

Encyclopédie des tubes en alliage de tungstène

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

PRÉSENTATION DU GROUPE CTIA

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

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

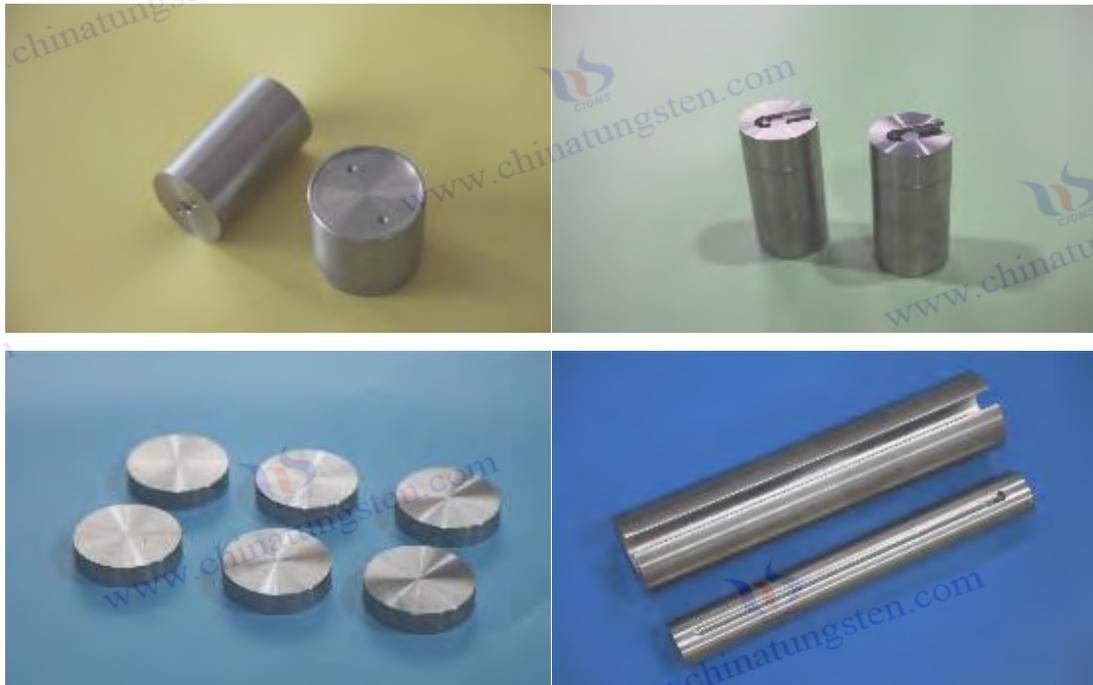
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Table des matières

Chapitre 1 : Concepts de Base et Classification des Tubes en Alliage de Tungstène

- 1.1 Définition et structure de base des tubes en alliage de tungstène
- 1.2 Introduction au système de matériaux des tubes en alliage de tungstène à densité élevée (W-Ni-Fe / W-Ni-Cu)
- 1.3 Principaux paramètres dimensionnels, plage d'épaisseur de paroi et formes standard des tubes en alliage de tungstène
- 1.4 Classification des tubes en alliage de tungstène (par composition, application et procédé)
- 1.5 Analyse comparative des tubes en alliage de tungstène avec les tiges de tungstène, les plaques de tungstène et les tubes tungstène-cuivre

Chapitre 2 : Propriétés Physiques et Mécaniques des Tubes en Alliage de Tungstène

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

Chapitre 3 : Technologie de Préparation et de Formage des Tubes en Alliage de Tungstène

- 3.1 Préparation des matières premières et analyse des propriétés de la poudre pour tubes en alliage de tungstène
- 3.2 Technologie de pressage par métallurgie des poudres pour tubes en alliage de tungstène (moulage, pressage isostatique)
- 3.3 Procédé de formage creux et conception de matrices clés pour tubes en alliage de tungstène
- 3.4 Technologie de frittage et optimisation du contrôle de l'atmosphère pour tubes en alliage de tungstène
- 3.5 Procédé de traitement thermique et technologie d'amélioration de la densification pour tubes en alliage de tungstène
- 3.6 Traitement de surface interne et externe des tubes en alliage de tungstène (polissage, galvanoplastie, PVD, etc.)
- 3.7 Nouvelles technologies de fabrication de tubes en alliage de tungstène : extrusion, laminage et fabrication additive

Chapitre 4 : Tests de Performance et Évaluation de la Qualité des Tubes en Alliage de Tungstène

- 4.1 Méthodes d'essai de l'apparence et des dimensions géométriques des tubes en alliage de tungstène
- 4.2 Essais de densité et caractérisation de la microstructure des tubes en alliage de tungstène
- 4.3 Normes d'essai des propriétés mécaniques des tubes en alliage de tungstène (ASTM, GB, ISO)
- 4.4 Analyse métallographique et observation microstructurale des tubes en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.5 Composition chimique et tests d'impuretés des tubes en alliage de tungstène (ICP, XRF, ONH)

4.6 Méthodes d'évaluation de l'uniformité et de la coaxialité de l'épaisseur de paroi des tubes en alliage de tungstène

4.7 Techniques de détection des défauts de surface et de paroi interne des tubes en alliage de tungstène (courants de Foucault, tomographie, ultrasons)

Chapitre 5 : Domaines d'Application Typiques des Tubes en Alliage de Tungstène

5.1 Tubes en alliage de tungstène pour blindage et enveloppe structurelle dans l'industrie nucléaire

5.2 Tubes en alliage de tungstène pour fonctions structurelles et protectrices dans les systèmes d'armes militaires

5.3 Tubes en alliage de tungstène pour la protection et le positionnement dans les équipements de radiothérapie médicale

5.4 Tubes en alliage de tungstène pour composants inertiels et conduits d'écoulement haute température dans l'aérospatiale

5.5 Tubes en alliage de tungstène pour conduits de dissipation thermique dans les équipements électroniques et de communication

5.6 Tubes en alliage de tungstène pour le support structurel dans les moules industriels et les revêtements résistants à l'usure

Chapitre 6 : Direction de la Recherche et du Développement et de l'Innovation des Tubes Spéciaux en Alliage de Tungstène

6.1 Préparation et optimisation des performances des tubes en alliage de tungstène renforcés par des nanoparticules

6.2 Stratégies de conception et contrôle de la microstructure des tubes en alliage de tungstène microalliés

6.3 Propriétés électriques, thermiques et antimagnétiques composites des tubes en alliage de tungstène multifonctionnels

6.4 Stabilité thermique microstructurale et voies de traitement thermique des tubes en alliage de tungstène haute température

6.5 Étude du mécanisme de liaison d'interface des tubes en alliage de tungstène composites W-Cu/W-Ni

6.6 Revêtements de surface et technologies d'amélioration de la résistance à la corrosion pour les tubes en alliage de tungstène fonctionnalisés

Chapitre 7 : Normes Internationales et Système de Conformité pour les Tubes en Alliage de Tungstène

7.1 Normes nationales/industrielles chinoises pour les tubes en alliage de tungstène (GB/T, YS/T)

7.2 Interprétation du système de normes américain (ASTM, MIL) pour les tubes en alliage de tungstène

7.3 Exigences des normes internationales de l'UE et de l'ISO pour les tubes en alliage de tungstène

7.4 Exigences de conformité environnementale pour les tubes en alliage de tungstène (RoHS, REACH, MSDS)

7.5 Systèmes qualité pour les tubes en alliage de tungstène dans l'aviation, l'énergie nucléaire et les applications médicales (AS9100, ISO13485)

Chapitre 8 : Spécifications d'Emballage, de Stockage et de Transport des Tubes en Alliage de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tungstène

8.1 Sélection des matériaux d'emballage et conception de la protection (vide, séchage, tamponnage) pour les tubes en alliage de tungstène

8.2 Conditions de stockage et exigences anticorrosion et antioxydation pour les tubes en alliage de tungstène

8.3 Spécifications de transport international pour les tubes en alliage de tungstène

8.4 Supervision douanière et demande de licence pour l'exportation de tubes en alliage de tungstène

Chapitre 9 : Structure Industrielle et Tendances du Marché des Tubes en Alliage de Tungstène

9.1 Aperçu des ressources mondiales en tungstène et analyse de la chaîne industrielle des tubes en alliage de tungstène

9.2 Capacité du marché et prévisions de croissance de la demande pour les tubes en alliage de tungstène

9.3 Présentation des tubes en alliage de tungstène du CTIA GROUP

9.4 Impact des fluctuations des prix des matières premières et de la structure des coûts des tubes en alliage de tungstène

9.5 Demande émergente et orientation politique pour les tubes en alliage de tungstène dans la fabrication haut de gamme

9.6 Obstacles techniques et perspectives de développement pour l'industrie des tubes en alliage de tungstène

Chapitre 10 : Frontières de la Recherche et Développement Futur des Tubes en Alliage de Tungstène

10.1 Recherche sur la haute densification et le formage de formes complexes de tubes en alliage de tungstène

10.2 Exploration de l'intégration de la fabrication additive et de la fabrication intelligente de tubes en alliage de tungstène

10.3 Développement intégré et expansion des applications de tubes composites multifonctionnels en alliage de tungstène

10.4 Évolution des performances des tubes en alliage de tungstène dans des environnements de service extrêmes

10.5 Stratégies de développement durable et recherche de matériaux alternatifs pour les tubes en alliage de tungstène

Annexe

- Annexe 1 : Propriétés physiques et mécaniques courantes des tubes en alliage de tungstène
- Annexe 2 : Comparaison des marques courantes et des compositions chimiques des tubes en alliage de tungstène
- Annexe 3 : Compilation des documents normatifs et des données techniques pertinents sur les tubes en alliage de tungstène
- Annexe 4 : Glossaire et abréviations anglaises des tubes en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



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

1.1 Définition et structure de base du tube en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène sont un matériau structurel fonctionnel avancé, composé principalement de tungstène (W) à point de fusion élevé et haute densité, allié à d'autres éléments métalliques tels que le nickel (Ni), le fer (Fe), le cuivre (Cu) et le molybdène (Mo) dans des proportions spécifiques. Ces tubes sont fabriqués par métallurgie des poudres ou par d'autres procédés de formage en tubes creux, cylindriques ou profilés. Les tubes en alliage de tungstène allient la haute densité et la stabilité à haute température du tungstène à la ductilité, l'usinabilité et les propriétés physiques complètes conférées par les éléments d'alliage. Ils sont largement utilisés dans l'industrie nucléaire, l'aérospatiale, les équipements militaires, la protection médicale, le conditionnement électronique et les systèmes de traitement à haute température.

1. Définir l'analyse hiérarchique

Du point de vue de la structure, le cœur d'un tube en alliage de tungstène est composé de 90 à 98 % de tungstène. La formation d'une matrice métallique dense et uniforme, composée de 1 à 10 % d'éléments métalliques tels que Ni, Fe et Cu, permet non seulement de maintenir la densité élevée du tungstène (la masse volumique peut atteindre 17,0 à 18,5 g/cm³), mais aussi d'obtenir un certain degré de plasticité et d'usinabilité.

D'un point de vue structurel, les tubes en alliage de tungstène se présentent généralement sous forme de tubes creux de section circulaire ou rectangulaire. Leur épaisseur de paroi, leur longueur, leur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

diamètre intérieur et leur diamètre extérieur peuvent être personnalisés en fonction des exigences de l'application. L'épaisseur de paroi typique varie de 0,5 mm à 10 mm, et les longueurs peuvent atteindre plusieurs dizaines de centimètres, voire plusieurs mètres. Selon l'environnement d'utilisation, les sections transversales peuvent également être conçues sous forme de structures composites elliptiques, polygonales ou stratifiées afin de répondre aux exigences de répartition des contraintes dans des conditions de travail spécifiques.

En termes de méthodes de fabrication, les tubes en alliage de tungstène sont principalement fabriqués par métallurgie des poudres. Cette méthode consiste à mélanger de la poudre de tungstène avec des éléments d'alliage de manière proportionnelle, à presser et à former le mélange, puis à le densifier et à le fritter sous atmosphère protectrice à haute température pour obtenir une billette d'alliage de tungstène très dense et très résistante. Celle-ci est ensuite usinée, laminée ou extrudée pour obtenir un tube creux aux dimensions et à la précision de surface souhaitées. De plus, ces dernières années, des procédés de fabrication avancés tels que le pressage isostatique à froid (CIP), le pressage isostatique à chaud (CIC) et la fabrication additive laser ont également été appliqués à la production haute performance de tubes en alliage de tungstène.

2. Caractéristiques structurelles et avantages en termes de performances

Les tubes en alliage de tungstène présentent des avantages significatifs dans les applications fonctionnelles en raison de leur structure tubulaire :

1. **Propriétés synergiques de la gravité spécifique élevée et de la conception creuse** : La densité élevée du tungstène permet aux tubes en alliage de tungstène d'obtenir une grande distribution de masse dans un petit volume, ce qui les rend particulièrement adaptés à une utilisation comme pièces inertielles, éléments de contrepoids, manchons de protection contre les radiations, etc. La structure tubulaire permet de réduire la charge sur les zones non fonctionnelles et d'améliorer l'efficacité d'intégration du système.
2. **Bonnes propriétés thermiques et électriques** : Les tubes en alliage de tungstène présentent une excellente stabilité thermique et une excellente conductivité thermique à haute température, ce qui les rend adaptés à une utilisation comme conduits de fluides à haute température, structures de champ thermique et enceintes de protection thermique dans les dispositifs à vide. De plus, leur faible résistivité les rend utiles dans certains blindages électromagnétiques, dispositifs de décharge et éléments chauffants électriques.
3. **Forte contrôlabilité lors de l'usinage structurel** : Comparé au tungstène pur, l'alliage de tungstène présente une certaine usinabilité tout en conservant sa résistance de base grâce à l'introduction d'éléments d'alliage à ductilité accrue. Il permet d'obtenir des dimensions de diamètre intérieur et extérieur et une rugosité de surface de haute précision par tournage, rectification de diamètre intérieur, polissage, etc., répondant ainsi aux exigences d'assemblage les plus élevées.
4. **Forte résistance aux radiations, à la corrosion et à la fatigue** : les tubes en alliage de tungstène sont principalement utilisés dans les environnements à fort rayonnement, tels que les centrales nucléaires et les équipements de radiothérapie. Leurs excellentes propriétés de blindage et leur stabilité structurelle en font un matériau privilégié pour les manchons

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

absorbant les neutrons et les composants bloquant les rayons gamma. Les traitements de surface (tels que le nickelage et les revêtements PVD) peuvent améliorer encore la résistance à la corrosion et prolonger la durée de vie.

3. Différences structurelles du point de vue de la classification

Les tubes en alliage de tungstène présentent souvent des caractéristiques différentes dans la conception structurelle selon différentes méthodes de classification, telles que :

- **Classification par rapport diamètre intérieur/épaisseur de paroi** : Les tubes en alliage de tungstène à paroi mince (épaisseur de paroi < 1 mm) sont principalement utilisés dans des situations avec des exigences strictes de qualité et d'espace, telles que les pièces inertielles aérospatiales ; les tubes en alliage de tungstène à paroi épaisse sont utilisés dans des environnements résistants à la pression et aux chocs, tels que les chemises de noyau et les cylindres de pression.
- **Classification par méthode de formage** : type moulé, type d'extrusion creuse, type de soudage laminé, etc., chacun correspondant à des capacités de précision dimensionnelle et de contrôle des coûts différentes.
- **Classification par fonction d'application** : type de support structurel (tels que tubes de guidage, tubes de cadre), type de blindage et de protection (tels que capots de radioprotection), type de transfert de chaleur et de conductivité électrique (tels que tubes de champ thermique à haute température), etc.

4. Différences entre les tubes en alliage de tungstène et les tubes traditionnels

Comparés aux tubes traditionnels tels que l'acier inoxydable, l'alliage de cuivre et l'alliage de titane, les tubes en alliage de tungstène sont uniques dans les aspects suivants :

- Densité plus élevée, résistance aux radiations plus forte et possibilité d'obtenir un effet de barrière identique ou supérieur avec des parois de tube plus minces ;
- Le point de fusion élevé (le tungstène atteint 3410°C) lui confère une excellente stabilité structurelle à haute température ;
- L'opacité électromagnétique le rend adapté aux structures de blindage et de suppression dans des bandes spéciales ;
- La résistance structurelle est supérieure à celle de l'alliage de titane, la résistance à l'usure est meilleure que celle de l'alliage de cuivre et la résistance à la corrosion peut être améliorée par revêtement.

V. Résumé

En résumé, les tubes en alliage de tungstène sont un matériau structurel creux alliant haute densité, résistance élevée, excellente stabilité thermique et polyvalence fonctionnelle. Leur définition ne se limite pas à la forme d'un tube, mais représente également un système de matériaux techniques aux propriétés composites extrêmement robustes. Avec les progrès constants des technologies de préparation et des exigences d'application, la forme structurelle et la configuration fonctionnelle des tubes en alliage de tungstène continueront d'évoluer, vers une précision accrue, un poids plus léger et une meilleure intégration.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 Introduction au système de matériaux de tubes en alliage de tungstène lourd (W-Ni-Fe / W-Ni-Cu)

Le tube en alliage de tungstène haute densité est un matériau métallique multiphasé composé principalement de tungstène (W) (généralement de 85 à 98 %), complété par une certaine proportion de nickel (Ni), de fer (Fe) ou de cuivre (Cu). Grâce à sa densité extrêmement élevée (généralement $\geq 17,0 \text{ g/cm}^3$), à son excellente résistance mécanique et à sa bonne usinabilité, il est largement utilisé dans des domaines haut de gamme tels que les structures de protection, les composants inertiels, les boîtiers résistants aux radiations et les conduits de l'industrie nucléaire.

Parmi les alliages tubulaires en alliage de tungstène, les alliages **W-Ni-Fe** et **W-Ni-Cu** sont actuellement les deux alliages de tungstène haute densité les plus populaires. Grâce à différents ratios d'éléments et à des méthodes de contrôle de la microstructure, ils permettent d'obtenir un équilibre organique entre propriétés mécaniques, propriétés électromagnétiques et stabilité de service, tout en maintenant une densité élevée.

1. Introduction au tube en alliage de tungstène du système W-Ni-Fe

1. Caractéristiques du système

Les alliages W-Ni-Fe sont généralement constitués de tungstène (90 à 97 %) comme matrice primaire, le nickel et le fer constituant le liant (généralement Ni:Fe = 7:3 à 1:1). Ils présentent une structure biphasée ou triphasée, les particules de tungstène étant entourées d'une matrice continue d'alliage γ -Ni-Fe. Cette structure confère **une résistance élevée, une ductilité élevée et une bonne usinabilité**.

2. Avantages de l'application

- **Haute résistance et haute ténacité** : la résistance à la traction typique peut atteindre 800 à 1 000 MPa et l'allongement est compris entre 10 et 30 %, adapté aux composants structurels soumis à des environnements de contraintes complexes.
- **Excellente soudabilité et usinabilité** : Comparé aux matériaux en tungstène pur, le système W-Ni-Fe présente de meilleures performances de traitement, ce qui est pratique pour le traitement des trous profonds, le polissage des cercles internes et externes et le soudage de précision.
- **Forte résistance aux radiations** : La teneur élevée en tungstène lui confère d'excellentes capacités de protection contre les rayons gamma et les rayons X, et est largement utilisée dans les structures creuses, les boîtiers de protection, les canaux de contrôle thermique, etc. dans l'industrie nucléaire.

3. Scénarios d'application typiques

- Tubes d'absorption de neutrons de réacteurs nucléaires et gaines de blindage d'équipements de traitement des déchets nucléaires ;
- appareil de radiothérapie médicale ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Manchons inertiels haute densité ou stabilisateurs structurels dans les missiles ou les engins spatiaux.

2. Introduction au tube en alliage de tungstène du système W-Ni-Cu

1. Caractéristiques du système

Le système W-Ni-Cu utilise également le tungstène comme composant principal, complété par du nickel et du cuivre comme phase liante. Le rapport Cu/Ni est généralement compris entre 1:1 et 3:7. Dans ce système, le Cu remplace le Fe comme élément secondaire, formant ainsi une **phase liante amagnétique**. Il en résulte généralement une structure plus uniforme et une meilleure conductivité électrique et thermique.

