accrues et une protection environnementale durable, les plaques d'alliage de tungstène présentent des avantages uniques, tels qu'une densité, un point de fusion et une radioprotection extrêmement élevés. Cependant, leur coût élevé, la rareté des ressources, la difficulté de mise en œuvre et la sensibilité environnementale limitent également leurs applications à grande échelle. Afin d'atteindre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'équivalence fonctionnelle ou la substitution partielle, tout en réduisant la dépendance aux ressources en tungstène, la communauté scientifique des matériaux explore activement divers **systèmes de matériaux alternatifs hautes performances** et réfléchit au **développement durable** des plaques de tungstène elles-mêmes.

Cette section abordera les quatre aspects du chemin de substitution des matériaux, de la technologie de fabrication verte, du système de recyclage et de la stratégie durable de l'industrie, et proposera des solutions réalisables pour que les plaques en alliage de tungstène continuent de maintenir leur compétitivité dans la future fabrication haut de gamme.

1. Orientation de développement de matériaux alternatifs fonctionnels à hautes performances

Bien que les plaques en alliage de tungstène soient souvent difficiles à remplacer complètement, plusieurs systèmes de matériaux offrent déjà des performances et des avantages économiques compétitifs dans certaines applications. Les principales alternatives sont :

1. Système de matériaux métalliques à point de fusion élevé

- **Plaque en alliage de molybdène (Mo, TZM)** : densité légèrement inférieure ($10,2 \text{ g/cm}^3$), bonne conductivité thermique, meilleure aptitude au traitement que le tungstène, adaptée aux environnements de champ chaud ;
- **Alliages à base d'hafnium et de niobium** : excellente résistance à haute température, mais faible résistance à la corrosion ;
- **Matériaux à base de rhénium** : Ils présentent une excellente stabilité dans les environnements à très haute température ($> 2000^\circ\text{C}$), mais sont extrêmement coûteux et ne sont utilisés que dans des dispositifs aérospatiaux spéciaux.

2. Matériaux composites à haute densité

- **Plaque composite en polymère de tungstène (W-polymère)** : transformée en plaque de protection légère par moulage par injection ou collage, adaptée aux scénarios de protection médicale et radiologique ;
- **Panneau composite fonctionnel W-Cu** : Combinant haute densité et haute conductivité thermique, il convient à la dissipation thermique des engins spatiaux et à la gestion thermique des appareils électroniques ;
- **Plaques composites oxyde de terre rare-métal (telles que Gd-W, $\text{La}_2\text{O}_3\text{-W}$)** : améliorent la capacité d'absorption du rayonnement et améliorent la résistance aux chocs thermiques.

3. Céramiques et composites à matrice céramique

- **Plaques céramiques renforcées en carbure de silicium (SiC) et nitrure de bore (BN)** : Elles présentent une excellente résistance à l'oxydation à haute température et des propriétés diélectriques et peuvent être utilisées pour la protection du contrôle thermique ;
- **Composés intermétalliques (tels que TiAl, MoSi_2)** : légers, bonne résistance à haute température, mais conductivité thermique limitée.

4. Nouveaux matériaux à gradient fonctionnel (FGM)

En modifiant progressivement la composition ou la structure dans le sens de l'épaisseur, la régulation des contraintes thermiques et le soulagement des contraintes d'interface peuvent être

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

obtenus, remplaçant partiellement la structure de la plaque de tungstène multicouche et offrant une meilleure adaptabilité technique.

2. Stratégie de fabrication durable des plaques en alliage de tungstène

En plus du remplacement, la plaque de tungstène elle-même doit être systématiquement optimisée autour de « l'économie d'énergie, la réduction de la consommation et la réduction du carbone » tout en conservant ses avantages de haute performance.

1. Technologie de métallurgie des poudres vertes

- Développer des auxiliaires de frittage à basse température et à haute densité ;
- Utiliser la sphéroïdisation au plasma, le broyage à billes à haute énergie et d'autres méthodes pour améliorer le taux de rendement ;
- Réduire la proportion de gaz inerte utilisé dans le frittage atmosphérique et favoriser la réduction propre de l'hydrogène.