2. Avantages de l'application

- **Système de matériaux non magnétiques** : la structure sans fer le rend adapté aux environnements de champ magnétique hautement sensibles, tels que l'IRM, la détection magnétique sensible et d'autres équipements.
- **Meilleure conductivité électrique et thermique** : Il a une résistivité inférieure et une conductivité thermique supérieure à celle du système W-Ni-Fe, et peut jouer un rôle important dans le blindage électromagnétique et les canaux de conduction thermique.
- **Plage de densité contrôlable** : La plage de contrôle de la densité est large (16,5~18,0 g/cm³), qui peut être ajustée avec précision en fonction des exigences des différentes structures de tubes.

3. Scénarios d'application typiques

- Canaux de contrôle thermique pour emballage avionique ;
- Composants de détecteurs non magnétiques pour équipements de physique des hautes énergies ;
- Couche de protection contre les radiations dans les équipements haute fréquence ou les systèmes de protection contre les micro-ondes.

3. Analyse comparative de deux systèmes majeurs (applicable aux tubes en alliage de tungstène)

Dimension de comparaison	Système W-Ni-Fe	Système W-Ni-Cu
Structure organisationnelle	Particules de tungstène + phase liante Ni-Fe	Particules de tungstène + phase de liaison Ni-Cu
Force/ténacité	Supérieur (résistance à la traction 800~1000 MPa, allongement 15%~30%)	Haute (résistance à la traction 600~800 MPa, allongement 10%~20%)
Performances de traitement	Bon, adapté à l'usinage et au soudage	Meilleur, particulièrement adapté au formage de précision et au perçage de trous profonds

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Propriétés électromagnétiques	magnétisme faible	Non magnétique
Conductivité électrique et thermique	moyen	Mieux
Instructions d'application	Porteurs structurels, pipelines de protection, structures militaires	Blindage médical, contrôle thermique électronique, détection de contrôle magnétique

4. Exploration d'autres systèmes matériels

Outre les systèmes W-Ni-Fe et W-Ni-Cu, la recherche sur les tubes en alliage de tungstène s'étend également à d'autres systèmes d'alliages multi-éléments, notamment :

- **Tube en alliage W-Ni-Co** : utilisé pour les structures résistantes à la corrosion dans les environnements à haute température et haute pression ;
- **Tube en alliage W-Mo-Ni** : la fusion du molybdène améliore les performances de service à haute température ;
- **Tube composite tungstène-molybdène-nickel-fer** : structure de coexistence multiphasée, avec une meilleure résistance aux chocs thermiques et une meilleure durabilité.

Ce type de système d'alliage contrôlé multi-éléments est utilisé dans des domaines de pointe tels que les dispositifs de fusion nucléaire et les composants de protection des environnements extrêmes, et deviendra l'une des directions de recherche importantes dans le domaine des tubes en alliage de tungstène à l'avenir.

V. Résumé

Les alliages lourds W-Ni-Fe et W-Ni-Cu sont les deux piliers de la production et de l'application des tubes en alliage de tungstène. Le premier se concentre sur la résistance et la sécurité structurelle, ce qui le rend adapté aux applications lourdes telles que l'armée et l'énergie nucléaire. Le second, connu pour ses propriétés amagnétiques et son excellente conductivité thermique et électrique, est largement utilisé en électronique, en médecine et en ingénierie de précision. Chacun présente des avantages en termes de performances et d'application, formant une structure à double ingénierie pour le système de matériaux des tubes en alliage de tungstène. Avec les progrès continus des technologies telles que la métallurgie des poudres, les matériaux composites et la fabrication additive, le système de matériaux des tubes en alliage de tungstène tendra également à être plus diversifié, intelligent et fonctionnellement intégré pour répondre aux défis industriels plus complexes et changeants.

1.3 Principaux paramètres dimensionnels, plage d'épaisseur de paroi et formes standard des tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène, tubes métalliques fonctionnels à haute densité, structure robuste et résistance à la corrosion, sont largement utilisés dans les secteurs militaire, nucléaire, médical,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aérospatial et la fabrication d'équipements haut de gamme. Leur utilisation exigeant souvent une précision structurelle, une stabilité de service et une adaptabilité des procédés extrêmement élevées, le contrôle dimensionnel des tubes en alliage de tungstène devient un indicateur de qualité essentiel. Cette section explique de manière systématique les principaux paramètres dimensionnels, la plage d'épaisseurs de paroi et les caractéristiques de forme standard des tubes en alliage de tungstène dans les applications de production et d'ingénierie réelles, afin de fournir une base détaillée pour la conception, la sélection et la standardisation des matériaux.

1. Définition et méthodes de mesure des principaux paramètres dimensionnels

Les tubes en alliage de tungstène sont composés des paramètres clés suivants :

1. **Diamètre extérieur (OD)** : fait référence au diamètre maximal de la circonférence extérieure du tube en alliage de tungstène, les unités couramment utilisées sont les millimètres (mm) ou les pouces (po).
2. **Diamètre intérieur (ID)** : fait référence au diamètre du pore interne du tube en alliage de tungstène, qui est un indicateur clé affectant le flux de fluide et la capacité de pénétration à l'intérieur du tube.
3. **Épaisseur de paroi** : la moitié de la différence entre le diamètre extérieur et le diamètre intérieur. L'épaisseur de paroi détermine la résistance structurelle, la résistance à la compression et la résistance aux radiations du tube en alliage de tungstène.
4. **Longueur** : La dimension axiale du tube en alliage de tungstène, qui peut être divisée en longueurs fixes (telles que 100 mm, 300 mm, 500 mm) et en longueurs personnalisées selon les besoins.

Habituellement, dans la fabrication de produits ou le contrôle qualité, des instruments tels que **des jauges de diamètre laser, des micromètres de diamètre interne, des jauges d'épaisseur à ultrasons, des systèmes de mesure d'imagerie optique**, etc. sont utilisés pour effectuer des inspections dimensionnelles de haute précision afin de garantir qu'ils répondent aux exigences de conception.

2. Spécifications de taille communes et gamme standard

Selon les pratiques de l'industrie et les besoins des clients, les paramètres dimensionnels des tubes en alliage de tungstène suivent généralement les plages suivantes :

projet	Plages courantes (unités métriques)	illustrer
diamètre extérieur	$\varnothing 1 \text{ mm} \sim \varnothing 150 \text{ mm}$	Les applications spéciales peuvent atteindre plus de $\varnothing 200 \text{ mm}$
diamètre intérieur	$\varnothing 0,5 \text{ mm} \sim \varnothing 145 \text{ mm}$	Assurer une épaisseur de paroi $\geq 0,25 \text{ mm}$, généralement pas moins de 10 % du diamètre extérieur
épaisseur de paroi	0,25 mm à 30 mm	Les tubes à paroi ultra-mince sont utilisés pour les traitements médicaux de précision, tandis que les tubes à paroi épaisse conviennent aux structures de protection.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

longueur	10 mm à 2000 mm	Généralement ≤ 500 mm, les tubes longs nécessitent un contrôle de support de pressage isostatique à chaud
Écart d'épaisseur de paroi	$\pm 0,01$ mm à $\pm 0,2$ mm	Les produits de précision adoptent des normes de tolérance plus strictes

Les tubes en alliage de tungstène destinés à différents usages ont des exigences différentes en matière de précision dimensionnelle, par exemple :

- **Tubes en alliage de tungstène pour radiothérapie** : La tolérance du diamètre intérieur ne doit pas dépasser $\pm 0,02$ mm pour garantir l'étanchéité de la structure enfichable ;
- **Tube en alliage de tungstène à poids inertiel** : se concentre généralement sur la cohérence de la masse totale et de l'épaisseur de la paroi, et la tolérance du diamètre extérieur peut être assouplie à $\pm 0,1$ mm ;
- **Composants de réacteur nucléaire** : se concentrer sur le contrôle de la rugosité des parois internes et de la rectitude axiale pour éviter la concentration des contraintes pendant le service.

3. Relation entre la conception de l'épaisseur de paroi et les exigences d'utilisation

La qualité d'un tube en alliage de tungstène n'est pas seulement liée à sa capacité de charge, mais affecte également la difficulté d'usinage, la capacité de refroidissement, la conductivité thermique et la durée de vie. En général :

- **Structure à parois minces (épaisseur de paroi < 1 mm)** : Convient aux petits équipements médicaux, au refroidissement des microcanaux, au guidage de flux de précision et à d'autres domaines. Sa mise en œuvre est difficile, mais elle offre d'excellentes performances de régulation thermique.
- **Structure à paroi intermédiaire (1 mm ~ 5 mm)** : la plus courante, adaptée à une utilisation polyvalente telle que les contrepoids à haute densité, les embouts militaires, les composants de blindage nucléaire, etc., en tenant compte à la fois de la résistance et de la facilité de traitement.
- **Structures à parois épaisses (> 5 mm)** : principalement utilisées dans les environnements à fort impact, résistants à la corrosion et à une radioprotection élevée, comme les compartiments de queue de missile, les emballages de déchets nucléaires et autres structures. Une compression isostatique à chaud est généralement nécessaire pour éliminer les contraintes résiduelles internes.

Dans la conception réelle, l'épaisseur de la paroi doit être déterminée de manière exhaustive en fonction des facteurs suivants :

- Indicateurs de résistance et de rigidité requis ;
- Différence de pression interne et externe maximale ;
- Exigences d'efficacité du transfert de chaleur ;
- contraintes d'espace limitées;
- Contrôle des coûts matériels.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Géométrie standard du tube en alliage de tungstène

Bien que la forme de base du tube en alliage de tungstène soit un tube cylindrique, il peut être façonné en diverses structures géométriques selon différents environnements d'utilisation et méthodes de traitement :

1. Tube rond standard

- Le type le plus courant, adapté à tous les types de structures à virole , à flux traversant et coaxiales.
- Une bonne concentricité peut être obtenue en utilisant des matrices rotatives ou un pressage isostatique.

2. Tubes carrés et tubes de formes spéciales

- Il est souvent utilisé dans les zones avec des exigences strictes en matière de combinaison structurelle et de positionnement.
- Le processus de production est relativement compliqué et le formage nécessite un pressage directionnel du moule.

3. Tube en alliage de tungstène multicanal

- Un tube à structure poreuse pour la distribution du flux d'air et le support de la microstructure ;
- On le voit souvent dans les expériences de physique des hautes énergies et dans les systèmes de refroidissement des équipements nucléaires.

4. Tube fonctionnel avec filetage ou rainure de positionnement

- Faciliter l'assemblage, la connexion ou la fixation ultérieure ;
- La plupart d'entre elles sont des structures personnalisées.

5. Normes de précision dimensionnelle et comparaison internationale

norme de produit mondiale unifiée pour les tubes en alliage de tungstène, les systèmes de normes suivants sont souvent utilisés pour la conception ou l'acceptation :

- **Chine** : GB/T 3874, YS/T 798 , etc.
- **États-Unis** : ASTM B777, MIL-T-21014, etc. . ;
- **Europe/ISO** : classes de tolérance ISO 2768, ISO 286 , etc.

Selon les besoins réels, il peut être divisé selon les niveaux de précision suivants :

grade	Tolérance d'épaisseur de paroi	Tolérance OD/ID	Zones applicables
Ordinaire	±0,2 mm	±0,3 mm	Contrepoids, pièces structurelles générales
Qualité de précision	± 0,05 mm	±0,1 mm	Composants médicaux, de blindage nucléaire et d'inertie aérospatiale
Qualité ultra-précise	À ± 0,01 mm	À ± 0,02 mm près	Composants d'instruments laser, dispositifs de source lumineuse à haute énergie

Les tubes en alliage de tungstène, utilisés dans le traitement des matériaux et les applications, se distinguent par leur capacité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à atteindre des tolérances dimensionnelles extrêmement strictes et des structures complexes, tout en conservant une densité et une résistance extrêmement élevées. Un choix judicieux du diamètre extérieur, du diamètre intérieur, de l'épaisseur de paroi et de la longueur, ainsi que des technologies de formage et d'essai appropriées, sont essentiels pour garantir leur conformité aux exigences techniques. Grâce aux progrès de la fabrication additive, de l'usinage de précision et des technologies d'essai intelligentes, la synergie entre standardisation dimensionnelle et personnalisation des tubes en alliage de tungstène continuera de s'améliorer, favorisant leur application approfondie dans la fabrication haut de gamme et les applications de service extrêmes.

1.4 Classification des tubes en alliage de tungstène (par composition, application et procédé)

Les tubes en alliage de tungstène, matériau de spécialité offrant une densité élevée, un point de fusion élevé, une excellente résistance mécanique et une bonne résistance à la corrosion, jouent un rôle essentiel dans de nombreux domaines. Afin de mieux répondre aux diverses applications techniques, exigences de traitement et normes relatives aux matériaux, les tubes en alliage de tungstène sont soigneusement classés en plusieurs types lors de leur production et de leur utilisation. Ces normes de classification se concentrent généralement sur **la composition de l'alliage, les domaines d'application typiques et les procédés de fabrication** afin de guider le choix de la conception, l'évaluation des performances et la production standardisée.

Cette section présentera systématiquement les méthodes de classification courantes des tubes en alliage de tungstène dans la pratique de l'ingénierie, fournissant une base de base pour la comparaison des performances, la sélection de la technologie et la correspondance des applications dans les chapitres suivants.

1. Classification par système de composants

Selon la combinaison et la proportion des éléments métalliques, les tubes en alliage de tungstène sont principalement divisés dans les catégories suivantes :

1. Tube en alliage de tungstène W-Ni-Fe (tube tungstène-nickel-fer)

- **Caractéristiques** : Haute densité, bonne ténacité et forte conductivité magnétique.
- **Rapport typique** : le tungstène représente 90 à 97 %, et le reste est constitué de Ni et de Fe dans un rapport de 7:3 ou 1:1.
- **Application** : contrepoids inertiel, insert pare-balles, projectile perforant, tube de protection nucléaire, etc.
- **Adaptation du procédé** : Convient au procédé de métallurgie des poudres + pressage isostatique à chaud (HIP).

2. Tube en alliage de tungstène W-Ni-Cu (tube tungstène-nickel-cuivre)

- **Caractéristiques** : non magnétique, meilleure conductivité que le W-Ni-Fe, forte résistance à la corrosion.
- **Proportions typiques** : 90 à 95 % de tungstène, 5 à 10 % combinés de Ni et Cu.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Applications** : blindage d'équipements à rayons X, composants compatibles IRM, boîtiers de caloducs électroniques.
- **Adaptabilité du processus** : adapté au pressage isostatique et à l'usinage de précision, avec de bonnes propriétés de traitement de surface.

3. Tube en alliage W-Cu (tube tungstène-cuivre)

- **Caractéristiques** : structure composite, conductivité thermique élevée, faible coefficient de dilatation thermique.
- **Application** : Utilisé dans les équipements de contrôle thermique haute fréquence, les manchons de protection d'électrodes, les buses de fusée, etc.
- **Difficultés du processus** : structure inégale, travail à chaud difficile et technologie d'infiltration de cuivre couramment utilisée pour la préparation.

4. Tubes en alliage de terres rares ou en alliage de tungstène micro-allié

- **Éléments ajoutés** : La, Y, Zr, Re, Ti et autres éléments traces ajoutés.
- **Effet de renforcement** : améliore le raffinement du grain, la résistance à la fatigue thermique et la résistance à haute température.
- **Application** : Utilisé dans les équipements plasma, les dispositifs à champ thermique extrême et les tubes intérieurs à microstructure.

2. Classification par finalité

Différentes industries ont des exigences structurelles et de performance spécifiques pour les tubes en alliage de tungstène, qui peuvent être divisés dans les catégories suivantes en fonction de leurs utilisations :

1. Tube en alliage de tungstène pour la protection et le blindage

- **Scénarios typiques** : équipements de protection contre les rayons neutrons/gamma des centrales nucléaires, équipements de radiothérapie et caissons à rayons X.
- **Exigences de performance** : haute densité, non magnétique et absorption de rayonnement stable.
- **Alliages représentatifs** : Principalement le système W-Ni-Cu, certains alliages W-Cu sont également applicables.

2. Gestion des structures militaires et aérospatiales

- **Applications typiques** : enveloppe de noyau de projectile perforant, cavité interne de contrepoids de missile, tube externe de gyroscope inertiel.
- **Exigences de performance** : haute résistance, résistance aux chocs, densité élevée et stabilité à haute température.
- **Alliages représentatifs** : principalement le système W-Ni-Fe, qui possède à la fois des capacités de contrôle de l'énergie structurelle et cinétique.

3. Tubes en alliage de tungstène pour dispositifs de contrôle électronique et thermique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Applications typiques** : tubes thermoioniques, caloducs, dispositifs à micro-ondes, tubes à électrodes de décharge.
- **Focus sur les performances** : conductivité thermique élevée, faible dilatation thermique et bonnes performances de soudage.
- **Recommandation d'alliage** : les tubes en alliage de tungstène non magnétique W-Cu et W-Ni-Cu sont préférés.

4. Tubes médicaux et structurels de haute précision

- **Applications** : Canules de traitement des tumeurs, scanners CT/rayons X, embouts de précision.
- **Focus** : Tolérances extrêmement faibles sur les diamètres extérieurs et intérieurs, non magnétique, sûr et non toxique.
- **Critères de sélection** : alliage non magnétique W-Ni-Cu ou microtubes à paroi ultra-mince personnalisés.

3. Classification par méthode de traitement

La qualité d'un tube en alliage de tungstène influence directement sa structure interne, ses propriétés mécaniques et son domaine d'application. Les différentes méthodes de traitement sont classées selon les catégories suivantes :

1. Tube en alliage de tungstène pressé par métallurgie des poudres

- **Déroulement du procédé** : dosage de poudre métallique → pressage du moule ou pressage isostatique → frittage à haute température → finition.
- **Avantages** : bon contrôle de la densité, adapté aux formes de tubes complexes et grande flexibilité en petits lots.
- **Inconvénients** : densité structurelle limitée, tubes à parois minces et extra-longs difficiles à usiner.

2. Tube en alliage de tungstène filé

- **Objets applicables** : tubes ronds de longueur moyenne et d'épaisseur de paroi uniforme.
- **Caractéristiques** : Améliore la cohérence organisationnelle, améliore les propriétés mécaniques et convient aux structures de coque militaires.

3. Extrusion et laminage à chaud de tubes en alliage de tungstène

- **du processus** : Les billettes en alliage de tungstène sont extrudées ou laminées en tubes à l'état chauffé.
- **Avantages** : haute efficacité, forme de tube stable, adapté à la production de masse standardisée.
- **Limites** : Coût élevé de l'équipement et exigences élevées en matière de plasticité des matériaux.

4. Tube en alliage de tungstène fabriqué par fabrication additive (AM)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Moyens techniques** : fusion sélective par laser (SLM), fusion par faisceau d'électrons (EBM), etc.
- **Applications innovantes** : des structures géométriques complexes (telles que des tubes multi-lumières) et des composants à gradient peuvent être réalisés.
- **Perspectives** : Adapté aux conditions de travail extrêmes et aux applications d'équipements haut de gamme personnalisés.

IV. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène reflètent la personnalisation poussée de leur conception matérielle, la diversité de leurs applications et la spécialisation de leurs procédés de fabrication. La classification par composition permet une adéquation précise aux performances requises ; la classification par application clarifie les objectifs d'utilisation finale ; et la classification par procédé reflète l'adaptabilité de la production et les capacités techniques. À l'avenir, grâce au développement approfondi des alliages de tungstène fonctionnels et à la généralisation des technologies de fabrication intelligente, le système de classification des tubes en alliage de tungstène sera encore plus perfectionné, offrant des solutions de tubes métalliques hautes performances et hautement fiables pour divers projets avancés.

1.5 Analyse comparative des tubes en alliage de tungstène avec des tiges de tungstène, des plaques de tungstène, des tubes en cuivre et tungstène et d'autres matériaux

Grâce à leurs excellentes propriétés physiques, mécaniques et chimiques, le tungstène et ses alliages occupent une place essentielle dans des secteurs clés tels que la fabrication d'équipements haut de gamme, l'énergie nucléaire, l'aérospatiale, la médecine et les applications militaires. Parmi les nombreux matériaux à base de tungstène, les tubes, tiges, plaques et tubes en alliage de tungstène et en cuivre sont les plus courants. Ces matériaux partagent des similitudes de structure, de fonction, de performance et de traitement, mais possèdent chacun des caractéristiques distinctes.

Cette section comparera systématiquement les tubes en alliage de tungstène avec les matériaux mentionnés ci-dessus pour aider les concepteurs, les ingénieurs de sélection de matériaux et les fabricants à faire des jugements plus scientifiques en matière de correspondance et de substitution de matériaux.

1. Comparaison de la morphologie structurelle

Nom du matériau	Forme de base	Description de la structure typique
Tube en alliage de tungstène	Cylindre creux, corps multi-cavités de forme spéciale	Le diamètre extérieur, le diamètre intérieur et l'épaisseur de la paroi sont des paramètres clés
Tige de tungstène	Cylindre plein	Couramment utilisé pour le contrôle du diamètre, la personnalisation flexible de la longueur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Plaque de tungstène	Assiette plate pleine	Contrôle de la largeur × longueur × épaisseur, adapté aux structures de pavage
Tube en cuivre tungstène	Structure creuse composite en tungstène plaqué cuivre	Généralement en composite W-Cu, la conductivité thermique est meilleure que celle du tube en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène se distinguent par leur caractère creux. Cette caractéristique leur confère des avantages irremplaçables dans des domaines tels que le contrôle qualité, la gestion thermique, les canaux de fluides et les gaines de protection.

2. Comparaison des paramètres de performance

projet	Tube en alliage de tungstène	Tige de tungstène	Plaque de tungstène	Tube en cuivre tungstène
densité	17,0–18,8 g/cm ³	18,0–19,2 g/cm ³	18,0–19,2 g/cm ³	14,5–17,0 g/cm ³
Force et ténacité	Haute résistance, ténacité moyenne	Haute résistance et haute rigidité	Rigidité élevée, faible ténacité	Résistance moyenne, excellente conductivité thermique
Conductivité thermique	moyen	Faible à moyen	Faible à moyen	Élevé (> 200 W/ m· K)
Conductivité	en général	en général	en général	Élevé (pour décharge par étincelle uniquement)
Non magnétique	système tungstène nickel cuivre disponible	Principalement magnétique	Principalement magnétique	Non magnétique
Résistance aux radiations	Très fort	Très fort	Très fort	puissant
Prise en charge de la complexité des formes	Haut (peut être transformé en tubes multi-lumières de forme spéciale)	en général	en général	en général

Les tubes en alliage de tungstène excellent en termes de résistance globale, de taille légère et de protection contre les radiations, et sont particulièrement adaptés aux scénarios spéciaux nécessitant **des structures creuses** ou des conceptions **optimisées en termes de poids** .

3. Comparaison des technologies de traitement

Nom du matériau	Méthode de formage	Difficulté de traitement	Méthode de traitement secondaire
Tube en alliage de tungstène	Métallurgie des poudres, pressage isostatique, filage, etc.	Haute (en particulier les tubes à parois minces)	Rectification intérieure et extérieure, tournage fin, polissage de surface

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tige de tungstène	Pressage de poudre, frittage, forgeage	Inférieur	Découpe, meulage, laminage
Plaque de tungstène	Plaques frittées laminées à chaud ou à froid	moyen	Découpe, formage laser, soudage
Tube en cuivre tungstène	Infiltration, extrusion ou injection de poudre de cuivre	Plus haut	Traitement des électrodes, traitement thermique, soudage

Les tubes en alliage de tungstène sont généralement plus difficiles à usiner que les structures solides telles que les tiges et plaques de tungstène, en raison de leur structure creuse et de leur haute densité. La conception de trous intérieurs précis et de parois extrêmement fines impose des exigences très strictes aux équipements et aux procédés.

4. Comparaison des scénarios d'utilisation

Domaines d'application	Tube en alliage de tungstène	Tige de tungstène	Plaque de tungstène	Tube en cuivre tungstène
industrie militaire	Obus perforant, chambre à air du compartiment de queue du missile	Noyau, tige de contreponds	Armure de protection	Électrode de bouche, manchon d'échange thermique
énergie nucléaire	Tubes d'absorption de neutrons, tubes de revêtement de déchets nucléaires	Barres de contrôle, blocs de blindage	Écran réfléchissant, paroi du four	chemise de refroidissement
Médical	Manchon de radiothérapie, collimateur gamma knife	tige de contreponds	bouclier anti-rayons X	Tube transparent à ondes électromagnétiques
Électronique et contrôle thermique	Caloduc, tube de dispositif laser	Noyau de la source de chaleur	Plaque d'absorption micro-ondes	Électrodes haute fréquence, diffuseurs de chaleur
Aérospatial	Tube de masse inertielle de contrôle d'attitude de satellite, cavité haute température de propulseur	Tige de volant d'inertie gyroscopique	Panneaux de protection contre les radiations aérospatiales	Plaque de contrôle thermique, kit d'électrodes

Les tubes en alliage de tungstène sont plus adaptés aux scénarios d'application qui nécessitent un équilibre entre la résistance et le rapport de masse, des structures inertielles symétriques, des canaux de transfert de chaleur ou des coques de radioprotection, montrant leurs avantages techniques irremplaçables.

V. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène partagent le même système de matériaux à base de tungstène que les tiges, les plaques et les tubes tungstène-cuivre en termes de performances fondamentales. Ils diffèrent toutefois considérablement par leur conception structurelle, leur utilisation et leurs procédés de fabrication. Grâce à leur structure creuse et à haute résistance, les tubes en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

alliage de tungstène offrent une plus grande flexibilité d'application grâce à **leur densité élevée, leurs propriétés amagnétiques, leurs propriétés de protection et de guidage de l'écoulement, ainsi qu'un ajustement précis**. La tendance à l'allègement et à la polyvalence des tubes en alliage de tungstène est particulièrement marquée dans les secteurs de l'énergie nucléaire, de l'aéronautique et de l'armée.

Comprendre les similitudes et les différences entre les différents matériaux à base de tungstène permet non seulement une sélection efficace, mais améliore également l'innovation et la fiabilité de la conception structurelle des produits.

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

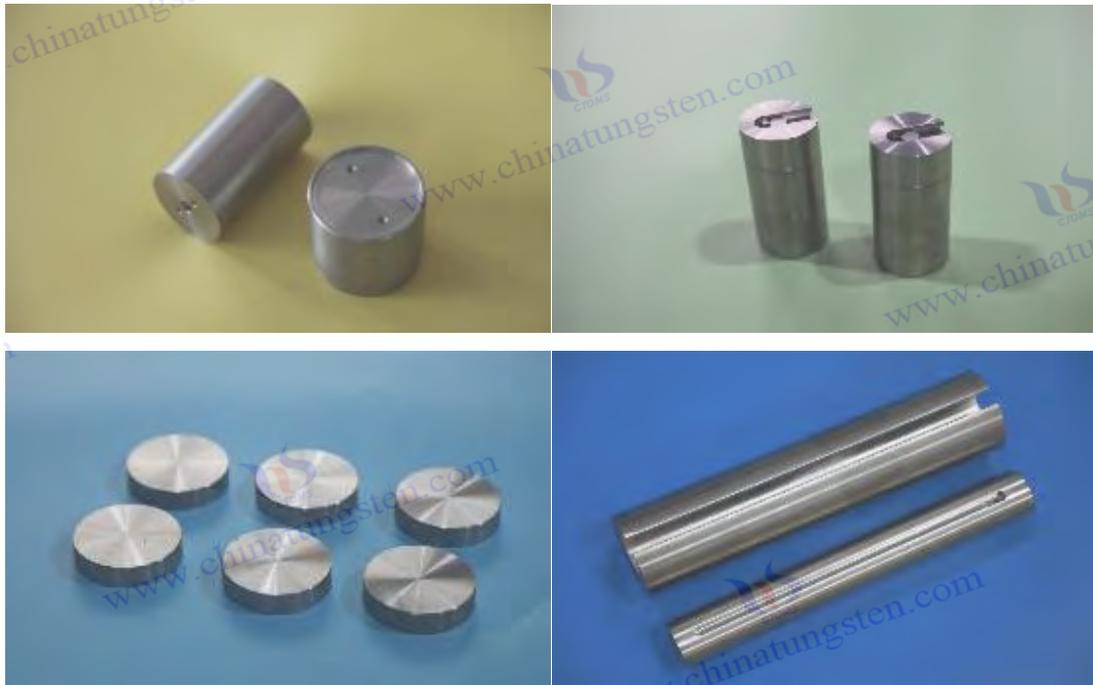
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 du tube en alliage de tungstène

2.1 Densité, gravité spécifique et précision du contrôle dimensionnel des tubes en alliage de tungstène

Matériau technique doté d'une densité élevée, d'une résistance aux températures élevées et d'une stabilité structurelle, les tubes en alliage de tungstène possèdent des propriétés physiques qui déterminent directement leurs performances dans des applications clés telles que la fabrication d'équipements haut de gamme, la protection nucléaire, l'aérospatiale et les instruments de précision.

La densité, la densité et la précision du contrôle dimensionnel sont des indicateurs clés pour évaluer la qualité et les performances des tubes en alliage de tungstène.

1. Plage de densité et de gravité spécifique du tube en alliage de tungstène

La teneur en tungstène des tubes en alliage de tungstène est généralement comprise entre **16,8 et 18,8 g/cm³**, selon la composition de l'alliage, sa densité et le procédé de formage. Les alliages typiques sont les suivants :

Type d'alliage	Principaux composants (pourcentage massique)	Masse volumique théorique (g/cm ³)
Série W-Ni-Fe	W ≈ 90 à 97 %, Ni ≈ 2 à 7 %, Fe ≈ 1 à 3 %	17,5–18,5
Série W-Ni-Cu	W ≈ 85 à 95 %, Ni/Cu ≈ 5 à 15 %	17,0–18,3
Système composite W haute densité	W > 97 %, autres métaux ajoutés en petites quantités	18,8 et plus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La densité est un indicateur clé de la densification et de l'uniformité du matériau. Les tubes en alliage de tungstène sont fabriqués par pressage et frittage par métallurgie des poudres. La densité finale dépend de facteurs tels que la granulométrie de la poudre, la méthode de pressage (pressage isostatique à froid ou pressage à matrice), l'atmosphère de frittage et le contrôle de la température. La microporosité et un compactage irrégulier peuvent avoir un impact significatif sur la densité, en particulier pour les tubes en alliage de tungstène à parois internes minces ou de grandes dimensions, ce qui nécessite une optimisation par pressage isostatique à chaud (CIC) ou densification.

Caractéristiques de densité et intérêt technique des tubes en alliage de tungstène :

La densité est une mesure relative de la masse volumique, définie comme le rapport entre la masse volumique d'un matériau et celle de l'eau (à 4 °C). Les tubes en alliage de tungstène ont généralement une densité comprise entre **17,0 et 18,8**, ce qui en fait un alliage de métaux lourds. Leur densité élevée offre les avantages techniques clés suivants :

- **Augmentation du poids inertiel** : Dans les contreponds des avions et les composants gyroscopiques, elle peut augmenter efficacement l'inertie du système et améliorer la stabilité.
- **Efficacité d'utilisation de l'espace élevée** : Comparé à d'autres matériaux de protection (tels que l'acier et le plomb), il peut atteindre une protection ou une charge structurelle identique, voire supérieure, dans un volume plus petit.
- **performances anti-vibrations et d'absorption d'énergie** : le matériau avec une gravité spécifique plus élevée a une capacité d'amortissement et d'absorption d'énergie cinétique plus forte, adaptée aux applications pare-balles et anti-chocs.

3. Contrôle des dimensions et précision de traitement des tubes en alliage de tungstène

La précision du contrôle dimensionnel des tubes en alliage de tungstène se reflète principalement dans les paramètres clés suivants :

- **Tolérance du diamètre extérieur** : généralement contrôlée entre $\pm 0,01$ mm et $\pm 0,05$ mm, selon les spécifications du produit ;
- **Tolérance du diamètre intérieur** : Affectée par le retrait de frittage et l'usinage, la tolérance est généralement comprise entre $\pm 0,02$ mm et $\pm 0,10$ mm ;
- **Uniformité de l'épaisseur de paroi** : C'est une garantie importante de l'intégrité structurelle. Les produits de haute précision exigent que la différence d'épaisseur de paroi ne dépasse pas ± 5 %.
- **Rectitude et rondeur** : En particulier dans les produits à tubes longs, le contrôle de la rectitude à 0,1 mm/m près est la norme aéronautique/militaire.

L'alliage de tungstène présente une dureté élevée, une grande fragilité et une grande difficulté de mise en œuvre. La précision des dimensions de mise en œuvre doit être garantie par les procédés suivants :

- **Le pressage de moules de haute précision** garantit une forme et une taille initiales uniformes ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Contrôle uniforme de la température pendant le frittage à haute température** pour éviter un retrait de frittage irrégulier ;
- **rectification intérieure et extérieure** , obtenant finalement des trous intérieurs précis et des parois extérieures lisses ;
- **Les systèmes de mesure laser/optique sans contact** sont utilisés pour l'inspection complète ou ponctuelle des dimensions des produits finis.

4. Impact du contrôle dimensionnel sur la performance du service

La précision du contrôle dimensionnel joue un rôle décisif dans la stabilité de service des tubes en alliage de tungstène :

- **Diamètre intérieur de précision** : affecte l'efficacité des canaux de fluide, des focalisateurs de rayons gamma, des échangeurs de chaleur, etc.
- **Cohérence de l'épaisseur de paroi** : liée à la répartition des contraintes thermiques, à l'uniformité de la protection et à la résistance structurelle ;
- **Contrôle des erreurs de forme** : peut améliorer la stabilité globale du système dans l'assemblage de composants et la structure parallèle multitubes ;
- **Stabilité dimensionnelle** : La préservation des dimensions dans des environnements à haute température et haute pression est la clé pour garantir une longue durée de vie.

Par conséquent, les tubes en alliage de tungstène nécessitent non seulement une densité élevée et aucun défaut interne, mais doivent également réaliser un contrôle strict des dimensions et des formes géométriques pour répondre aux exigences d'adaptation précise et de fiabilité élevée dans des environnements complexes.

V. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène, grâce à leur densité élevée, leur densité élevée et leur précision dimensionnelle exceptionnelle, sont devenus des composants structurels essentiels indispensables dans de nombreux secteurs haut de gamme. Aujourd'hui, grâce aux progrès du pressage isostatique, de la conception de moules de haute précision, de la rectification CNC et des technologies d'inspection sans contact, le contrôle dimensionnel des tubes en alliage de tungstène progresse régulièrement vers des tolérances submicroniques. Les applications futures en médecine nucléaire, dans les systèmes énergétiques à ultra-haute température et dans les équipements soumis à des conditions extrêmes seront encore plus prometteuses.

2.2 Résistance à la traction, limite d'élasticité et ténacité à la rupture du tube en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène, grâce à leur densité élevée, leur point de fusion élevé et leurs excellentes propriétés mécaniques, jouent un rôle important dans l'aérospatiale, le blindage nucléaire, la protection militaire et la fabrication d'équipements haut de gamme. La résistance à la traction, la limite d'élasticité et la ténacité à la rupture sont des indicateurs mécaniques clés pour évaluer leur stabilité structurelle et leur fiabilité en service.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

- **Résistance à la traction (σ_{b})** : C'est la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter lors d'un essai de traction, indiquant la force de traction ultime que le matériau peut supporter avant de se rompre.
- **Limite d'élasticité (σ_{s})** : désigne le point de contrainte auquel le matériau commence à subir une déformation plastique évidente et constitue la norme pour juger de la limite d'élasticité du matériau.

Les tubes en alliage de tungstène, tels que W-Ni-Fe et W-Ni-Cu, ont une résistance à la traction et une limite d'élasticité qui sont étroitement liées à la composition de l'alliage, à la microstructure, au degré de densification et au traitement thermique ultérieur.

Système d'alliage	Résistance à la traction (MPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Allongement (%)
W-Ni-Fe (90 W)	700–1000	500–800	10–25
W-Ni-Cu (90 W)	600–900	400–700	15–30
Alliage W à haute résistance	1000–1200+	800–1000	5–15

2. Influence de la conception de l'alliage sur les propriétés de résistance

1. **teneur en tungstène** : résistance à haute température et densité accrues, mais plasticité diminuée ;
2. **rapport Ni/Fe** : Amélioration de la capacité de liaison des limites de phase et du degré de renforcement de la solution solide ;
3. **Affinement de la granulométrie** : L'affinement des grains peut augmenter la limite d'élasticité mais peut réduire la ductilité ;
4. **Densification par frittage et traitement thermique** : peut réduire la porosité interne, améliorer la résistance et la cohérence structurelle.

Par exemple, après avoir utilisé le procédé de ****pressage isostatique à chaud (HIP)****, la densité des tubes en alliage de tungstène peut atteindre plus de 99,5 % et la limite d'élasticité peut être augmentée de 15 % à 20 %.

3. Ténacité à la rupture et son évaluation

La ténacité à la rupture (KIC) désigne la capacité d'un matériau à résister à la propagation des fissures en présence de défauts ou de fissures, reflétant ainsi sa capacité à résister à la rupture fragile. Pour des matériaux tels que les tubes en alliage de tungstène, soumis à des champs de contraintes complexes, la ténacité à la rupture revêt une importance technique cruciale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des alliages de tungstène sont généralement comprises entre 15 et 35 MPa·m^{1/2}, ce qui est bien supérieur à celles du tungstène pur (<10 MPa·m^{1/2}). Leurs performances sont influencées par les facteurs suivants :

- **Teneur en phase dure (Ni/Cu)** : La matrice métallique dure fournit un canal pour la passivation des fissures et la dissipation de l'énergie ;
- **Répartition de l'interface multiphasique** : les particules renforcées par dispersion et les structures discontinues peuvent entraver la propagation des fissures ;
- **Mécanisme d'absorption des microfissures** : propice à la formation d'une zone tampon à la pointe de la fissure.

Les mesures d'amélioration comprennent : l'ajout d'éléments de terres rares (tels que La et Ce) par microalliage, ou l'obtention d'une synergie « forte-résistante » grâce à la conception d'une structure à double phase.

4. Effet de la température sur les propriétés de résistance

les tubes en alliage de tungstène sont sensibles à la température :

- Dans la plage de **600 à 800 ° C** , la résistance à la traction reste relativement stable ;
- Au-dessus de **1 000 ° C** , certains systèmes d'alliages subiront une diminution de leur résistance en raison de l'affaiblissement des joints de grains, de la précipitation de phases et d'autres phénomènes ;
- Certains systèmes d'alliages W résistants aux hautes températures (tels que W-Re-Ni-Fe) peuvent encore maintenir une résistance de plus de 500 MPa dans la plage de **1200 à 1500 ° C** .

Par conséquent, pour les tubes en alliage de tungstène soumis à des conditions de service à haute température, il est nécessaire de combiner des stratégies de renforcement par traitement thermique et de contrôle de la microstructure pour retarder la dégradation des performances.

5. Comparaison des exigences de résistance dans des scénarios d'application typiques

Domaines d'application	Exigences de résistance typiques (MPa)	illustrer
Accessoires de poussée aérospatiale	>900	Résiste à une rotation à grande vitesse, à des chocs et à des différences de température
Composants militaires perforants/à énergie cinétique	800–1000	Haute résistance aux chocs et inertie stable
Composants de blindage nucléaire	600–800	Résistance et ténacité équilibrées, résistant aux radiations et à la fatigue thermique
Équipement médical à haute densité (radiothérapie)	500–700	Support/blindage stable, aucune résistance ultime requise

VI. Résumé

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les tubes en alliage de tungstène démontrent leur compétitivité fondamentale en tant que « matériau composite structurel fonctionnel robuste ». Grâce à des technologies multidimensionnelles telles que l'optimisation des alliages, le contrôle de la densification par métallurgie des poudres, la régulation du traitement thermique et la conception de la microstructure, les tubes modernes en alliage de tungstène allient désormais **résistance et usinabilité élevées**, répondant ainsi aux exigences élevées d'industries clés telles que le nucléaire, l'aérospatiale, l'armée et la médecine.

2.3 Dureté, résistance à l'usure et résistance aux chocs du tube en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène, grâce à leur densité élevée et à leurs excellentes propriétés mécaniques, sont largement utilisés dans l'aérospatiale, la protection nucléaire, les équipements militaires et la fabrication de machines haut de gamme. La dureté, la résistance à l'usure et la résistance aux chocs sont des indicateurs importants pour évaluer les performances des tubes en alliage de tungstène en conditions réelles d'utilisation, affectant directement leur durée de vie, leur sécurité et leur fiabilité.