2. Technologie de fabrication additive (impression 3D)

- pièces structurelles en tungstène avec des configurations complexes, le dépôt d'énergie dirigée par laser (DED) et la fusion par faisceau d'électrons (EBM) sont utilisés pour fabriquer à la demande afin de réduire le gaspillage de matériaux ;
- Améliorez efficacement l'efficacité de fabrication de plaques d'alliage de tungstène en petits lots/personnalisées.

3. Traitement de surface économe en énergie et technologie composite

- Utiliser le dépôt de couches minces vertes telles que PVD et CVD pour remplacer la galvanoplastie ;
- Utiliser des méthodes de traitement non thermiques telles que la modification de surface au laser, la projection à froid, la projection au plasma, etc. pour réduire la consommation d'énergie ;
- Promouvoir la structure composite du substrat renouvelable et de la couche de surface en tungstène pour améliorer le rapport performance/coût global.

3. Recyclage et réutilisation des plaques d'alliage de tungstène

Le tungstène est un métal stratégique national clé, et sa récupération des ressources et son recyclage sont devenus le maillon essentiel du développement durable de l'industrie.

1. Méthodes de recyclage des plaques de tungstène

- Les déchets industriels sont directement recyclés ou retraités mécaniquement ;
- Extraire la poudre de tungstène métallique des appareils mis au rebut et préparer de nouvelles plaques d'alliage ;
- Le revêtement de surface est décapé puis pressé/fritté pour former une feuille secondaire.

2. Remanufacturing et chaîne de processus « zéro déchet »

- Pour résoudre le problème de dégradation des performances lors de la régénération des plaques de tungstène, une réglementation sur les microalliages a été introduite ;
- Restauration de l'intégrité cristalline du tungstène à l'aide de la technologie de lyse plasma/traitement thermique ;
- Promouvoir le projet pilote de recyclage des plaques d'alliage de tungstène dans les centrales nucléaires et les équipements militaires hors d'usage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Établissement de normes nationales et internationales de recyclage

- Mettre en place un système de certification pour le recyclage des matériaux à base de tungstène (tel que GRS, ISO 14021) ;
- Promouvoir l'extension des responsabilités en matière de « recyclage vert » dans des domaines d'utilisation clés tels que les équipements médicaux et aéronautiques ;
- Utilisez la blockchain et les plateformes Big Data pour suivre l'ensemble du cycle de vie des matériaux en tungstène.

4. Faible carbonisation et perspectives stratégiques des plaques en alliage de tungstène dans le futur

Parcours de développement durable	Objectifs clés	Mises en œuvre potentielles
Réduire l'empreinte carbone et les émissions totales	Répondre aux contraintes politiques mondiales en matière de pic de carbone/neutralité carbone	Utiliser l'électricité verte pour la fusion, introduire une technologie à faible émission de carbone et intégrer un mécanisme d'échange de carbone dans la chaîne industrielle
Ouvrir la « boucle verte fermée » de la chaîne industrielle	Construire une piste cyclable complète de ressources → produits → recyclage → régénération	Établir des normes industrielles, soutenir les plateformes de recyclage et fixer des quotas de recyclage
Développement de panneaux fonctionnels personnalisés pour la fabrication haut de gamme	Répondre aux nouvelles exigences d'intégration structurelle et fonctionnelle dans les environnements de service extrêmes	Promouvoir les composites transfrontaliers « tungstène + », les plaques structurelles modulaires et la fabrication additive multifonctionnelle
Diversification, sécurité et stabilité des chaînes d'approvisionnement mondiales	Réduire la dépendance à une seule ressource/origine	Développer des ressources à l'étranger et construire des lignes de production locales de raffinage et de fabrication intelligente

V. Résumé

Les plaques en alliage de tungstène occupent toujours une place incontournable dans la fabrication haut de gamme. Cependant, face à la nouvelle situation de pénurie mondiale de ressources, au durcissement des exigences environnementales et à l'accélération des progrès technologiques, l'exploration de matériaux alternatifs, l'optimisation des procédés de fabrication et la promotion du recyclage et de la fabrication écologique constituent la seule voie pour assurer un développement durable à long terme. L'avenir des plaques en alliage de tungstène ne se résume plus à une compétition entre matériaux uniques, mais à une compétition globale combinant « système matériau + système procédé + filière industrielle ». Ce n'est qu'en poursuivant nos efforts pour une production verte, bas carbone, performante et intelligente que les plaques en tungstène pourront continuer à jouer un rôle important dans le futur système de fabrication.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe

Annexe 1 : Paramètres physiques/mécaniques communs des plaques en alliage de tungstène

Nom du projet	unité	Plaque de tungstène pur (W)	Plaque en alliage W-Ni-Fe	Plaque en alliage W-Ni-Cu	Panneau composite W-Cu
Densité théorique	g/cm ³	19h25	17,0 à 18,5	17,0~18,2	14,5 à 17,0
Point de fusion	°C	3410	3300~3400	3200~3400	~3000 (environ)
Chaleur spécifique (température normale)	J/(kg·K)	134	140~160	140~160	170~180
Conductivité thermique (25°C)	W/(m·K)	170~180	70~110	80~120	180~220
Coefficient de dilatation thermique	10 ⁻⁶ /K	4,5 à 5,0	5,0 à 8,0	6,0 à 8,5	6,5 à 10,0
Résistivité (20°C)	μΩ·cm	5.4~5.7	15 à 35	20 à 40	2 à 4
résistance à la traction	MPa	700~1000	700~1000	600~900	400~600
Limite d'élasticité	MPa	600~850	600~900	550~850	300~500
Élongation	%	<3	10~30	10~30	5 à 15
Dureté Brinell (HB)	-	>300	200~300	180~280	120~220
Dureté Shore (HRB)	-	>100 (HRC approximatif)	80~95	75~90	60~85
Résistance à la corrosion (dans une atmosphère à température normale)	-	excellent	bien	bien	en général
magnétique	-	aucun	avoir	Faibles propriétés magnétiques (certains en ont)	aucun
Performances de protection contre les radiations (rayons gamma)	d=taux de blocage de 10 mm	>85%	>80%	>80%	>75%

illustrer:

- Plaque de tungstène pur (W) : présente la densité, le point de fusion et la dureté les plus élevés, et est souvent utilisée dans des conditions de travail extrêmes, telles que le contrôle thermique à haute température et la radioprotection. Son inconvénient est sa difficulté d'usinage et sa fragilité.
- Plaque en alliage W-Ni-Fe : elle est représentative des alliages à haute densité, présente une bonne ténacité mécanique et une densité équilibrée, et est largement utilisée dans les pièces inertielles et les plaques de protection ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Plaque en alliage W-Ni-Cu : présente une bonne conductivité thermique et est non magnétique, adaptée au blindage électromagnétique et au contreponds haute densité ;
- Panneau composite W-Cu : Il présente les avantages de la conductivité thermique, de la conductivité électrique et de la densité, et est souvent utilisé dans les structures de gestion thermique électronique et les supports de composants micro-ondes.

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

Code de marque/norme	Pays/Norme	Type d'alliage	Principaux composants chimiques (fraction massique, %)	Caractéristiques
W1 (ASTM B760)	ASTM	Tungstène pur	W ≥ 99,95	Feuille de tungstène de haute pureté, utilisée pour le champ thermique, les appareils à vide, etc.
W-3Ni-7Fe (alliage de tungstène lourd)	Nomenclature industrielle courante	alliage W-Ni-Fe	W ≈ 90, Ni ≈ 3, Fe ≈ 7	Alliage de tungstène haute densité, avec à la fois résistance structurelle et ténacité
W-7Ni-3Cu	Nomenclature industrielle courante	alliage W-Ni-Cu	W ≈ 90, Ni ≈ 7, Cu ≈ 3	Alliage de tungstène non magnétique, adapté aux domaines de l'électronique et de la protection
WCu75 (ou WCu25)	Nomenclature industrielle courante	Matériau composite tungstène-cuivre	W ≈ 75, Cu ≈ 25	Plaque de cuivre tungstène à haute conductivité thermique pour la dissipation de la chaleur et la structure de mise à la terre
YW1 (YS/T 798)	Normes de l'industrie chinoise des métaux non ferreux	Tungstène Nickel Fer	W ≥ 90, Ni:Fe ≈ 7:3	Qualité générale pour composants inertiels militaires et plaques de contrepois
YW2 (YS/T 798)	Normes de l'industrie chinoise des métaux non ferreux	Système tungstène-nickel-cuivre	W ≥ 90, Ni:Cu ≈ 7:3	Feuille non magnétique à haute densité, utilisée dans le traitement médical, les instruments, etc.
G26F (MIL-T-21014)	Norme militaire américaine MIL	alliage W-Ni-Fe	W ≈ 90, Ni ≈ 6, Fe ≈ 4	Alliage de tungstène standard militaire, projectile perforant, compartiment de queue de missile, etc.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W90NiFe (ISO 3767)	Normes internationales ISO	alliage W-Ni-Fe	W ≈ 90, Ni + Fe ≈ 10	Description standard des alliages généraux à haute densité
K20W (DIN EN)	Normes allemandes DIN/EN	composites W-Cu	W ≈ 80, Cu ≈ 20	tungstène à haute conductivité conforme aux normes européennes, adapté aux dispositifs de contrôle thermique
WL10 (dopé au tungstène pur)	Utilisé à l'échelle internationale (ASTM/ISO)	Tungstène dopé	W ≥ 98,5, La ₂ O ₃ ≈ 1,0~1,2	Le tungstène dopé au lanthane améliore la stabilité thermique et la résistance aux fissures.
WD100 (marque de l'entreprise)	CTIA GROUP LTD (code interne)	Plaque de tungstène microallié	W ≥ 92, total des éléments de microalliage tels que Ni, Re, Ta ≤ 5	Alliage développé par nos soins, prenant en compte la résistance, la résistance aux radiations et la conductivité thermique
TCW6025	marque d'entreprise japonaise	alliage W-Cu	W ≈ 60, Cu ≈ 40	Convient aux composants micro-ondes, aux plaques de dissipateur thermique, etc.
WC20 (pour électrodes)	ISO 6848	Tungstène dopé	W ≥ 98, CeO ₂ ≈ 2,0	Le tungstène dopé est généralement utilisé pour les électrodes de soudage, mais certaines plaques utilisent également

illustrer:

- Les plaques d'alliage de tungstène de la série W-Ni-Fe / W-Ni-Cu sont les types d'alliage de tungstène à densité élevée les plus couramment utilisés ;
- La série WCu est principalement utilisée pour les structures conductrices thermiques et électriques, telles que les emballages électroniques et les modules de dissipation thermique ;
- **Le dopage au tungstène (tel que La₂O₃, CeO₂)** peut améliorer la résistance aux chocs thermiques tout en maintenant une résistance à haute température ;
- Bien que les normes des différents pays soient légèrement différentes, elles peuvent être comparées et identifiées grâce à l'intervalle des composants et à la logique de la marque ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les marques propres de la société (telles que la série CTIA GROUP LTDWD) sont généralement personnalisées et utilisées pour répondre à des scénarios de demande particuliers.

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

en.com

www.ch

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

1

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe 3 : Documents normatifs et principaux documents de référence relatifs aux plaques en alliage de tungstène

I. Normes nationales et réglementations industrielles

1. La norme nationale GB/T 18928-2017 relative aux conditions techniques des plaques de tungstène et d'alliage de tungstène spécifie les exigences techniques, les méthodes d'essai et les règles d'inspection des plaques de tungstène et d'alliage de tungstène.
2. La norme YS/T 798-2012 Spécifications techniques pour les tiges en alliage de tungstène est une norme industrielle sur les métaux non ferreux qui couvre la composition, les propriétés et les méthodes d'essai des matériaux en alliage de tungstène.
3. Spécification technique pour les plaques d'alliage de tungstène haute densité pour les centrales nucléaires Normalise les exigences matérielles et les normes d'application des plaques d'alliage de tungstène pour l'industrie de l'énergie nucléaire.
4. Q/ZW 001-2020 CTIA GROUP LTD Tungsten Alloy Plate Enterprise Standard est une norme interne de l'entreprise, couvrant la conception, la fabrication et le contrôle qualité des plaques en alliage de tungstène.