1. Caractéristiques de dureté du tube en alliage de tungstène

La dureté reflète la capacité d'un matériau à résister à la déformation plastique locale et constitue un indicateur important de la résistance à l'usure et de la capacité de charge des tubes en alliage de tungstène. La dureté des tubes en alliage de tungstène dépend principalement de la composition de l'alliage, du procédé de préparation et du traitement thermique.

- **Les types de dureté et les méthodes de mesure**
sont généralement mesurés selon la dureté Rockwell (HRC), la dureté Vickers (HV) et la dureté Brinell (HB). La plage de dureté typique des tubes en alliage de tungstène W-Ni-Fe est de **HV 250–450**, soit l'équivalent de **HRC 30–45**.
- **Facteurs affectant la dureté**
 1. **Teneur en tungstène** : une teneur élevée en tungstène augmente généralement la dureté, car le tungstène lui-même est extrêmement dur et rigide.
 2. **de phase de liaison métallique** : si le rapport des phases de ténacité telles que Ni et Fe est trop élevé, la dureté globale sera réduite, mais il sera bénéfique d'améliorer la ténacité.
 3. **Traitement thermique et travail à froid** : Un traitement thermique approprié peut affiner et renforcer la structure et améliorer la dureté ; le travail à froid peut introduire une densité de dislocation et augmenter encore la valeur de dureté.
 4. **Morphologie de la microstructure** : Des grains uniformes et fins et une structure dense non poreuse contribuent à améliorer la dureté.

2. Résistance à l'usure du tube en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène présentent une excellente résistance à l'usure dans les environnements à forte abrasion et conviennent aux applications soumises à des frottements mécaniques, des chocs et de l'usure.

- **Mécanisme de résistance à l'usure**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **Renforcement par dispersion de la phase à haute dureté** : Les particules de phase de tungstène dans l'alliage de tungstène ont une dureté élevée et résistent efficacement à l'usure de surface.
 2. **la matrice métallique** : La matrice de nickel et de fer offre une certaine plasticité pour amortir les forces externes et empêcher le matériau de se fissurer et de se décoller.
 3. **Densité de surface** : La structure du matériau dense et non poreux réduit efficacement l'intrusion de particules abrasives et de milieux corrosifs, prolongeant ainsi la durée de vie.
- **Indice d'évaluation de la résistance à l'usure**
 - **Taux d'usure** (mg/cm²/h ou mm³/N·m)
 - **Coefficient d'usure**
 - **Coefficient de frottement**
 - **Exemple de données de recherche expérimentale** :
les tubes en alliage de tungstène W-Ni-Fe présentent un faible taux d'usure lors des tests d'usure des meules, environ 1/5 de celui de l'acier ordinaire, démontrant une résistance à l'usure extrêmement forte.

3. Résistance aux chocs du tube en alliage de tungstène

La résistance aux chocs est la capacité d'un matériau à résister à des charges soudaines ou à des dommages dus à un impact dynamique, ce qui est directement lié à la sécurité et à la fiabilité des tubes en alliage de tungstène dans des conditions de travail complexes.

- **Facteurs clés de la résistance aux chocs des tubes en alliage de tungstène**
 1. **Ténacité de la matrice** : Ni et Fe agissent comme des phases de liaison métallique, offrant une capacité de déformation plastique et dispersant la concentration des contraintes.
 2. **Uniformité de la microstructure** : La taille uniforme des grains et l'interface de phase réduisent les points d'initiation des fissures et améliorent la résistance aux chocs.
 3. **Degré de densification** : La haute densité réduit les défauts tels que les trous et les fissures, améliorant efficacement la résistance aux chocs.
 4. **éléments ajoutés** : Les éléments de microalliage tels que le titane et le niobium peuvent affiner les grains et améliorer la ténacité.
- **Méthode d'essai**
 - **Les tests d'impact** (tels que le test d'impact Charpy) mesurent l'énergie d'impact absorbée (J)
 - **Les essais de fatigue dynamique** examinent les caractéristiques de défaillance des matériaux soumis à un impact cyclique
- **Données de performance typiques** :
La ténacité aux chocs Charpy des tubes en alliage de tungstène W-Ni-Fe standard est généralement comprise entre **5 et 15 J/cm²**. **Les alliages à haute ténacité peuvent être augmentés à plus de 20 J/cm²** par traitement thermique et microalliage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Optimisation synergique de la dureté, de la résistance à l'usure et de la résistance aux chocs

Les tubes en alliage de tungstène, la dureté, la résistance à l'usure et la résistance aux chocs doivent souvent atteindre un équilibre optimal pour éviter une fragilité accrue due à une dureté excessive ou une ténacité accrue au détriment de la résistance à l'usure.

- **Stratégie de conception des alliages**

1. En ajustant le rapport W et Ni/Fe, la dureté et la ténacité peuvent être obtenues.
2. L'introduction de nanoparticules et de la technologie des microalliages peut affiner les grains et améliorer les propriétés mécaniques globales.
3. Technologie de revêtement de surface composite (comme TiN, Le CrN, etc.) est utilisé pour améliorer la dureté de la surface et la résistance à l'usure tout en protégeant la ténacité du substrat.

- **Contrôle de processus**

Contrôlez avec précision la distribution granulométrique de la poudre, la pression de compactage et le processus de frittage pour réduire les défauts inhérents et améliorer la densité et la cohérence des performances.

5. Exemples d'application

- **Tubes haute résistance pour l'aéronautique :** Le matériau exige à la fois une dureté élevée et une résistance aux chocs élevée. Les tubes en alliage de tungstène offrent une excellente protection mécanique et une excellente stabilité dimensionnelle.
- **Tuyaux de protection nucléaire :** présentent une excellente résistance à l'usure et une ténacité structurelle dans les environnements à fort rayonnement, garantissant la sécurité des équipements.
- **Boîtier perforant militaire :** la dureté et la résistance à l'usure sont des facteurs clés pour garantir l'effet perforant et l'intégrité structurelle.

VI. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène constituent leur principal avantage concurrentiel dans un large éventail d'applications. Grâce à une conception scientifique des matériaux et à des procédés de fabrication avancés, ils offrent une combinaison optimale de dureté et de ténacité, prolongeant ainsi leur durée de vie et leur sécurité tout en répondant aux exigences des conditions d'utilisation.

2.4 Conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique et stabilité à haute température des tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène jouent un rôle essentiel dans de nombreuses conditions de travail extrêmes et à haute température. Leur conductivité thermique, leur coefficient de dilatation thermique et leur stabilité à haute température ont un impact direct sur leur stabilité structurelle et leur durée de vie, ce qui les rend particulièrement importants dans l'aérospatiale, l'industrie nucléaire et les tubes de fours à haute température.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Conductivité thermique du tube en alliage de tungstène

La conductivité thermique désigne la capacité d'un matériau à conduire l'énergie thermique. Une conductivité thermique élevée permet de dissiper rapidement la chaleur et d'éviter les dommages matériels causés par une surchauffe locale.

- Le tungstène pur présente une conductivité thermique extrêmement élevée, d'environ $170 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Cependant, l'ajout de phases liantes telles que le nickel et le fer aux alliages de tungstène réduit cette conductivité thermique. **Les tubes en alliage de tungstène W-Ni-Fe** typiques présentent une conductivité thermique d'environ **$50 \text{ à } 70 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$** , toujours significativement plus élevé que la plupart des métaux.
- **Facteurs d'influence**
 1. **Rapport de composition** : Plus la teneur en tungstène est élevée, meilleure est la conductivité thermique ; plus la teneur en phase liante est élevée, plus la conductivité thermique est faible.
 2. **Microstructure et densité** : La structure dense, à grains fins et non poreuse est propice à la conduction thermique.
 3. **Température** : La conductivité thermique diminue généralement à mesure que la température augmente, mais l'alliage de tungstène conserve toujours une bonne conductivité thermique.
- **Importance de l'application** :

La conductivité thermique élevée rend les tubes en alliage de tungstène adaptés aux échangeurs de chaleur à haute température, aux tuyaux de dissipation de chaleur et aux systèmes de refroidissement des appareils électroniques pour assurer un fonctionnement thermiquement stable des équipements.

2. Coefficient de dilatation thermique du tube en alliage de tungstène

Le coefficient de dilatation thermique reflète la propriété de changement dimensionnel d'un matériau en raison des changements de température et constitue un paramètre important qui doit être pris en compte lors de la conception de pièces structurelles à haute température.

- **Le**

coefficient de dilatation linéaire des tubes en alliage de tungstène est généralement compris entre $4,5 \times 10^{-6} / \text{K}$ et $6,5 \times 10^{-6} / \text{K}$ (de la température ambiante à environ $800 \text{ }^\circ\text{C}$). Cette valeur est inférieure à celle de la plupart des aciers, ce qui témoigne d'une bonne stabilité dimensionnelle.
- **Facteurs d'influence**
 1. **Composition de l'alliage** : Les propriétés de faible dilatation thermique du tungstène et du molybdène dominent les performances globales, tandis que les phases de liant métallique telles que Ni et Fe augmentent légèrement le coefficient de dilatation thermique.
 2. **Microstructure** : La structure uniforme du grain et la structure dense réduisent la dilatation et la contraction thermiques locales inégales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. **État du traitement thermique** : Un traitement thermique raisonnable aide à libérer les contraintes internes et à réduire la déformation due à la dilatation thermique.

- **Considérations relatives aux applications techniques**

Le faible coefficient de dilatation thermique permet aux tubes en alliage de tungstène de maintenir la stabilité dimensionnelle dans les environnements à haute température, évitant ainsi les fissures et les déformations dues aux contraintes thermiques, et est particulièrement adapté aux pipelines de précision à haute température et aux composants mécaniques.

3. Stabilité à haute température du tube en alliage de tungstène

La stabilité à haute température désigne la capacité d'un matériau à conserver ses propriétés physiques, mécaniques et sa structure chimique dans des conditions de température élevée. Elle est essentielle pour évaluer la capacité des tubes en alliage de tungstène à fonctionner durablement dans des environnements extrêmes.

- **Performances de stabilité thermique**

1. **Avantage du point de fusion élevé** : le point de fusion du tungstène est aussi élevé que 3422°C et les tubes en alliage de tungstène ont une résistance extrêmement élevée aux températures élevées .

2. **Résistance à l'oxydation** : Le tungstène pur forme facilement une couche d'oxyde dans un environnement oxydant à haute température. Les tubes en alliage de tungstène améliorent leur résistance à l'oxydation grâce au contrôle de la composition et à la technologie de revêtement de surface.

3. **Maintien des propriétés mécaniques** : Les tubes en alliage de tungstène peuvent maintenir une résistance et une dureté élevées à des températures élevées pour assurer la stabilité structurelle.

- **Facteurs d'influence**

1. **Conception d'alliage** : des quantités appropriées de Ni, Fe et d'éléments de micro-alliage tels que le titane et le niobium améliorent les performances à haute température et la résistance à l'oxydation.

2. **Traitement de surface** : revêtement d'oxydation, revêtement céramique, etc. pour améliorer la protection de surface.

3. **Environnement de fonctionnement** : Les performances dans un environnement sous vide et à base d'argon de haute pureté sont meilleures que celles dans un environnement riche en oxygène.

- **Cas d'application**

Les tubes en alliage de tungstène présentent une excellente stabilité thermique dans les tuyaux de four à haute température, les tubes de refroidissement de turbines de moteurs d'avion et les pièces structurelles à haute température des réacteurs nucléaires.

4. Stratégie globale d'optimisation des performances thermiques des tubes en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Afin d'améliorer les performances des tubes en alliage de tungstène dans des environnements à températures extrêmement élevées, les méthodes d'optimisation suivantes sont généralement utilisées :

- **La conception du matériau**
combine une teneur élevée en tungstène avec un rapport de phase liante approprié pour obtenir un équilibre entre une conductivité thermique élevée et une faible dilatation thermique.
- **La régulation de la microstructure**
affine les grains, réduit les pores et optimise les processus de frittage et de traitement thermique.
- **La technologie de surface**
utilise un revêtement antioxydant pour prolonger la durée de vie.
- **adaptable à l'environnement**
s'adapte aux systèmes d'alliage dans différents environnements à haute température pour répondre à différents besoins industriels.

V. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène, grâce à leur excellente conductivité thermique, leur faible coefficient de dilatation thermique et leur exceptionnelle stabilité à haute température, sont devenus un matériau incontournable pour les environnements à haute température. La conception scientifique de leur composition et l'optimisation de leurs procédés permettent d'améliorer encore leurs performances thermiques globales, répondant ainsi aux exigences strictes des tubes haute performance dans des secteurs tels que l'aérospatiale, l'industrie nucléaire et la fabrication de machines haute température.

2.5 Propriétés électriques, réponse magnétique et résistance aux radiations des tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène sont largement utilisés dans les domaines de haute technologie modernes en raison de leurs excellentes propriétés électriques, de leur réponse magnétique et de leur résistance aux radiations, notamment dans l'industrie nucléaire, l'aérospatiale et les équipements électroniques. Une compréhension approfondie et l'optimisation de ces propriétés sont essentielles pour garantir le fonctionnement stable des tubes en alliage de tungstène dans des environnements extrêmes.

1. Propriétés électriques du tube en alliage de tungstène

- **Conductivité et résistivité**
Le tungstène métallique ayant lui-même une bonne conductivité électrique, la résistivité du tungstène pur est d'environ $5,6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$. Cependant, les tubes en alliage de tungstène sont généralement dopés avec du nickel, du fer et d'autres phases liantes. Ces éléments ont une résistivité élevée, ce qui fait que la conductivité globale des tubes en alliage de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungstène est inférieure à celle du tungstène pur, généralement comprise entre 10^{-7} et 10^{-6} . Dans la gamme de $\Omega \cdot m$.

- **Facteurs d'influence**

1. **Rapport de composition** : plus la teneur en tungstène est élevée, meilleure est la conductivité ; plus la teneur en phase liante est élevée, plus la résistivité est élevée.
2. **Microstructure** : La structure dense et non poreuse est propice à la conduction électronique, tandis que les pores ou les fissures augmenteront considérablement la résistance.
3. **Effet de la température** : la résistivité augmente avec la température. Une attention particulière doit être portée à la variation de résistance des tubes en alliage de tungstène dans les environnements à haute température.

- **Importance des applications :**

les tubes en alliage de tungstène conviennent aux équipements électroniques haute température et aux matériaux d'électrodes nécessitant une conductivité électrique spécifique. Ils jouent également un rôle important dans le domaine du blindage électromagnétique.

2. Caractéristiques de réponse magnétique du tube en alliage de tungstène

- **est**

un métal paramagnétique avec une faible réponse magnétique, mais les éléments ferromagnétiques tels que le fer et le nickel dopés dans l'alliage amélioreront les propriétés magnétiques globales, ce qui permettra au tube en alliage de tungstène de présenter une certaine réponse magnétique.

- **Performances magnétiques**

1. **Mélange de paramagnétisme et de ferromagnétisme** : Le rapport des composants ferromagnétiques dans les tubes en alliage de tungstène détermine la force de leurs propriétés magnétiques.
2. **Perméabilité magnétique** : à mesure que la teneur en fer et en nickel augmente, la perméabilité magnétique augmente, ce qui est bénéfique pour le blindage du champ magnétique.
3. **Hystérésis et force coercitive** : Les caractéristiques de la boucle d'hystérésis du tube en alliage affectent sa perte d'énergie et ses performances dans un champ magnétique alternatif.

- **Domaines d'application**

Les caractéristiques de réponse magnétique des tubes en alliage de tungstène leur confèrent des avantages potentiels en tant que matériaux d'absorption de neutrons dans le blindage électromagnétique, les capteurs de champ magnétique et l'industrie nucléaire.

3. Résistance aux radiations du tube en alliage de tungstène

- **Stabilité dans les environnements de rayonnement** Les tubes en alliage de tungstène ont d'excellentes capacités de protection contre les rayonnements en raison des numéros

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

atomiques élevés des éléments tungstène et molybdène, et peuvent bloquer efficacement les rayons gamma, les neutrons et autres particules à haute énergie.

- **Modifications des matériaux induites par les rayonnements**
 1. **Dommmages causés par l'irradiation** : un rayonnement à haute énergie peut provoquer des défauts de réseau, des dislocations accrues et des changements microstructuraux, affectant les propriétés mécaniques.
 2. **fragilisation induits par les radiations** : Sous une irradiation prolongée, la dureté du matériau augmente mais la ductilité diminue, ce qui peut entraîner un risque de rupture fragile.
 3. **Stabilité des alliages** : Grâce à une conception raisonnable, les systèmes d'alliages tels que le tungstène, le molybdène, le nickel et le fer peuvent inhiber efficacement les changements de phase et la dégradation des performances causés par les rayonnements.

- **Applications d'ingénierie**

Les tubes en alliage de tungstène sont largement utilisés dans les matériaux de blindage des réacteurs nucléaires, les pipelines de transport de radio-isotopes et les pièces structurales des équipements de radiothérapie pour assurer la sécurité des équipements et du personnel.

4. Optimisation des performances et orientations futures de la recherche

- **L'amélioration des performances électriques est obtenue**

grâce à l'amélioration de la pureté et au contrôle de la microstructure pour réduire les impuretés et les pores, réduire la résistivité et améliorer la stabilité.
- **Le contrôle de la réponse magnétique**

ajuste avec précision la teneur en fer et en nickel pour optimiser les propriétés magnétiques afin de répondre aux différentes exigences de blindage et de détection.
- **La tolérance aux radiations est améliorée**

grâce à l'utilisation de technologies de microalliage, de nano-renforcement et de revêtement de surface pour améliorer la résistance aux dommages causés par les radiations et prolonger la durée de vie.

V. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène présentent des avantages uniques en termes de propriétés électriques, de réponse magnétique et de résistance aux radiations, ce qui en fait un matériau incontournable dans les industries de pointe de l'énergie nucléaire, de l'aérospatiale et de l'électronique. Grâce à une conception et une optimisation continues des matériaux et des procédés, les performances des tubes en alliage de tungstène seront encore améliorées pour répondre aux divers besoins des futures conditions de travail extrêmes.

2.6 Analyse de la résistance à la corrosion et de la stabilité chimique des tubes en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les tubes en alliage de tungstène sont largement utilisés dans l'industrie nucléaire, l'aérospatiale, les appareils électroniques et d'autres domaines en raison de leurs excellentes propriétés. Cependant, en pratique, ils sont souvent exposés à divers milieux corrosifs et à des environnements chimiques complexes. Il est donc crucial de mener des recherches approfondies sur leur résistance à la corrosion et leur stabilité chimique.

1. Aperçu de la résistance à la corrosion des tubes en alliage de tungstène

Le tungstène est un métal de transition extrêmement stable, doté d'une grande inertie chimique et d'une grande résistance à la corrosion. La teneur en tungstène des tubes en alliage de tungstène est généralement élevée, ce qui leur confère une excellente résistance à la corrosion dans divers environnements corrosifs. La résistance à la corrosion des tubes en alliage de tungstène repose principalement sur les facteurs suivants :

- **Résistance à la corrosion du tungstène.**

Le tungstène présente un point de fusion élevé (3422 °C) et une stabilité chimique exceptionnelle. Il reste stable dans divers environnements acides et alcalins, notamment neutres et faiblement acides et alcalins, et présente une excellente résistance à la corrosion.

- **Influence de la composition de l'alliage**

Bien que les phases de liaison telles que le nickel, le fer et le cuivre dans les tubes en alliage de tungstène contribuent à améliorer les propriétés mécaniques et les performances de traitement, leur résistance à la corrosion est plus faible que celle du tungstène. Par conséquent, le rapport de composition de l'alliage et la répartition des éléments ont un impact significatif sur la résistance globale à la corrosion.

- **La microstructure dense est**

obtenue grâce à un frittage à haute densité et un traitement thermique optimisé, ce qui réduit les pores et les fissures, empêchant efficacement la pénétration de milieux corrosifs et améliorant la durée de vie de résistance à la corrosion des tubes en alliage de tungstène.

2. Performances des tubes en alliage de tungstène dans différents milieux corrosifs

1. **Résistance à la corrosion en milieu acide :**

Les tubes en alliage de tungstène présentent une bonne résistance à la corrosion contre la plupart des acides minéraux (tels que l'acide sulfurique et l'acide chlorhydrique). Cependant, dans les environnements acides concentrés à haute température, un film protecteur, tel que l'oxyde de tungstène, peut se former à la surface du tungstène, offrant une certaine protection par passivation. Les phases liantes comme le nickel et le fer présentent une faible résistance à la corrosion et sont sujettes à une corrosion localisée, ce qui affecte les performances globales.