II. Normes et standards internationaux

1. Spécification standard ASTM B760-17 pour les plaques de tungstène et d'alliage de tungstène
Norme de l'American Society for Testing and Materials, qui spécifie en détail les propriétés et les méthodes d'essai des plaques de tungstène et d'alliage de tungstène.
2. La norme ISO 3767-1:2017 Tungstène et alliages de tungstène — Partie 1 : Tôles et feuilles
a été publiée par l'Organisation internationale de normalisation et couvre la classification et les exigences techniques des plaques en alliage de tungstène.
3. Spécification militaire MIL-T-21014D : plaque, barre et tige en alliage lourd de tungstène
Norme militaire américaine pour l'utilisation militaire et le contrôle qualité des alliages lourds de tungstène.
4. EN 1654-1:2018 Métaux lourds et alliages à haute densité — Conditions techniques de livraison — Partie 1 : Produits en alliages lourds de tungstène
est une norme européenne couvrant les conditions de livraison et les spécifications d'essai des alliages de tungstène.

3. Livres et documents techniques importants

1. « Manuel technique du tungstène et des alliages de tungstène », Metallurgical Industry Press, 2020
Présente de manière exhaustive les propriétés physiques, les procédés de fabrication et les technologies d'application du tungstène et des alliages de tungstène.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Manuel international
faisant autorité sur les métaux, bases des matériaux en alliage de tungstène et analyse des performances.
3. « Développement et application d'alliages lourds de tungstène dans l'aérospatiale », Journal of Materials Science, 2018
, détaille les derniers progrès de la recherche et du développement d'alliages lourds de tungstène dans le domaine aérospatial.
4. Étude de cas sur la technologie de la métallurgie des poudres d'alliages de tungstène et son application industrielle, numéro 5, 2019.

IV. Littérature de brevets typique

1. CN101234567B L'invention concerne un procédé de préparation d'une plaque d'alliage de tungstène à haute densification,
et concerne une technologie de préparation de plaque d'alliage de tungstène d'un nouveau procédé de métallurgie des poudres.
2. US9876543B2 Feuille d'alliage de tungstène avec conductivité thermique améliorée
Conception de matériau composite avec conductivité thermique améliorée de la feuille d'alliage de tungstène.
3. EP3456789A1 Méthode de revêtement pour plaques en alliage de tungstène
Technologie de revêtement de surface et de traitement anti-usure des plaques en alliage de tungstène.

5. Conférences universitaires et rapports industriels

1. La conférence internationale sur le tungstène
rassemble les dernières technologies et tendances de l'industrie dans le domaine des matériaux en tungstène.
2. Les actes de la réunion annuelle de la branche tungstène et molybdène de la Société chinoise des métaux non ferreux
se sont concentrés sur les progrès technologiques et l'analyse du marché des alliages de tungstène chinois.
3. « Rapport d'analyse des tendances du marché des plaques en alliage de tungstène », CTIA GROUP LTD,
rapport de l'industrie 2024, détaille la production et les ventes mondiales de plaques en alliage de tungstène et les tendances futures.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe 4 : Glossaire des alliages de tungstène et abréviations anglaises