2. Les tubes en alliage de tungstène sont également performants en **milieu alcalin. La stabilité chimique du tungstène garantit sa résistance à la corrosion par les solutions alcalines.**

Cependant, les composants fer et nickel de l'alliage peuvent provoquer divers degrés de corrosion, ce qui nécessite une amélioration de la conception de l'alliage et du traitement de surface.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Les embruns salins et les environnements marins

représentent un défi pour la résistance à la corrosion des tubes en alliage de tungstène, en particulier ceux contenant des ions chlorure. Les surfaces en alliage de tungstène sont sensibles aux piqûres microscopiques, et une exposition prolongée aux climats marins peut entraîner une diminution de la résistance à la corrosion. Un revêtement de surface et des mesures de protection appropriés sont essentiels pour garantir la durée de vie des tubes en alliage de tungstène dans de tels environnements.

4. élevées

forment un film dense d'oxyde WO_3 . Ce film protège contre toute oxydation ultérieure. Cependant, à des températures extrêmement élevées et dans un environnement fortement oxydant, le film peut devenir instable, entraînant une oxydation accélérée. Par conséquent, la résistance à l'oxydation à haute température doit être renforcée par des éléments d'alliage et une protection de surface.

3. Facteurs affectant la stabilité chimique des tubes en alliage de tungstène

- **La distribution des éléments d'alliage et**

la distribution uniforme des phases de liaison telles que le nickel et le fer à l'interface et leur bonne liaison avec la matrice de tungstène peuvent empêcher efficacement le milieu corrosif de pénétrer le long de l'interface.

- **Microstructure et porosité Les tubes en alliage de tungstène à haute densité et à faible porosité**

améliorent considérablement la résistance à la corrosion. Les pores et les microfissures sont les principaux canaux d'invasion des milieux corrosifs.

- **État de surface et technologie de revêtement**

La surface des tubes en alliage de tungstène traités par meulage, polissage et revêtement devient plus dense et plus lisse, améliorant considérablement la résistance à la corrosion.

- **comme les propriétés chimiques du milieu environnemental,**

la température, la valeur du pH, le potentiel redox, etc. affectent directement le taux de corrosion et la forme de corrosion des tubes en alliage de tungstène.

4. Stratégies pour améliorer la résistance à la corrosion des tubes en alliage de tungstène

1. **Optimisez la conception de la composition de l'alliage et introduisez des éléments traces résistants à la corrosion (tels que**

le molybdène, le vanadium, le chrome, etc.) grâce au micro-alliage pour améliorer la stabilité chimique globale et la résistance à la corrosion du tube en alliage de tungstène.

2. **Le processus de préparation amélioré**

adopte une technologie avancée de métallurgie des poudres, une technologie de pressage isostatique à chaud, etc. pour obtenir une structure d'alliage dense et uniforme et réduire la porosité et les défauts.

3. **La technologie de traitement de surface et de revêtement**

utilise un revêtement céramique, un revêtement d'oxyde métallique, un PVD/CVD et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'autres technologies de dépôt physique en phase vapeur pour améliorer la dureté de la surface et la résistance à la corrosion.

4. **Contrôle de l'environnement d'entretien et d'utilisation**

Contrôlez l'humidité, la température et la concentration en milieu corrosif de l'environnement d'utilisation et combinez un entretien régulier pour prolonger la durée de vie des tubes en alliage de tungstène.

V. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène offrent une excellente résistance à la corrosion et une excellente stabilité chimique, notamment dans les environnements neutres et légèrement corrosifs. Grâce à une conception rationnelle des alliages, à des procédés de fabrication avancés et à des technologies de traitement de surface, la stabilité des tubes en alliage de tungstène dans les environnements corrosifs les plus exigeants a été considérablement améliorée. À l'avenir, grâce au développement continu de nouveaux matériaux et procédés, la résistance à la corrosion des tubes en alliage de tungstène répondra mieux aux exigences strictes des applications haut de gamme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



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

3.1 Préparation des matières premières et analyse des caractéristiques de la poudre du tube en alliage de tungstène

La qualité des tubes en alliage de tungstène dépend non seulement de la composition de l'alliage, mais aussi du choix des matières premières et des propriétés de la poudre. La qualité des matières premières et les propriétés de la poudre ont un impact direct sur la stabilité du processus de fabrication ultérieur, ainsi que sur la densité, les propriétés mécaniques et la microstructure du produit final. Par conséquent, la préparation des matières premières et l'analyse des propriétés de la poudre sont des points de départ cruciaux du processus de fabrication.

1. Sélection des matières premières pour les tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène contiennent de la poudre de tungstène de haute pureté et un liant métallique (poudre de nickel, de fer, de cuivre, etc.). La poudre de tungstène, élément matriciel, détermine la densité et les propriétés physiques fondamentales de l'alliage ; le liant métallique influence l'usinabilité, la ténacité et les propriétés mécaniques globales de l'alliage.

- **Exigences de qualité de la poudre de tungstène :**

La poudre de tungstène doit être d'une grande pureté (teneur en tungstène $\geq 99,95\%$), pauvre en oxygène et en impuretés afin d'éviter les défauts de performance du produit causés par les impuretés. La poudre doit présenter une granulométrie uniforme et modérément répartie (généralement de 1 à 10 microns) et une forme sphérique ou subsphérique, ce qui favorise une bonne fluidité et une bonne densité de compactage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Les poudres**

, en tant que principaux liants métalliques, doivent présenter une granulométrie appropriée et une bonne pureté. Elles sont généralement plus petites que la poudre de tungstène afin d'assurer une distribution uniforme et de former une bonne phase de liaison lors du frittage. De la poudre de cuivre est parfois ajoutée pour améliorer la conductivité thermique et les propriétés mécaniques.

2. Analyse des propriétés physiques de la poudre tubulaire en alliage de tungstène

Les propriétés physiques de la poudre sont des facteurs clés affectant le processus de formage, notamment la distribution granulométrique, la surface spécifique, la fluidité, la densité apparente et la morphologie des particules.

- **La granulométrie et la morphologie des particules**

ont un impact direct sur l'uniformité et la densité du compactage. Les poudres fines facilitent la densification par frittage, mais les poudres trop fines ont tendance à s'agglomérer et à présenter une faible fluidité, ce qui complique le compactage. Les poudres sphériques ou quasi sphériques, grâce à leurs excellentes propriétés d'écoulement, facilitent un remplissage uniforme lors du compactage.

- **La surface**

augmente la zone de contact entre les poudres, ce qui est bénéfique pour la diffusion du frittage et la liaison, mais elle conduit également facilement à l'absorption d'humidité, à l'agglomération et à l'oxydation de la poudre, et l'environnement de stockage de la poudre doit être strictement contrôlé.

- **La fluidité**

assure un remplissage uniforme du moule et une efficacité de moulage optimale. Une fluidité insuffisante entraînera une accumulation irrégulière de poudre et des dimensions instables du produit moulé.

- **La densité**

et la densité de tassement de la poudre initiale affectent la densité du corps vert après pressage, et affectent ainsi la densité finale et les performances du tube après frittage.

3. Composition chimique de la poudre et contrôle des impuretés

Les tubes en alliage de tungstène sont extrêmement sensibles aux impuretés présentes dans la poudre. En particulier, les impuretés non métalliques telles que l'oxygène, le carbone et l'azote peuvent affecter significativement le comportement au frittage et les propriétés mécaniques de l'alliage. Des tests rigoureux de composition chimique et un contrôle rigoureux des impuretés de la poudre sont essentiels pour garantir les performances des tubes en alliage de tungstène.

- **Contrôle de la teneur en oxygène :**

L'oxygène favorise l'oxydation de la poudre de tungstène pour former du tungstate, ce qui affecte le processus de densification par frittage. La clé pour réduire la teneur en oxygène est d'adopter une atmosphère protectrice, un procédé de préparation à faible teneur en oxygène et un environnement de stockage de la poudre contrôlé.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **L'influence des éléments d'impureté Les éléments d'impureté dans**
les poudres de fer et de nickel doivent être strictement limités pour éviter l'introduction d'éléments nocifs tels que le soufre et le phosphore afin d'empêcher la dégradation des propriétés de l'alliage et d'endommager la résistance à la corrosion.

4. Technologie de prétraitement des poudres

Afin d'améliorer la fluidité et les propriétés de frittage de la poudre, les technologies de prétraitement suivantes sont souvent utilisées dans la préparation des tubes en alliage de tungstène :

- **Le broyage à boulets**
affine la taille des particules de poudre grâce au broyage mécanique à boulets, améliore la distribution granulométrique, rend la taille des particules de poudre plus uniforme et améliore les performances de pressage et de formage.
- **Le tamisage**
est utilisé pour classer et tamiser la poudre afin d'éliminer les grosses particules et les agglomérats afin de garantir la stabilité de la taille des particules de poudre.
- **L'atomisation au gaz**
utilise la technologie d'atomisation au gaz pour produire de la poudre de tungstène sphérique, qui présente les avantages d'une granulométrie uniforme, d'une bonne fluidité et d'une densité élevée.

V. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène ont un impact direct sur leur qualité et leurs performances. Un mélange approprié de poudre de tungstène de haute pureté et d'une grande homogénéité avec la poudre métallique de liaison, ainsi qu'un contrôle rigoureux des paramètres tels que la granulométrie, la fluidité et la teneur en impuretés, garantissent la stabilité du procédé de formage et l'excellente performance du produit final. Grâce au développement de technologies avancées de préparation et de traitement des poudres, la qualité des matières premières utilisées pour les tubes en alliage de tungstène ne cesse de s'améliorer, posant ainsi les bases solides de la production industrielle de tubes en alliage de tungstène hautes performances.

3.2 Technologie de pressage par métallurgie des poudres de tubes en alliage de tungstène (moulage, pressage isostatique)

Les tubes en alliage de tungstène sont des matériaux fonctionnels à haute densité et haute résistance. Le pressage par métallurgie des poudres est une étape clé de leur production. Grâce à un pressage rationnel des poudres, il est possible d'obtenir des formes complexes, une grande précision dimensionnelle et une densité uniforme, préparant ainsi le terrain pour le frittage et le traitement thermique ultérieurs. Les techniques de pressage des poudres les plus courantes comprennent le pressage par matrice et le pressage isostatique, chacune présentant ses propres avantages et domaines d'application, et étant largement utilisées dans la production industrielle de tubes en alliage de tungstène.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Technologie de moulage par compression

Le moulage par compression est un procédé qui utilise un moule spécialisé pour appliquer une pression unidirectionnelle sur la poudre d'alliage de tungstène, la compactant ainsi dans la cavité du moule. Le moulage par compression est un procédé simple et très efficace, ce qui le rend adapté à la production en série de tubes en alliage de tungstène de taille standard.

- **Processus**

1. **Remplissage de poudre** : La poudre d'alliage de tungstène pré-mélangée est chargée dans un moule cylindrique ou tubulaire dédié.
2. **Moulage par compression** : Utiliser une presse hydraulique ou une presse mécanique pour appliquer une pression élevée (généralement de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de MPa) pour compacter la poudre dans le moule afin de former un corps vert dense.
3. **Démoulage et retrait de l'ébauche** : Une fois la pression relâchée, l'ébauche formée est retirée et préparée pour le processus de frittage ultérieur.

- **Avantages**

- L'équipement est simple, le processus est mature et il est facile de réaliser une production automatisée.
- Le cycle de production est court et adapté à la production de masse.
- le le corps vert formé est plus haut et le contrôle de la taille est meilleur.

- **défi**

- Une pression unidirectionnelle peut entraîner une distribution inégale de la densité de la poudre et provoquer un gradient de densité dans le corps vert.
- Pour les tubes en alliage de tungstène à parois minces ou à sections transversales complexes, il est difficile de garantir l'uniformité lors du formage de la matrice.
- Le moule s'use rapidement et le coût d'entretien est élevé.

2. Pressage isostatique à froid (NEP)

Le pressage isostatique consiste à placer de la poudre d'alliage de tungstène dans un moule flexible (capsule en caoutchouc) et à appliquer une pression uniforme dans toutes les directions grâce à un fluide à haute pression (liquide ou gaz). Ce procédé améliore efficacement la densité et l'uniformité de l'ébauche et convient au formage de tubes en alliage de tungstène aux formes complexes et aux parois fines.

- **Processus**

1. **Chargement et emballage** : Chargez la poudre d'alliage de tungstène dans le moule en caoutchouc, scellez-le et assurez-vous qu'aucun air n'est emprisonné.
2. **Pressage isostatique** : Le sac de moule est placé dans un autoclave et un liquide comprimé (tel que de l'huile ou de l'eau) est injecté pour appliquer une pression isostatique, qui varie généralement entre 100 et 300 MPa.
3. **Démoulage** : Une fois la pression relâchée, le moule souple est retiré et le revêtement en caoutchouc est retiré pour obtenir un corps vert uniforme et dense.

- **Avantages**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La pression appliquée est uniforme, le corps vert a une bonne densité et une structure uniforme.
- Il possède une forte adaptabilité et peut former des sections transversales complexes et des tuyaux à parois minces.
- Il peut réduire efficacement les défauts de formage tels que les gradients de densité et les fissures.
- **défi**
 - L'investissement en équipement est élevé, le flux de processus est complexe et le cycle de production est long.
 - Un usinage ultérieur est nécessaire pour atteindre des exigences dimensionnelles précises.
 - Le matériau du sac moulé et la technologie d'étanchéité doivent être garantis pour éviter les fuites affectant la qualité.

3. Application complète du moulage et du pressage isostatique

Dans la production moderne de tubes en alliage de tungstène, les avantages du pressage à l'emporte-pièce et du pressage isostatique sont souvent combinés pour optimiser les performances des produits. Par exemple, le pressage à l'emporte-pièce permet d'abord de former rapidement la forme de base de l'ébauche, puis le pressage isostatique optimise la densité et l'uniformité, et enfin l'usinage mécanique et le traitement thermique.

4. Facteurs clés affectant la qualité du pressage de la poudre

- **Taille et distribution des particules de poudre** : La taille uniforme et modérée des particules favorise l'écoulement et le remplissage de la poudre et améliore la densité de pressage.
- **Rapport de poudre et mouillabilité** : Le mélange raisonnable et la mouillabilité de la poudre d'alliage affectent l'effet de liaison et de compactage entre les particules.
- **Pression et vitesse** : Si la pression est trop faible, la densité est insuffisante ; si la pression est trop élevée, des fissures sont susceptibles de se produire ; la vitesse de pressage affecte l'écoulement et l'uniformité de compactage de la poudre.
- **Conception du moule** : La forme, la taille et la conception de la lubrification du moule sont directement liées à la facilité de démoulage et à la précision dimensionnelle du formage.

V. Conclusion

Les tubes en alliage de tungstène sont essentiels à leurs hautes performances. Le procédé de pressage, réputé pour son rendement élevé et la simplicité de ses équipements, convient à la production de tubes standard à parois épaisses. Le pressage isostatique, réputé pour sa densité et son uniformité, ainsi que pour son adaptabilité aux structures complexes, est idéal pour les tubes haut de gamme à parois minces ou les formes spécialisées. L'application combinée de ces deux méthodes permet de répondre aux diverses exigences des tubes en alliage de tungstène pour diverses applications. À l'avenir, grâce aux progrès des matériaux en poudre et des technologies d'équipement, le pressage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des poudres gagnera en précision et en efficacité, contribuant ainsi fortement à l'amélioration des performances et au développement industriel des tubes en alliage de tungstène.

3.3 Points clés du processus de formage creux et de la conception des matrices pour les tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène sont largement utilisés dans l'aérospatiale, l'industrie nucléaire, les équipements électroniques et d'autres secteurs. En raison de leurs propriétés matérielles uniques et de la complexité de leurs procédés de fabrication, la technologie de formage creux et la conception de moules sont des éléments techniques clés de leur fabrication. Des procédés de formage efficaces et une conception de moules judicieuse garantissent non seulement l'intégrité structurelle et la précision dimensionnelle des tubes en alliage de tungstène, mais améliorent également les propriétés mécaniques et la durée de vie du produit fini.

1. Aperçu du processus de formage creux

nécessite généralement un emboutissage, un pressage isostatique, puis un usinage et un traitement thermique. Comparée aux produits en alliage de tungstène massif, la structure creuse augmente la difficulté de formage, notamment en termes d'uniformité du remplissage de poudre, de contrôle de l'épaisseur des parois et de protection des cavités internes pendant le formage.

- **Remplissage de poudre :**

Un remplissage de poudre uniforme est indispensable pour garantir une épaisseur de paroi uniforme des tubes creux, sans pores ni défauts. Des dispositifs de vibration spécialisés ou des moules rotatifs sont souvent utilisés en conjonction avec la technologie de remplissage pour garantir une répartition optimale de la poudre d'alliage de tungstène sur la paroi intérieure du moule et former une couche de poudre uniforme.

- **Le moulage par compression**

utilise une technique de compression à double matrice, où une pression externe est appliquée pour compacter la poudre et former un tube creux en alliage de tungstène. La matrice interne maintient la forme et la taille de la cavité du tube, empêchant ainsi son affaissement ou sa déformation.

- **Le pressage isostatique**

densifie le tube creux en appliquant une pression uniforme après l'encapsulation de la poudre. Cette méthode permet un excellent contrôle de l'uniformité de l'épaisseur de la paroi du tube et réduit efficacement les gradients de densité et les défauts structurels.

- **Usinage et traitement thermique**

Après le formage, la billette du tube doit généralement être usinée avec précision pour atteindre la taille et la qualité de surface conçues, et la microstructure est optimisée grâce à un processus de traitement thermique pour améliorer les propriétés mécaniques.

2. Points clés de la conception des moules

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La conception de tubes creux en alliage de tungstène doit tenir compte des propriétés du matériau, du procédé de formage et des caractéristiques structurelles du produit. Les principaux éléments de conception sont les suivants :

1. En raison de la dureté et de la température de frittage élevées de la poudre d'alliage de tungstène, le **moule** doit présenter une résistance à l'usure et une stabilité thermique élevées. Les matériaux courants incluent le carbure cémenté, l'acier rapide et les alliages résistants à la chaleur. La surface du moule nécessite également un traitement spécial, tel qu'un revêtement ou un durcissement superficiel, pour prolonger sa durée de vie.
2. **entre** les diamètres intérieur et extérieur du moule affecte directement l'uniformité de l'épaisseur de la paroi du tube et la précision dimensionnelle. Des techniques d'usinage et d'assemblage de haute précision sont généralement utilisées pour garantir la coaxialité des moules intérieur et extérieur, sans jeu ni désalignement.
3. **Conception des orifices d'aération et des canaux de remplissage de poudre du moule** : Des orifices d'aération et des canaux de remplissage de poudre bien conçus garantissent l'absence de stagnation de gaz dans le moule, évitant ainsi la formation de pores et de défauts d'inclusion. Le canal d'aération doit être adapté à la structure du moule afin de faciliter le démontage et le nettoyage ultérieurs.
4. **Les systèmes de refroidissement et de chauffage sont intégrés** au processus de formage ou de frittage. Le moule doit bénéficier d'un contrôle uniforme de la température afin d'éviter toute contrainte thermique locale susceptible de provoquer des déformations ou des fissures. Des canaux de refroidissement ou des éléments chauffants intégrés sont conçus pour assurer une régulation précise de la température.
5. En raison du contact étroit entre le **tube en alliage de tungstène** et le moule, un système de démoulage efficace doit être conçu, tel qu'une tige de poussée, un curseur ou un dispositif pneumatique, pour garantir que le tube est éjecté complètement et en douceur pour éviter tout dommage.
6. **Durée de vie du moule et facilité d'entretien** : En raison des conditions de travail difficiles des moules à tubes en alliage de tungstène, la conception doit prendre en compte le remplacement des pièces d'usure et l'entretien rapide du moule pour réduire les temps d'arrêt et les coûts de production.

3. Contrôle du processus pendant le formage

- **L'uniformité de la pression**
assure une répartition uniforme de la pression pendant le moulage ou le pressage isostatique, évitant ainsi une épaisseur de paroi inégale et des fissures.
- **Le contrôle de la densité de remplissage de poudre**
contrôle avec précision la quantité de remplissage pour éviter qu'une poudre insuffisante ne provoque une faible épaisseur de paroi ou qu'une poudre excessive ne provoque une déformation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Le gradient de température pendant le **formage et le frittage à contrôle de température affectera la structure et les performances du tuyau et doit être strictement surveillé et ajusté.**
- **Le contrôle du vieillissement au démoulage** prévient la déformation de la pièce due à un démoulage prématuré. Le temps de démoulage doit être optimisé en fonction des caractéristiques de refroidissement et de durcissement du matériau.

4. Tendances futures du développement technologique

Avec l'avancement de la technologie de fabrication, la conception et le processus de formage des moules pour tubes creux en alliage de tungstène sont également en constante innovation, notamment :

- **La conception et la simulation numériques** utilisent l'analyse par éléments finis (FEA) pour simuler le processus de formage, optimiser la structure du moule et les paramètres du processus et améliorer la qualité du produit.
- **Intégration intelligente du moule et du capteur** : les capteurs intégrés du moule surveillent la pression, la température et le déplacement en temps réel pour obtenir un contrôle de rétroaction intelligent.
- **Les moules de fabrication additive** utilisent la technologie d'impression 3D pour créer des moules avec des canaux de refroidissement complexes et des structures optimisées pour améliorer l'efficacité de la dissipation thermique et l'uniformité du formage.
- **La technologie avancée de remplissage de poudre** utilise un équipement de remplissage automatisé et une technologie assistée rhéologiquement pour améliorer l'uniformité et la densité de la distribution de la poudre.

V. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène sont essentiels pour garantir leurs performances et leur stabilité élevées. Un remplissage de poudre adapté, l'optimisation de la structure du moule et le contrôle des paramètres de fabrication permettent d'améliorer efficacement la densité, les propriétés mécaniques et la précision dimensionnelle des tubes. Avec l'introduction de technologies de fabrication numériques et intelligentes, le procédé de formage creux des tubes en alliage de tungstène gagnera en raffinement et en automatisation pour répondre aux exigences d'applications de plus en plus complexes.

3.4 Technologie de frittage et optimisation du contrôle de l'atmosphère des tubes en alliage de tungstène

Le frittage des tubes en alliage de tungstène est l'une des étapes les plus critiques du processus de fabrication, affectant directement la densité, les propriétés mécaniques et la microstructure du

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

produit. En raison du point de fusion élevé et des propriétés physiques et chimiques uniques de l'alliage de tungstène, le processus de frittage nécessite un contrôle précis de la température, de l'atmosphère et du temps pour obtenir une densification élevée, une structure uniforme et d'excellentes performances. Une atmosphère adaptée prévient l'oxydation, la décarburation et d'autres réactions néfastes, améliorant ainsi la qualité et la durée de vie du produit fini.

1. Présentation de la technologie de frittage des tubes en alliage de tungstène

Le frittage est un procédé de combinaison et de densification de particules de matériau par diffusion entre particules de poudre à haute température. Pour les tubes en alliage de tungstène, le frittage doit répondre aux exigences suivantes :

- **Haute densité** : réduit la porosité, améliore la résistance mécanique et la résistance à la corrosion ;
- **Structure uniforme** : éviter la ségrégation et les gros grains pour assurer la cohérence des propriétés mécaniques ;
- **Stabilité dimensionnelle** : contrôle du retrait de frittage pour garantir la précision dimensionnelle du tube ;
- **Qualité de surface** : évite les défauts de surface et la formation de couches d'oxyde.

Les tubes en alliage de tungstène comprennent principalement le frittage sous vide traditionnel à haute température, le frittage par réduction d'hydrogène et le frittage par pressage isostatique à chaud (HIP).

2. Contrôle de la température et du temps de frittage

- **de températures**
de 1 400 à 1 600 °C. Une température trop basse entraînera une densité insuffisante, affectant la résistance et la dureté ; une température trop élevée peut entraîner une croissance des grains et réduire la ténacité.
- **de maintien**
peut favoriser la diffusion des joints de grains et la fermeture des pores, et est généralement maintenu pendant plusieurs heures. Un temps de maintien insuffisant entraînera une densité insuffisante, tandis qu'un temps de maintien trop long augmentera la consommation d'énergie et risquera de provoquer une surchauffe.
- **La vitesse de chauffage**
peut empêcher une contrainte thermique excessive dans le matériau, susceptible d'entraîner des fissures. Un chauffage lent est généralement utilisé, notamment lors des transitions entre températures basses et températures élevées, pour éviter un rétrécissement rapide des pores.

3. Environnement atmosphérique et contrôle de l'atmosphère

Le choix de l'atmosphère de frittage des tubes en alliage de tungstène est crucial pour prévenir l'oxydation du matériau et maintenir sa stabilité chimique. Parmi les atmosphères les plus courantes, on peut citer :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **sous vide**
(10^{-3} à 10^{-5} Pa) peut efficacement prévenir l'oxydation et la contamination par les impuretés, préservant ainsi la pureté de l'alliage. Cependant, cette méthode nécessite des équipements performants et est coûteuse.
- **Une atmosphère réductrice**
contient généralement de l'hydrogène (tel que H_2 ou un $H_2 + Ar$ mélange) , qui réduit les oxydes de surface lors du frittage, favorisant ainsi la densification tout en évitant la décarburation. La pureté et la fluidité de l'atmosphère doivent être strictement contrôlées pour éviter tout risque d'explosion d'hydrogène.
- **Atmosphère protectrice**
L'atmosphère protectrice d'argon ou d'azote est également utilisée dans certains procédés pour réduire l'oxydation de surface et convient aux procédés qui ont des exigences d'atmosphère moins strictes que le vide.
- Dans certains procédés, **la technologie de conversion d'atmosphère utilise d'abord le vide ou une atmosphère réductrice pour le frittage, puis passe** à une atmosphère protectrice pour le refroidissement afin d'éviter l'oxydation thermique.

4. Application de la technologie de pressage isostatique à chaud (HIP)

Le pressage isostatique à chaud (HIP) est une méthode avancée de densification des tubes en alliage de tungstène. Il améliore considérablement la densité frittée et les propriétés mécaniques en appliquant simultanément de l'énergie thermique et une pression isostatique dans un environnement gazeux à haute température et haute pression.

- **Plage de pression**
La pression couramment utilisée dans le processus HIP est de 50 à 200 MPa, ce qui élimine efficacement la porosité résiduelle.
- **La**
température de contrôle de la température est similaire à celle du frittage conventionnel, mais grâce à l'ajout de pression, la vitesse de densification du matériau est plus rapide et le contrôle des grains est meilleur.
- **Effet d'application**
Le frittage HIP peut obtenir une structure à grains fins hautement uniforme, améliorant considérablement la résistance à la traction, la ténacité et la résistance à la corrosion des tubes en alliage de tungstène, ce qui est particulièrement adapté aux applications haut de gamme de l'industrie aérospatiale et nucléaire.

5. Contrôle des défauts pendant le processus de frittage

Les tubes en alliage de tungstène présentent des problèmes de porosité, de fissures, de grossissement du grain et de ségrégation. Les mesures d'optimisation ciblées comprennent :

- **Le prétraitement de la poudre**
utilise une poudre sphérique de haute pureté pour réduire les inclusions et améliorer la densité initiale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Optimisez la répartition de la pression et**
concevez le moule de manière raisonnable pour assurer une pression uniforme pendant le frittage et éviter un manque local de densité.
- **La pureté de l'atmosphère est améliorée**
grâce à l'utilisation de gaz de haute pureté et d'équipements de purification pour empêcher l'oxydation et l'intrusion d'impuretés.
- **Le processus de frittage en plusieurs étapes**
élimine progressivement les pores et optimise la structure du grain grâce à un contrôle du gradient de température en plusieurs étapes.

6. Tendances futures du développement de la technologie de frittage

- **Le contrôle intelligent du frittage**
utilise des capteurs et une technologie de surveillance en ligne pour obtenir une régulation en temps réel du processus de frittage et améliorer le taux de rendement.
- **La technologie de frittage à basse température et à haute efficacité**
étudie de nouveaux auxiliaires de frittage et activateurs pour réduire la température de frittage et la consommation d'énergie.
- **frittage et fabrication additive Combinés**
à la technologie de fabrication additive, le formage et le frittage intégrés de tubes complexes en alliage de tungstène peuvent être réalisés.
- **Le système d'atmosphère respectueux de l'environnement**
développe une atmosphère verte et respectueuse de l'environnement pour remplacer l'hydrogène traditionnel et réduire les risques de sécurité.

VII. Résumé

La technologie de frittage et le contrôle de l'atmosphère sont des facteurs clés pour déterminer les performances et la qualité des matériaux utilisés dans la fabrication des tubes en alliage de tungstène. L'optimisation de la température, de la durée et des conditions atmosphériques de frittage, combinée à des procédés avancés de pressage isostatique à chaud (CIC) et à des méthodes de contrôle intelligentes, permet d'améliorer considérablement la densité, les propriétés mécaniques et la durée de vie des tubes en alliage de tungstène, répondant ainsi aux exigences strictes des applications haut de gamme. À l'avenir, grâce à l'innovation continue des procédés et à une recherche approfondie sur les matériaux, la technologie de frittage des tubes en alliage de tungstène atteindra un développement encore plus efficace, écologique et intelligent.

3.5 Processus de traitement thermique et technologie d'amélioration de la densification des tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène subissent généralement un traitement thermique scientifiquement conçu pour optimiser leur microstructure, améliorer leur densification et leurs propriétés mécaniques globales. Le traitement thermique élimine non seulement les contraintes internes et améliore la morphologie des grains, mais renforce également la résistance, la ténacité et la résistance

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à la corrosion du tube. Il s'agit d'un processus clé pour améliorer la qualité globale des tubes en alliage de tungstène.

1. L'objectif principal du traitement thermique des tubes en alliage de tungstène

1. de pressage

, de frittage et d'usinage, des contraintes résiduelles sont générées à l'intérieur du tube en alliage de tungstène. Un traitement thermique approprié permet de libérer efficacement ces contraintes, de réduire les risques de déformation et de fissuration du matériau et d'assurer la stabilité dimensionnelle du tube.

2. favorise le raffinement et l'homogénéisation des grains

en contrôlant la température de chauffage et la vitesse de refroidissement, en ajustant la taille et la morphologie des grains, en inhibant la croissance des grains, en obtenant une structure uniforme et en améliorant ainsi la résistance mécanique et la ténacité.

3. Améliorer la densité et réduire la porosité

Grâce à des processus de traitement thermique appropriés, la fermeture et l'élimination des pores résiduels sont favorisées, la densité du matériau est augmentée, améliorant ainsi la résistance à la traction, la dureté et la durée de vie en fatigue.

4. Amélioration de la stabilité chimique et de la résistance à la corrosion

Le traitement thermique peut favoriser la diffusion uniforme et la solution solide des éléments d'alliage, améliorer la stabilité chimique de l'alliage et renforcer sa résistance aux environnements d'oxydation et de corrosion.

2. Types courants de processus de traitement thermique des tubes en alliage de tungstène

1. Traitement de recuit

- Plage de température : généralement entre 800°C et 1200°C, la température spécifique est sélectionnée en fonction de la composition de l'alliage et des caractéristiques structurelles.
- Mécanisme d'action : Le recuit peut soulager les contraintes internes, favoriser la recristallisation, affiner les grains et réduire les défauts structurels.
- Processus typique : chauffer lentement jusqu'à la température cible, maintenir au chaud pendant plusieurs heures, puis refroidir lentement pour éviter le stress thermique.

2. Traitement de solution

- Il est principalement utilisé pour optimiser la distribution des éléments d'alliage et éliminer la ségrégation de composition.
- Généralement, une température élevée (supérieure à 1200°C) est utilisée pour l'isolation à court terme et le refroidissement rapide pour fixer la structure de la solution solide.
- Il a un effet significatif sur l'amélioration de la résistance et de la stabilité thermique.

3. Traitement du vieillissement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- En maintenant la chaleur à une température appropriée, la solution solide sursaturée précipite une deuxième phase, renforçant le matériau.
- On le trouve généralement dans les tubes en alliage de tungstène contenant du nickel, du fer et d'autres éléments, la température de vieillissement est généralement de 400°C à 700°C.

4. Pressage isostatique à chaud (HIP)

- La combinaison d'une température élevée et d'une pression isostatique favorise la fermeture des pores et l'optimisation de la microstructure.
- Améliore considérablement la densité et les propriétés mécaniques et est souvent utilisé dans la préparation de tubes en alliage de tungstène haut de gamme.

3. Influence des paramètres du procédé de traitement thermique sur la densification

• du traitement thermique

affecte directement la granulométrie et l'efficacité de fermeture des pores du tube en alliage de tungstène. Une température trop basse entraîne un taux de diffusion insuffisant et une densification inadéquate ; une température trop élevée entraîne une augmentation de la granulométrie et une diminution de la ténacité du matériau.

• le temps de maintien

est bénéfique pour achever complètement le processus de transformation et de diffusion de la microstructure, mais un temps de maintien trop long gaspillera de l'énergie et peut provoquer un grossissement indésirable des grains.

• Méthode de refroidissement :

Le refroidissement lent aide à former une structure uniforme et à réduire le stress thermique ; le refroidissement rapide (comme le refroidissement par eau) convient au traitement en solution pour verrouiller la phase de renforcement.

• atmosphérique

est généralement effectué sous vide ou sous atmosphère protectrice pour éviter l'oxydation du matériau et la décarburation de surface.

4. Technologie avancée d'amélioration de la densification

1. Le processus de traitement thermique en plusieurs étapes

favorise efficacement l'homogénéisation de la microstructure et l'élimination de la porosité en concevant des processus de chauffage, d'isolation et de refroidissement en plusieurs étapes, améliorant considérablement les performances globales du matériau.

2. Le pressage isostatique à chaud combiné à un traitement de vieillissement

augmente d'abord la densité grâce au HIP, puis effectue un renforcement par vieillissement pour atteindre un équilibre entre résistance et ténacité.

3. Le traitement thermique au laser ou par faisceau d'électrons

utilise un chauffage local à haute densité énergétique pour obtenir une densification de surface et des gradients de propriétés, améliorant ainsi la résistance à l'usure et à la corrosion.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Le traitement thermique assisté par micro-ondes

utilise un chauffage par rayonnement micro-ondes, qui présente une efficacité thermique élevée et un chauffage uniforme, contribuant à raccourcir le temps de traitement et à affiner la structure.

V. Résumé

La fabrication de tubes en alliage de tungstène est essentielle pour garantir leurs hautes performances. Grâce à un procédé de traitement thermique rationnel et à des paramètres de traitement optimisés, non seulement la densité et l'uniformité de la microstructure des tubes en alliage de tungstène peuvent être efficacement améliorées, mais aussi leur résistance mécanique, leur ténacité et leur résistance à la corrosion peuvent être considérablement améliorées. À l'avenir, grâce au développement et à l'application continue de technologies de traitement thermique avancées, les performances des tubes en alliage de tungstène seront encore améliorées pour répondre aux exigences industrielles et haut de gamme les plus strictes.

3.6 Traitement de surface interne et externe des tubes en alliage de tungstène (polissage, galvanoplastie, PVD, etc.)

Les tubes en alliage de tungstène sont largement utilisés dans l'aérospatiale, l'industrie nucléaire, les équipements médicaux et la fabrication haut de gamme. La qualité de leurs surfaces internes et externes a un impact direct sur leurs performances, leur durabilité et leur fonctionnalité. Par conséquent, un procédé de traitement de surface scientifique et rationnel est essentiel pour améliorer les performances globales des tubes en alliage de tungstène. Cette section détaille les principales technologies de traitement de surface interne et externe des tubes en alliage de tungstène, y compris le polissage, la galvanoplastie et le dépôt physique en phase vapeur (PVD), en se concentrant sur leurs principes de processus, leurs caractéristiques techniques et leurs résultats d'application.

1. Importance du traitement de surface des tubes en alliage de tungstène

1. Finition de surface améliorée

Une bonne finition de surface permet de réduire la friction et l'usure, d'améliorer la dynamique des fluides et l'étanchéité, ce qui est particulièrement critique pour les applications de parois internes.

2. Résistance à la corrosion et à l'usure améliorées Grâce à la technologie de modification de surface,

la résistance des tubes en alliage de tungstène à la corrosion chimique et à l'usure mécanique peut être considérablement améliorée, prolongeant ainsi leur durée de vie.

3. Amélioration de l'adhérence des revêtements fonctionnels

Le prétraitement fournit une surface uniforme et propre pour les processus de revêtement ultérieurs, garantissant que le revêtement est fermement lié et remplit sa fonction prévue.

4. Répondre à des besoins industriels spécifiques

tels que les équipements médicaux nécessitent non-toxicité et innocuité, l'aérospatiale

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nécessite une résistance élevée et une résistance à la chaleur, et l'industrie électronique nécessite une conductivité élevée et des interférences anti-électromagnétiques.

2. Processus de polissage des tubes en alliage de tungstène

1. Procédé et méthodes de polissage

- **Le polissage mécanique**
utilise du papier de verre, un chiffon de polissage et de la pâte à polir pour effectuer un polissage grossier, moyen et fin en séquence afin d'éliminer la couche d'oxyde de surface et les marques d'usinage pour obtenir un effet miroir.
- **Le polissage électrolytique**
élimine les protubérances microscopiques de surface grâce à des réactions électrochimiques, obtenant une douceur de l'ordre du micron, voire du nanomètre, et convient au polissage de trous intérieurs complexes.
- **Le polissage chimique**
utilise des liquides chimiques pour dissoudre uniformément les zones inégales de la surface, améliorer la rugosité et réduire les contraintes mécaniques.

2. Effet de polissage et application

- Le polissage mécanique des surfaces externes est largement utilisé pour les surfaces décoratives et mécaniques correspondantes ;
- Le polissage de surface interne repose principalement sur le polissage électrolytique et le polissage chimique pour garantir la distribution du fluide et les performances d'étanchéité ;
- Après polissage, la rugosité de surface peut atteindre moins de Ra0,1 μm , répondant aux exigences des instruments médicaux et de précision haut de gamme.

3. Procédé de galvanoplastie de tubes en alliage de tungstène

1. Type de galvanoplastie

- **au nickel**
Le revêtement au nickel peut améliorer efficacement la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la dureté de surface, et constitue un revêtement protecteur couramment utilisé pour les tubes en alliage de tungstène.
- **Le chromage**
présente une excellente dureté et résistance à l'usure et est souvent utilisé dans les environnements à forte usure.
- **Le placage de cuivre et d'autres placages métalliques**
sont principalement utilisés pour améliorer la conductivité et fournir une bonne base d'adhérence pour les revêtements ultérieurs.

2. Procédé de galvanoplastie

- Prétraitement de surface (dégraissage, décapage, activation) ;
- Plonger dans la cuve de galvanoplastie et appliquer un courant constant pour effectuer le dépôt par réduction d'ions métalliques ;
- Le nettoyage, le séchage et le post-traitement garantissent la qualité du revêtement.

3. Avantages de la technologie de galvanoplastie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Haute efficacité, coût relativement faible, adapté à la production de masse ;
- Le revêtement est uniforme et l'épaisseur est contrôlable pour répondre aux différentes exigences d'utilisation ;
- La fonction de protection composite est obtenue grâce à un revêtement composite multicouche.

4. Procédé de dépôt physique en phase vapeur (PVD) de tubes en alliage de tungstène

1. Introduction à la technologie PVD

Le dépôt physique en phase vapeur est une technologie qui utilise des procédés physiques (évaporation, pulvérisation cathodique) pour déposer des matériaux sous forme de vapeur à la surface d'un substrat afin de former un film mince. Il est largement utilisé dans la préparation de revêtements durs, décoratifs et fonctionnels.

2. Types de revêtements PVD courants

- Les revêtements durs tels que le nitrure de titane (TiN), le nitrure de chrome (CrN) et le carbure de titane (TiC) améliorent considérablement la résistance à l'usure ;
- Le film composite multicouche améliore la ténacité du revêtement et la résistance à la corrosion ;
- Revêtement conducteur pour améliorer les propriétés électriques de surface.

3. Caractéristiques du procédé PVD

- Le film a une forte adhérence, une épaisseur uniforme et réglable ;
- Respectueux de l'environnement et sans pollution, aucun traitement chimique des déchets liquides n'est nécessaire ;
- Convient pour le revêtement de trous intérieurs complexes et de surfaces extérieures.

4. Avantages de l'application

- Améliore considérablement la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la durée de vie des tubes en alliage de tungstène ;
- Réaliser des surfaces fonctionnelles pour répondre à des besoins industriels particuliers ;
- Convient aux domaines de l'aérospatiale haut de gamme, de la médecine et de la fabrication de précision.