Terminologie (chinois)	Terminologie (anglais)	Interprétation et explication
Alliage de tungstène	Alliage de tungstène	avec du tungstène comme composant principal et des métaux ajoutés tels que le nickel, le fer et le cuivre.
Métallurgie des poudres	Métallurgie des poudres	Le processus de préparation de matériaux métalliques par formage de poudre et frittage.
frittage	Frittage	Processus de densification de particules de poudre à haute température.
Pressage isostatique	Pressage isostatique	Une technologie qui utilise une pression uniforme pour presser la poudre et lui donner une forme.
Traitement thermique	Traitement thermique	Méthode permettant de modifier la structure et les propriétés des matériaux par chauffage, isolation et refroidissement.
Microstructure	Microstructure	Les caractéristiques structurelles internes d'un matériau au microscope.
densité	Densité	Masse par unité de volume, généralement exprimée en g/cm ³ .
résistance à la traction	Résistance à la traction	La contrainte maximale d'un matériau sous tension.
Limite d'élasticité	Limite d'élasticité	La contrainte à laquelle un matériau commence à se déformer plastiquement.
Élongation	Élongation	Capacité d'un matériau à se déformer plastiquement avant de se rompre, exprimée en pourcentage.
dureté	Dureté	La capacité à résister à la déformation locale est souvent mesurée à l'aide d'indicateurs tels que la dureté Brinell (HB) et la dureté Rockwell (HR).
Coefficient de dilatation thermique	Coefficient de dilatation thermique	La vitesse à laquelle un matériau se dilate en réponse à un changement de température.
Conductivité thermique	Conductivité thermique	La capacité d'un matériau à transférer la chaleur, mesurée en W/(m·K).
Résistivité	Résistivité électrique	La résistance actuelle d'un matériau, mesurée en $\mu\Omega \cdot \text{cm}$.
Résistance à la corrosion	Résistance à la corrosion	La capacité d'un matériau à résister à la corrosion chimique ou électrochimique.
Protection contre les rayons gamma	Protection contre les rayons gamma	Capacité de l'alliage de tungstène à absorber et à bloquer les rayons gamma à haute énergie.
Essais non destructifs	Contrôles non destructifs (CND)	Méthodes de test qui ne détruisent pas l'intégrité du matériau, telles que les tests par ultrasons, rayons X et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		particules magnétiques.
Taille des particules	Taille des particules	La taille des particules de poudre affecte la densification et les performances du matériau.
PVD	dépôt physique en phase vapeur	Dépôt physique en phase vapeur, une technologie de revêtement de surface.
Fabrication additive	Fabrication additive (FA)	La technologie de fabrication de pièces par empilement de matériaux couche par couche est communément appelée impression 3D.
AS9100	Gestion de la qualité aérospatiale	Normes de systèmes de gestion de la qualité pour l'industrie aérospatiale.
ISO 13485	Système de qualité des dispositifs médicaux	Normes du système de gestion de la qualité des dispositifs médicaux.
RoHS	Restriction des substances dangereuses	Directive de l'UE relative à la restriction de l'utilisation de certaines substances dangereuses.
ATTEINDRE	Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des produits chimiques	Règlement de l'UE sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et la restriction des produits chimiques.
Fiche signalétique	Fiche de données de sécurité	Les fiches de données de sécurité fournissent des informations sur l'utilisation sûre des produits chimiques.

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

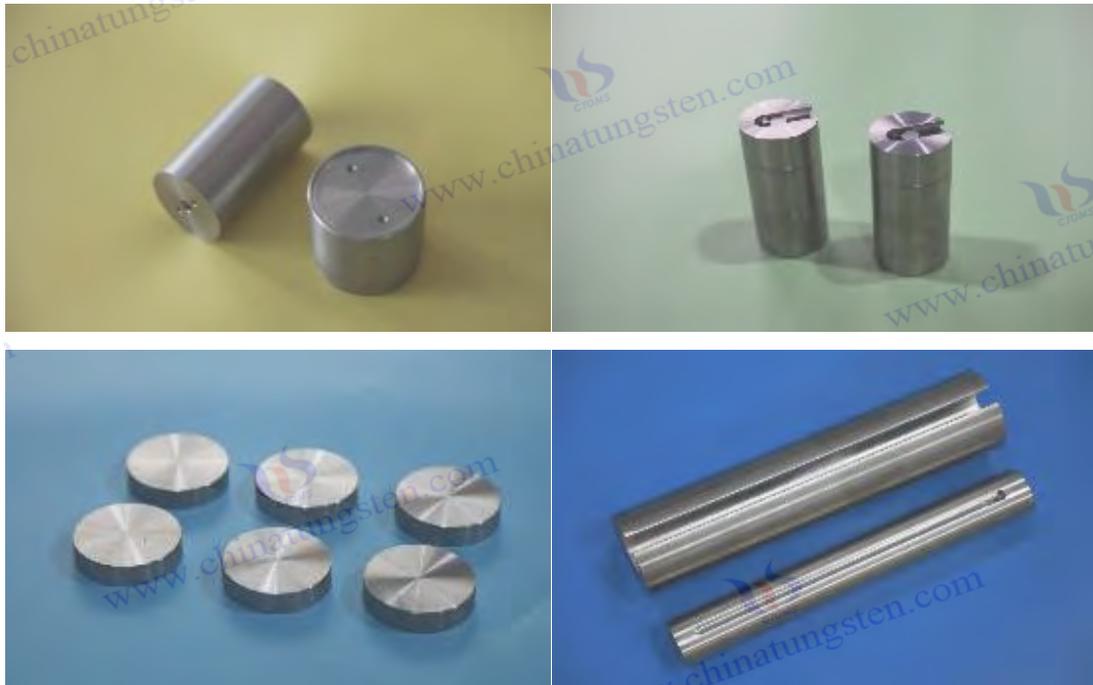
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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