5. Autres technologies de traitement de surface des tubes en alliage de tungstène

- **Le grenailage**
utilise la pulvérisation à grande vitesse de petites particules pour impacter la surface, formant une couche de contrainte de compression, améliorant ainsi la résistance à la fatigue et à l'usure.
- **Le traitement de surface au laser**
permet une densification et un durcissement locaux de la surface grâce au chauffage et au revêtement au laser.
- **Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD)**
est utilisé pour préparer des revêtements de haute pureté et de haute densité destinés à être utilisés dans des environnements à haute température et corrosifs.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6. Exigences complètes pour le traitement de surface interne et externe des tubes en alliage de tungstène

- La paroi intérieure doit être lisse et exempte d'impuretés pour éviter la résistance des fluides et la corrosion ;
- Le traitement des parois extérieures se concentre sur la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la qualité de l'apparence ;
- Lors de la sélection d'un procédé de traitement de surface approprié, il est nécessaire de prendre en compte de manière exhaustive le diamètre du tuyau, l'environnement d'application et la rentabilité ;
- Combinaison de plusieurs procédés (tels que le polissage + la galvanoplastie + le PVD) pour maximiser les performances.

VII. Résumé

Les technologies de traitement de surface des tubes en alliage de tungstène englobent un large éventail de méthodes, du polissage mécanique traditionnel aux revêtements PVD avancés, chacune présentant des avantages uniques et complémentaires. Une conception rationnelle des procédés et un contrôle opérationnel précis permettent non seulement d'améliorer significativement la qualité de surface et les performances des tubes en alliage de tungstène, mais aussi de répondre aux besoins variés de divers secteurs industriels. Grâce aux progrès technologiques, les procédés de traitement de surface deviendront plus respectueux de l'environnement, plus efficaces et plus intelligents, offrant ainsi une base solide pour les applications haut de gamme des tubes en alliage de tungstène.

3.7 Nouvelles technologies de fabrication de tubes en alliage de tungstène : extrusion, laminage et fabrication additive

Face à l'augmentation constante des exigences en matière de performance des matériaux et d'efficacité de fabrication pour les tubes en alliage de tungstène, la métallurgie des poudres traditionnelle, bien que mature et fiable, se heurte à des limites liées à la complexité des formes, à la personnalisation haute performance et à la rapidité de production. Ces dernières années, de nouvelles technologies de fabrication, telles que l'extrusion, le laminage et la fabrication additive, ont progressivement été introduites dans le processus de fabrication des tubes en alliage de tungstène, devenant ainsi un moteur essentiel de l'innovation technologique et de la modernisation des produits dans l'industrie. Cette section explore en détail les principes, les caractéristiques des procédés, les avantages et les perspectives d'application de ces trois technologies émergentes pour la production de tubes en alliage de tungstène.

1. Technologie d'extrusion de tubes en alliage de tungstène

1. Aperçu de la technologie d'extrusion

L'extrusion est une méthode de travail des plastiques qui utilise une pression élevée pour forcer des billettes d'alliage de tungstène chauffées à travers un orifice de filière afin de former un tube à section continue. Ce procédé est largement utilisé dans la fabrication de tubes métalliques et permet

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'améliorer la densité de la microstructure et les propriétés mécaniques des tubes en alliage de tungstène.

2. Procédé d'extrusion

- **Préparation de l'ébauche** : Chauffer le bloc d'alliage de tungstène pré-fritté à une température de déformation plastique appropriée (généralement supérieure à 1100°C) ;
- **Moule conception** : Un moule creux spécialement conçu est utilisé pour contrôler les diamètres intérieurs et extérieurs et l'épaisseur de la paroi du tuyau ;
- **Extrusion** : Utilisation d'une extrudeuse hydraulique ou mécanique pour appliquer une pression afin de forcer le matériau à travers un trou de filière pour former un tube ;
- **Traitement ultérieur** : Le tube extrudé doit généralement être traité thermiquement et usiné pour atteindre les exigences de précision dimensionnelle et de qualité de surface.

3. Avantages de la technologie d'extrusion

- Améliorer considérablement la densité et l'uniformité du grain du matériau ;
- Affiner les grains et améliorer la résistance mécanique et la plasticité des tubes en alliage de tungstène ;
- tubes en alliage de tungstène à sections complexes et à grands diamètres ;
- Haute efficacité de production, adaptée à la production de lots moyens et grands.

2. Technologie de laminage de tubes en alliage de tungstène

1. Aperçu de la technologie du laminage

Le laminage est un procédé qui utilise des rouleaux pour appliquer une contrainte de compression, comprimant et déformant progressivement la billette en alliage de tungstène pour former des tubes à parois minces. Les méthodes de laminage à chaud et à froid permettent d'ajuster efficacement l'épaisseur et les propriétés mécaniques du tube.

2. Processus de laminage

- **Laminage à chaud initial** : chauffage de la billette de tube en alliage de tungstène à la température plastique, puis réalisation de plusieurs laminages à chaud pour réduire l'épaisseur de la paroi du tube ;
- **Finition par laminage à froid** : le laminage à froid améliore encore la qualité de surface et la précision dimensionnelle, et améliore les propriétés mécaniques ;
- **Recuit** : Le recuit est effectué lorsque cela est nécessaire pour soulager les contraintes et optimiser la microstructure.

3. Avantages de la technologie du laminage

- Grâce à de multiples étapes de déformation, un contrôle précis de la taille et une épaisseur de paroi uniforme sont obtenus ;
- La structure du grain peut être contrôlée pour améliorer la ténacité et la résistance à la fatigue ;
- Excellente qualité de surface, réduisant la charge de l'usinage ultérieur ;
- Convient à la production de tubes en alliage de tungstène à paroi mince de haute précision.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Technologie de fabrication additive de tubes en alliage de tungstène

1. Aperçu de la technologie de fabrication additive

La fabrication additive (FA), également appelée impression 3D, permet la fabrication de pièces complexes par dépôt de matière couche par couche. Son application à la fabrication de tubes en alliage de tungstène se développe progressivement et est particulièrement adaptée aux structures internes personnalisées et complexes.

2. Types de méthodes de fabrication additive

- **Fusion sélective par laser (SLM)** : utilise des lasers à haute énergie pour faire fondre la poudre métallique couche par couche afin de construire des pièces très denses ;
- **Fusion par faisceau d'électrons (EBM)** : utilise un faisceau d'électrons pour un dépôt à haute énergie, adapté aux matériaux à point de fusion élevé tels que les alliages de tungstène ;
- **Dépôt d'énergie directe (DED)** : la poudre ou le fil est éjecté à travers une buse et fondu et déposé immédiatement, adapté à la réparation et à la fabrication de pièces de grande taille.

3. Avantages et défis de la fabrication additive

- **Avantages :**
 - Il est possible de fabriquer des canaux internes complexes et des tuyaux de formes spéciales ;
 - Raccourcir considérablement le cycle de R&D et prendre en charge la personnalisation en petits lots ;
 - Réduire le gaspillage de matériaux et améliorer l'utilisation des ressources.
- **défi :**
 - l'alliage de tungstène entraîne des exigences extrêmement élevées en matière d'équipement pendant le processus d'impression ;
 - Il est difficile de contrôler la porosité et les défauts à l'intérieur des pièces imprimées ;
 - Un processus de post-traitement complet est nécessaire pour garantir les propriétés mécaniques et la stabilité dimensionnelle.

4. Application globale et perspectives des nouvelles technologies de préparation

1. Les technologies de

fabrication additive sont adaptées à la production de masse, garantissant des propriétés mécaniques et des dimensions constantes des tubes en alliage de tungstène. La fabrication additive, quant à elle, est adaptée au développement sur mesure de structures complexes et de tubes à gradient fonctionnel. La combinaison de ces trois technologies permettra de créer un système de production plus flexible et plus performant.

2. Marge d'amélioration des performances :

les technologies avancées de traitement thermique et de traitement de surface combinées à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de nouveaux processus de préparation peuvent encore améliorer la résistance aux hautes températures, la résistance à l'usure et la durée de vie des tuyaux.

3. Perspectives de promotion industrielle :

Avec l'avancement de la technologie des équipements et l'amélioration de la technologie des matériaux, les technologies d'extrusion, de laminage et de fabrication additive des tubes en alliage de tungstène continueront de mûrir, favorisant l'expansion des applications des tubes en alliage de tungstène dans l'aérospatiale, l'industrie nucléaire, les équipements médicaux et la fabrication haut de gamme.

V. Résumé

Les nouvelles technologies de fabrication de tubes en alliage de tungstène, représentées par l'extrusion, le laminage et la fabrication additive, ont permis de surmonter les obstacles des procédés de fabrication traditionnels, améliorant ainsi les performances des produits et la complexité structurelle. À l'avenir, grâce à l'intégration technologique et à l'optimisation des procédés, nous répondrons efficacement aux exigences de plus en plus diversifiées et haut de gamme du marché, contribuant ainsi à l'entrée de l'industrie des tubes en alliage de tungstène dans une nouvelle phase de développement de haute qualité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

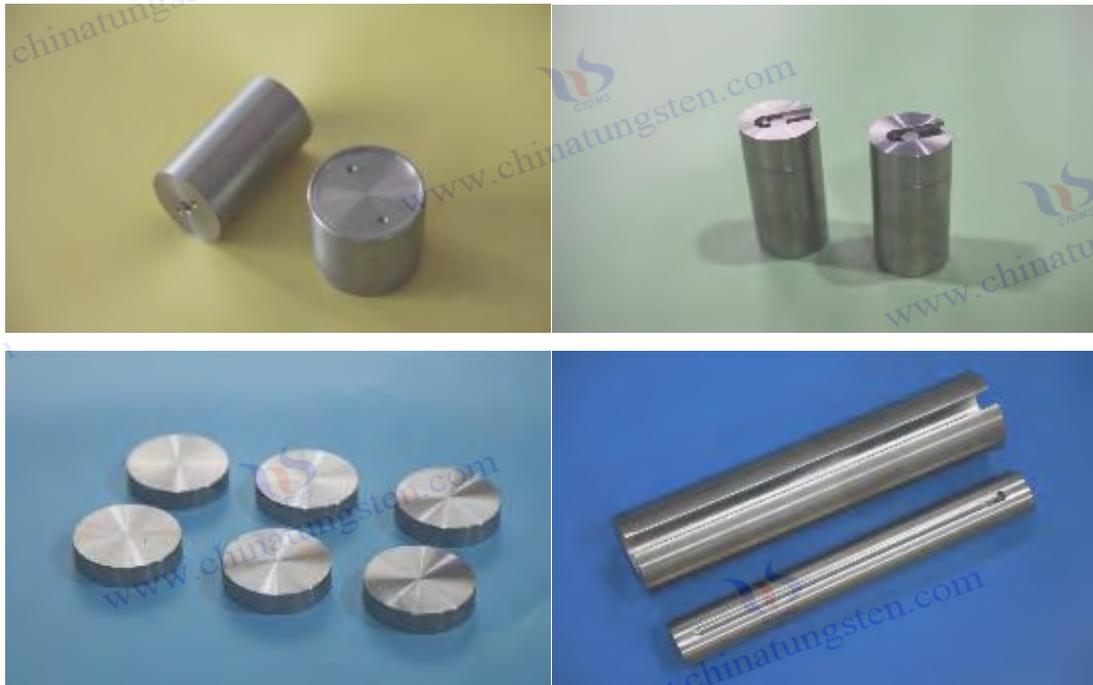
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

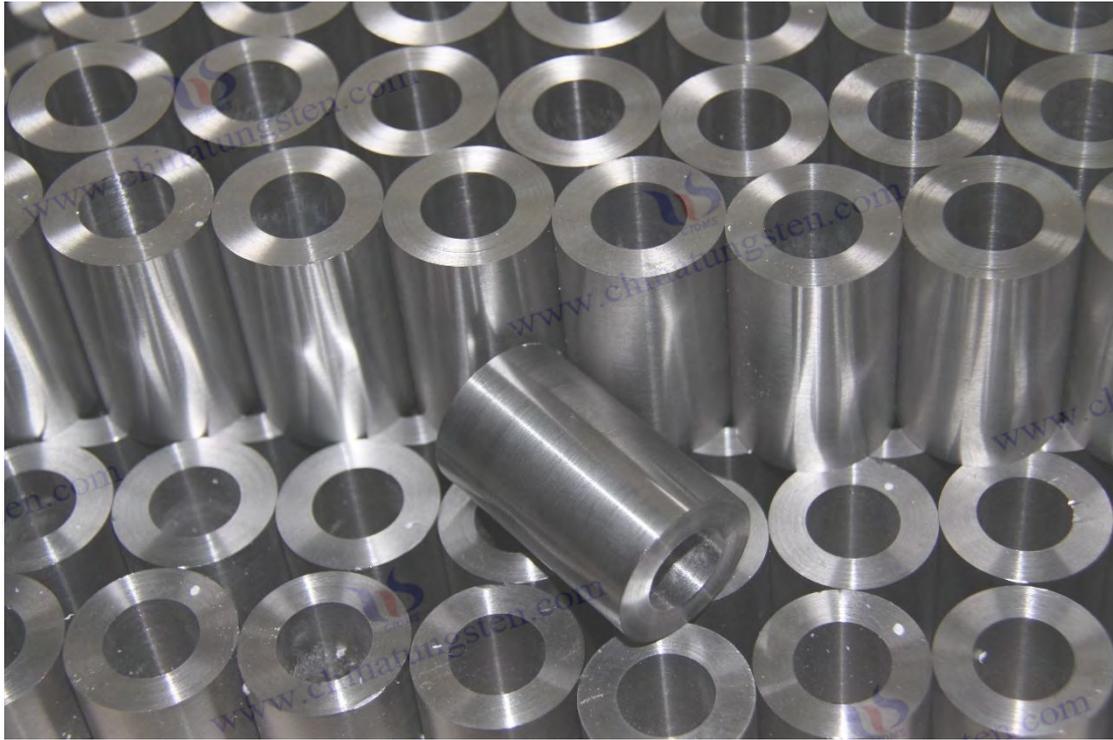
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



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

4.1 Méthodes d'inspection de l'apparence et des dimensions géométriques des tubes en alliage de tungstène

Composants clés des matériaux hautes performances, l'aspect et les dimensions géométriques des tubes en alliage de tungstène ont un impact direct sur leur transformation ultérieure et les performances de leur application finale. Des tests d'aspect et de dimensions rigoureux et précis sont essentiels pour garantir la qualité des tubes en alliage de tungstène. Les paragraphes suivants détaillent les principales méthodes, les points techniques clés et les applications pratiques des tests d'aspect et de dimensions géométriques des tubes en alliage de tungstène.

1. Méthode d'inspection de l'apparence des tubes en alliage de tungstène

1. Inspection visuelle (inspection visuelle)

- **Objectif de l'inspection :** Observer s'il y a des fissures, des pores, des inclusions, des taches d'oxydation, des rayures, des déformations et d'autres défauts évidents sur la surface du tuyau.
- **Méthodes et outils :**
 - Vision artificielle combinée à l'assistance d'une source lumineuse (lumière naturelle ou éclairage professionnel) ;
 - Utilisez une loupe ou un microscope pour vous aider à agrandir et à observer les défauts subtils ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Combiné avec des caméras numériques ou des systèmes de caméras haute définition pour réaliser l'enregistrement et l'analyse des défauts de surface.
- **Normes d'inspection** : Déterminez le type et la gravité des défauts en fonction des normes du produit ou des exigences du client, et gérez-les à différents niveaux.

2. Détection de la brillance de la surface

- **Objectif du test** : évaluer l'effet de polissage ou de revêtement de la surface du tube en alliage de tungstène et refléter la qualité du traitement et l'état de surface.
- **Outil de test** : Brillancemètre, qui détermine le degré de finition de surface en mesurant l'intensité de la lumière réfléchie.

3. Détection du profil de surface et de la rugosité

- **Objectif du test** : Quantifier les micro-ondulations de surface et évaluer les effets des procédés de traitement de surface.
- **Equipements d'essai** : rugosimètre, profilomètre et autres instruments de précision, capables de détecter des paramètres de rugosité tels que Ra et Rz.

2. Méthode d'essai des dimensions géométriques des tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène présentent des dimensions clés telles que le diamètre extérieur, le diamètre intérieur, l'épaisseur de paroi, la longueur, la concentricité, la rectitude et la circularité. Les méthodes d'essai courantes sont les suivantes :

1. Mesure du diamètre extérieur et intérieur

- **Outils** : Pied à coulisse, micromètre, alésoir, machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).
- **Remarques** :
 - Utiliser des outils de mesure de haute précision pour garantir que les erreurs de mesure restent dans la plage standard ;
 - Les points de mesure doivent être répartis uniformément sur différentes sections du tuyau pour détecter l'uniformité dimensionnelle.

2. Mesure de l'épaisseur de paroi

- **méthode** :
 - **Jauge d'épaisseur mécanique** : telle qu'un micromètre, utilisée pour mesurer l'épaisseur de la paroi du tuyau échantillon ;
 - **Jauge d'épaisseur à ultrasons** : mesure sans contact, adaptée à la détection en ligne et aux tuyaux à structure complexe ;
 - **Inspection aux rayons X** : utilisée pour l'analyse de haute précision de l'épaisseur des parois et de la forme de la cavité intérieure.
- **Avantages de l'application** : Les méthodes par ultrasons et rayons X conviennent aux tests non destructifs pour garantir que les tuyaux ne présentent aucun défaut interne.

3. Mesure de la longueur

- **Outils** : mètre ruban en acier, télémètre laser, etc.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Points techniques** : La mesure de la longueur doit garantir que la surface d'extrémité du tuyau est plane pour éviter les erreurs de mesure causées par des surfaces d'extrémité irrégulières.

4. Essais de circularité et de concentricité

- **Importance de la détection** : Assurer la rondeur de la section transversale du tuyau et la concentricité des diamètres intérieur et extérieur pour éviter une force inégale pendant le traitement ou l'utilisation.
- **Équipement d'essai** : testeur de circularité, machine de mesure tridimensionnelle (MMT), qui calcule l'erreur de circularité et l'écart de concentricité en scannant la section transversale du tuyau.

5. Détection de rectitude et de courbure

- **Objectif du test** : Confirmer la forme linéaire du tuyau et éviter toute déformation pouvant entraîner des difficultés d'installation et d'utilisation.
- **Méthode de test** : Utiliser une règle de rectitude, un scanner laser ou un instrument de mesure de courbure spécial.

3. Processus de test et contrôle qualité

1. Principes d'échantillonnage

- Élaborer des plans d'échantillonnage conformément aux normes pertinentes (telles que GB/T, ASTM) ou aux accords clients pour garantir la représentativité des tests.

2. Environnement de test

- Effectuez la mesure dans un environnement à température et humidité constantes pour réduire l'impact de la température et de l'humidité sur la mesure dimensionnelle.
- Prévenez la pollution et les rayures et gardez la surface du tuyau intacte.

3. Enregistrement et analyse des données de test

- Établir un système complet de gestion des données d'inspection, comprenant les résultats d'inspection, les types de défauts et les enregistrements de localisation.
- Analyser statistiquement la tendance de fluctuation de taille et ajuster le processus de production dans le temps.

4. Critères de jugement

- La qualification est déterminée en fonction des normes nationales, des spécifications de l'industrie ou des exigences techniques du client.
- pour les articles non conformes afin de garantir que les produits répondent aux spécifications de conception.

4. Application d'une technologie de détection avancée

- **Machine de mesure tridimensionnelle (MMT)** : réalisez une mesure tridimensionnelle de haute précision des dimensions géométriques complexes des tubes en alliage de tungstène avec un degré élevé d'automatisation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Scanner optique** : obtient rapidement des données morphologiques tridimensionnelles de la surface et de la section transversale du tuyau, adaptées aux tuyaux aux formes complexes.
- **Système de vision industrielle** : Combiné à la technologie de reconnaissance d'image, il réalise une détection et une classification automatisées des défauts d'apparence.

V. Résumé

La qualité des tubes en alliage de tungstène est essentielle à la garantie de leur qualité. Grâce à l'utilisation de divers équipements et technologies de test de pointe, à un processus de test rationnel et à des critères stricts, nous pouvons garantir efficacement la stabilité et la fiabilité des performances des tubes en alliage de tungstène, tant pendant la production que pendant l'application. Grâce au développement de technologies de test automatisées et intelligentes, le contrôle qualité des tubes en alliage de tungstène gagnera en précision et en efficacité, offrant ainsi une garantie solide pour les applications haut de gamme.

4.2 Essai de densité et caractérisation de la densité de la microstructure d'un tube en alliage de tungstène

La densité et la microstructure des tubes en alliage de tungstène sont des indicateurs importants de la qualité et des performances du matériau. Les tubes en alliage de tungstène à haute densité et à microstructure élevée présentent généralement d'excellentes propriétés mécaniques, une excellente résistance à l'usure et des caractéristiques physiques stables, ce qui les rend largement utilisés dans des domaines haut de gamme tels que l'aérospatiale, l'industrie nucléaire et les applications militaires. Par conséquent, il est essentiel de tester avec précision la densité des tubes en alliage de tungstène et de caractériser leur microstructure pour garantir la qualité du produit.

1. Méthode d'essai de densité d'un tube en alliage de tungstène

1. Calcul de la densité théorique

- Selon la fraction massique et la densité de chaque composant du tube en alliage de tungstène, la densité théorique de l'alliage est obtenue par calcul de moyenne pondérée.

- La formule est :

$$\rho_{\text{théorique}} = \sum (w_i \times \rho_i)$$

- où w_i est la fraction massique de chaque composant, et ρ_i est la densité de chaque composant.
- La densité théorique est la référence de densité d'un matériau dans des conditions idéales.

2. Mesure de la densité réelle

- **Méthode d'Archimède** :

- Le principe de flottabilité de l'eau est utilisé pour mesurer la différence de masse du tube en alliage de tungstène dans l'air et l'eau, et sa densité réelle est calculée.
- Applicable aux échantillons de tubes en alliage de tungstène de forme régulière et de volume mesurable.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les étapes de mesure sont simples et la précision est élevée, et il est largement utilisé dans les laboratoires et les sites de production.
- **Méthode de déplacement de gaz (méthode du pycnomètre) :**
 - Le volume de l'échantillon est remplacé par du gaz (comme l'hélium), ce qui convient aux échantillons aux formes complexes ou difficiles à immerger dans l'eau.
- **Méthodes de diffraction des rayons X (DRX) et de tomographie :**
 - Associé à des instruments de haute précision pour obtenir des données de volume et de masse, il convient aux besoins de test haut de gamme.

3. Notes sur la mesure de la densité

- L'échantillon doit être maintenu propre et exempt de toute adhérence superficielle.
- La température et l'humidité ambiantes mesurées doivent être stables pour éviter les erreurs.
- Plusieurs mesures ont été effectuées sur plusieurs lots d'échantillons, et la moyenne et l'écart type ont été calculés pour garantir la fiabilité des données.

2. Technologie de caractérisation de la densité de la microstructure des tubes en alliage de tungstène

1. Observation de la microstructure

- **Microscopie optique (MO) :**
 - Observez la microstructure après frittage, y compris la taille des grains, la distribution des limites des grains et la porosité.
 - Il peut évaluer qualitativement la densité et identifier les pores et les défauts macroscopiques.
- **Microscopie électronique à balayage (MEB) :**
 - Fournit des images de morphologie microscopique haute résolution, capables d'observer de minuscules pores, des inclusions et des limites de grains.
 - Combiné à l'analyse du spectre dispersif en énergie (EDS), la distribution des éléments peut être détectée et l'uniformité du matériau peut être déterminée.

2. Détermination de la porosité

- Un logiciel d'analyse d'images a été utilisé pour mesurer quantitativement la porosité des images microscopiques et calculer la densité des tissus.
- Une faible porosité (densité élevée) signifie de meilleures propriétés mécaniques et une meilleure stabilité.

3. Tomodensitométrie (TDM) à rayons X

- La technologie de contrôle non destructif détecte avec précision la distribution, la taille et la quantité des pores internes en reconstruisant la structure interne du tuyau en trois dimensions.
- Haute précision et haute résolution, adapté au contrôle qualité des tubes en alliage de tungstène aux formes complexes.

4. Analyse de corrélation entre densité et compacité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Le rapport entre la densité réelle et la densité théorique reflète le niveau de densité du tube en alliage de tungstène.
- Plus la densité est élevée, meilleures sont les propriétés mécaniques, la conductivité thermique et la durée de vie du matériau.
- En combinant les tests de densité avec la caractérisation des tissus, nous pouvons guider l'optimisation des processus et améliorer la qualité des produits.

3. Guide de contrôle de la qualité et d'amélioration des processus

- Sur la base des résultats des tests de densité et de compacité, les effets des paramètres du processus de frittage, de la qualité des matières premières et des propriétés de la poudre sur la densification ont été analysés.
- Ajustez la température, le temps et l'atmosphère de frittage, optimisez la distribution granulométrique de la poudre et améliorez la densité globale du tube.
- Des technologies auxiliaires telles que le pressage isostatique à chaud (HIP) sont utilisées pour éliminer davantage la porosité interne et améliorer la densité et l'uniformité structurelle.

IV. Résumé

Les tests de densité et la caractérisation de la microstructure des tubes en alliage de tungstène sont essentiels pour garantir la performance des produits. La combinaison de multiples méthodes de test et de techniques de caractérisation avancées permet une évaluation précise de la qualité des matériaux et guide l'optimisation continue des processus de production. Les tubes en alliage de tungstène haute densité améliorent non seulement la résistance mécanique et la résistance à la corrosion, mais répondent également aux exigences de stabilité des matériaux des applications exigeantes, offrant ainsi une base solide pour les applications haut de gamme.

4.3 Normes d'essai des propriétés mécaniques des tubes en alliage de tungstène (ASTM, GB, ISO)

Les tubes en alliage de tungstène sont directement liés à la sécurité et à la durée de vie du produit. Pour garantir que leurs propriétés mécaniques répondent aux exigences de conception, ils doivent être systématiquement et rigoureusement testés conformément aux normes internationales et nationales reconnues. Les principales normes utilisées sont celles de l'American Society for Testing and Materials (ASTM), de la Chinese National Standard (GB) et de l'Organisation internationale de normalisation (ISO).

1. Indicateurs clés du test des propriétés mécaniques du tube en alliage de tungstène

les tubes en alliage de tungstène couvrent généralement les aspects suivants :

- **Résistance à la traction** : Mesure de la capacité d'un matériau à résister à la rupture par traction.
- **Limite d'élasticité** : Valeur de contrainte à laquelle le matériau commence à subir une déformation plastique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Ténacité à la rupture** : Capacité d'un matériau à résister à la propagation des fissures.
- **Allongement** : Degré de déformation plastique d'un matériau avant qu'il ne se brise sous tension.
- **Dureté** : Capacité d'un matériau à résister à une déformation plastique locale.
- **Résistance à la fatigue** : Capacité d'un matériau à résister à la rupture sous contrainte cyclique.
- **Résistance à la compression** : Capacité d'un matériau à résister à la rupture par compression.

2. Introduction aux principales normes de test

1. Normes ASTM (American Society for Testing and Materials)

- **La norme ASTM E8/E8M** — « Méthodes standard d'essai de traction des matériaux métalliques »
spécifie les méthodes d'essai de traction applicables aux matériaux métalliques, applicables aux essais de résistance à la traction, de limite d'élasticité et d'allongement des éprouvettes de tubes en alliage de tungstène. Elle comprend notamment la préparation des éprouvettes, l'équipement d'essai, les procédures d'essai et les méthodes de calcul des données.
- **ASTM E23** — « Méthode standard pour les essais d'impact des matériaux métalliques (essai d'impact Charpy) »
est utilisée pour évaluer la ténacité à la rupture et les propriétés d'impact des matériaux, et est particulièrement adaptée à l'évaluation de la ténacité des tubes en alliage de tungstène.
- **ASTM E399** — « Norme d'essai de ténacité à la rupture des matériaux métalliques »
mesure la ténacité à la rupture des matériaux et fournit des paramètres de conception sûrs pour les tubes en alliage de tungstène haut de gamme .
- **La norme ASTM E466** — « Méthodes d'essai de fatigue des matériaux métalliques »
évalue les performances de fatigue des tubes en alliage de tungstène et est particulièrement adaptée aux exigences de charge cyclique des industries aérospatiale et militaire.

2. GB (norme nationale chinoise)

- **GB/T 228.1** — « Méthodes d'essai de traction des matériaux métalliques à température ambiante »
Cette norme, similaire à l'ASTM E8, spécifie les exigences et les méthodes d'essai des propriétés de traction des tubes en alliage de tungstène et est largement utilisée dans la production nationale et le contrôle de la qualité.
- **La norme GB/T 2975** — « Méthode d'essai d'impact Charpy pour matériaux métalliques »
est utilisée pour déterminer la ténacité aux chocs des matériaux et garantir la résistance aux fissures des tubes en alliage de tungstène.
- **La norme GB/T 15248** — « Méthode d'essai de la ténacité à la rupture des matériaux métalliques »
convient à l'analyse quantitative de la ténacité à la rupture des tubes en alliage de tungstène.
- **La norme GB/T 3075** — « Méthodes d'essai de fatigue des matériaux métalliques »
évalue la durabilité des matériaux soumis à une charge de fatigue.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. ISO (Organisation internationale de normalisation)

- **La norme ISO 6892-1** — « Matériaux métalliques, méthodes d'essai de traction » s'applique aux essais de résistance à la traction et d'allongement des tubes en alliage de tungstène et est conforme aux spécifications d'essai unifiées au niveau international.
- **La norme ISO 148-1** — « Essai de choc Charpy pour matériaux métalliques » normalise la méthode de détermination de la résistance aux chocs des matériaux.
- **La norme ISO 12135** — « Matériaux métalliques, essai de ténacité à la rupture » est un essai reconnu internationalement pour la ténacité à la rupture des tubes en alliage de tungstène.
- **La norme ISO 1099** — « Essais de fatigue sur matériaux métalliques » est utilisée pour déterminer la durée de vie en fatigue et la limite de fatigue.

3. Exigences de préparation des échantillons pour les essais de propriétés mécaniques

- Les échantillons doivent être traités conformément à la forme et à la taille spécifiées dans les normes pertinentes pour garantir l'exactitude et la répétabilité des résultats des tests.
- Les échantillons de tubes en alliage de tungstène doivent généralement être coupés en pièces d'essai de longueur spécifiée pour garantir que la section transversale est complète et exempte de défauts.
- La surface de l'échantillon doit être correctement traitée, par exemple par ébavurage et polissage, afin de réduire l'influence de la concentration de contraintes sur les résultats des tests.

4. Équipement d'essai et exigences environnementales

- Les équipements d'essai de traction, de compression, d'impact et de fatigue doivent être étalonnés pour garantir des données précises.
- La température et l'humidité de l'environnement de test doivent être conformes aux exigences standard, et les tests de température normale adoptent généralement une température ambiante d'environ 25 °C.
- Pour les tests de propriétés mécaniques à haute température, un dispositif de test spécial à haute température est requis.

5. Traitement des données et évaluation de la qualité

- Les données de test des propriétés mécaniques doivent être calculées selon des méthodes standard, y compris des indicateurs tels que la charge maximale, la limite d'élasticité et l'allongement.
- En comparant avec les exigences standard, il est déterminé si le tube en alliage de tungstène répond aux exigences de conception et d'utilisation.
- L'analyse statistique de plusieurs lots d'échantillons contribue au contrôle du processus de production et à l'amélioration continue.

VI. Résumé

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les tubes en alliage de tungstène doivent respecter scrupuleusement les normes internationales et nationales faisant autorité, telles que ASTM, GB et ISO, afin de garantir des tests scientifiques et des résultats précis. Un système complet de tests des propriétés mécaniques fournit non seulement un support technique pour la conception, la production et l'application des tubes en alliage de tungstène, mais constitue également une base fiable pour la sécurité des utilisateurs et l'assurance des performances. Face à l'amélioration constante des performances des tubes en alliage de tungstène, les normes pertinentes sont constamment mises à jour. L'industrie doit continuer à suivre l'évolution des normes pour maintenir son avance technologique.

4.4 Analyse métallographique et observation de la microstructure d'un tube en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène constituent un outil essentiel pour évaluer la structure interne des matériaux et en contrôler la qualité. Ils permettent de révéler intuitivement les caractéristiques microstructurales, la distribution des phases, la granulométrie, les défauts de pores et autres défauts microscopiques des matériaux. Ils sont essentiels pour comprendre les performances et les mécanismes de défaillance des tubes en alliage de tungstène, ainsi que pour optimiser les paramètres de procédé.

1. Objectif de l'analyse métallographique des tubes en alliage de tungstène

- **Observer la structure des grains** : évaluer la taille, la forme et la répartition des grains. L'affinage des grains contribue généralement à améliorer les propriétés mécaniques de l'alliage.
- **Analyser la composition et la distribution des phases** : identifier les différentes phases formées par des éléments tels que le tungstène, le nickel et le fer, et déterminer l'uniformité et la stabilité de phase de l'alliage.
- **Détection de pores et d'inclusions** : Révélation de la porosité et de la présence d'inclusions non métalliques lors du processus de frittage, qui affectent directement les propriétés mécaniques et la densité.
- **effet du traitement thermique** : Optimiser les paramètres du processus de traitement thermique en comparant les changements organisationnels avant et après le traitement thermique.
- **Surveiller les microfissures et les structures de déformation** : analyser les emplacements d'initiation des fissures et les chemins de propagation pour fournir une base à l'analyse des défaillances.

2. Processus de préparation des échantillons

1. Découpe et échantillonnage Prenez la section transversale et

la section longitudinale de l'échantillon de tube en alliage de tungstène et utilisez un équipement de coupe de précision pour éviter les effets thermiques et la déformation mécanique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Montage

: Monter l'échantillon dans de la résine pour faciliter le polissage ultérieur et l'observation microscopique.

3. Le meulage grossier et le meulage fin

utilisent du papier de verre de différents grains (meulage progressif du grossier au fin, comme 400, 800, 1200, 2000 mesh) pour éliminer les marques de scie de surface et obtenir une surface lisse.

4. Polissage :

Utilisez un agent de polissage diamanté (moins de 1 μm) pour le polissage miroir afin d'éliminer les marques de meulage et d'améliorer la finition de surface.

5. Le traitement anticorrosion

nécessite le choix d'une solution corrosive adaptée (par exemple, un mélange d'acide fluorhydrique et d'acide nitrique) aux propriétés chimiques de l'alliage de tungstène. Le temps et la concentration de corrosion doivent être soigneusement contrôlés afin d'exposer les joints de grains et la structure des phases. La préparation et l'utilisation de la solution corrosive doivent respecter scrupuleusement les procédures de sécurité opérationnelle.

3. Techniques d'observation microscopique

1. Microscopie optique (MO)

- Observez la structure globale des grains, la distribution des pores, les interfaces de phase et les macro-défauts.
- La morphologie microscopique a été comprise grâce à différents grossissements et l'uniformité des tissus a été analysée de manière préliminaire.

2. Microscopie électronique à balayage (MEB)

- Fournit des images de morphologie de surface haute résolution pour une observation détaillée des limites des grains, de la distribution de phase et des petits défauts.
- Combiné à l'analyse du spectre dispersif en énergie (EDS) pour réaliser une analyse qualitative et de distribution des éléments.

3. Microscopie électronique à transmission (MET)

- Utilisé pour observer les structures organisationnelles à l'échelle nanométrique et révéler les défauts de réseau, les sous-structures et les caractéristiques d'interface.
- Il est généralement utilisé pour étudier la distribution des phases de renforcement fines et des oligo-éléments dans les tubes en alliage de tungstène.

4. Diffraction des rayons X (DRX)

- Analyser la composition de phase et la structure cristalline des tubes en alliage de tungstène, détecter les changements dans les paramètres du réseau et déterminer l'état de contrainte.

4. Relation entre les caractéristiques microstructurales et les performances

- **Granulométrie** : Des grains petits et uniformes améliorent la résistance et la ténacité des tubes en alliage de tungstène. Des grains trop gros peuvent entraîner une baisse des performances .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Uniformité de la distribution des phases** : Les phases de liaison uniformément réparties telles que le nickel et le fer contribuent à améliorer la plasticité et la résistance aux chocs de l'alliage.
- **Porosité** : Une faible porosité signifie une densité élevée, ce qui améliore les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion de l'alliage.
- **Inclusions et défauts** : La présence d'inclusions peut devenir le point de départ de fissures et réduire la durée de vie du matériau.
- **Effets du traitement thermique** : Différents processus de traitement thermique conduisent à une croissance des grains, une transformation de phase ou une libération des contraintes, et les changements microstructuraux reflètent directement l'amélioration ou la dégradation des performances.

5. L'importance de l'analyse métallographique dans les applications pratiques

Les tubes en alliage de tungstène sont souvent soumis à des conditions d'utilisation complexes dans l'aérospatiale, l'industrie nucléaire, les équipements médicaux et d'autres domaines. L'analyse métallographique nous permet de :

- Évaluez rapidement la qualité des matériaux et identifiez les défauts de production.
- Guider les ajustements de processus et optimiser les processus de moulage et de traitement thermique.
- Prévoyez les performances et la durée de vie des matériaux et fournissez un avertissement précoce en cas de défaillance.
- Soutenir la recherche et le développement de nouveaux matériaux et vérifier les effets des technologies de modification telles que le nano-renforcement et le micro-alliage.

VI. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène sont des outils essentiels pour mieux comprendre les propriétés des matériaux et garantir le contrôle qualité. Associées à des techniques de microscopie avancées, ces techniques fournissent une base scientifique et un support technique pour la recherche, le développement, la production et l'application des tubes en alliage de tungstène. À l'avenir, grâce aux progrès constants des techniques de microanalyse, l'étude microstructurale des tubes en alliage de tungstène deviendra encore plus détaillée, établissant ainsi une base solide pour la conception et la fabrication de tubes en alliage de tungstène hautes performances.

4.5 Composition chimique et tests d'impuretés des tubes en alliage de tungstène (ICP, XRF, ONH)

Les tubes en alliage de tungstène sont des facteurs clés pour déterminer leurs propriétés physiques et mécaniques. Une analyse précise et fiable de la composition chimique garantit un ratio de matériaux raisonnable et une composition uniforme, tout en prévenant l'impact négatif des impuretés nocives sur les propriétés de l'alliage. Les techniques de test couramment utilisées comprennent la spectrométrie d'émission optique à plasma inductif (ICP), la spectrométrie de fluorescence X (XRF) et les analyseurs d'oxygène, d'azote et d'hydrogène (ONH). Ces techniques,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

adaptées à la détection de différents éléments et impuretés, se complètent et constituent le système de base du contrôle qualité de la composition chimique des tubes en alliage de tungstène.

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

Principes et applications :

L'ICP excite les atomes ou les ions d'un échantillon, ce qui les fait émettre des raies spectrales de longueurs d'onde caractéristiques. L'intensité de ces raies spectrales permet ensuite de déterminer les concentrations élémentaires. Cette méthode offre une sensibilité élevée et la possibilité de détecter simultanément plusieurs éléments, ce qui la rend idéale pour l'analyse précise des éléments majeurs et traces dans les tubes en alliage de tungstène.

Contenu du test

- Principaux éléments : tungstène (W), nickel (Ni), fer (Fe), molybdène (Mo), etc.
- Oligo-éléments : cuivre (Cu), cobalt (Co), manganèse (Mn), chrome (Cr), etc.
- Éléments impurs : impuretés nocives telles que le soufre (S), le phosphore (P), le plomb (Pb) et le cadmium (Cd).

Avantages

- Haute sensibilité, capable de détecter des oligo-éléments au niveau ppm.
- La vitesse d'analyse est rapide et adaptée aux tests par lots.
- La détection simultanée de plusieurs éléments permet de gagner du temps.

Préparation des échantillons :

les échantillons de tubes en alliage de tungstène doivent généralement être dissous dans de l'acide ou fondus pour créer une solution afin de garantir l'uniformité de l'échantillon et d'éviter la perte d'éléments.

2. XRF (spectrométrie de fluorescence X)

Principes et applications :

La fluorescence X (XRF) utilise des rayons X de haute énergie pour exciter les éléments d'un échantillon, ce qui provoque l'émission de rayons X fluorescents caractéristiques. L'énergie et l'intensité des rayons X fluorescents sont utilisées pour l'analyse élémentaire qualitative et quantitative. Elle est adaptée à l'analyse rapide de la composition élémentaire des tubes en alliage de tungstène, notamment pour les tests d'échantillons solides.

Contenu du test

- Principaux éléments d'alliage : tungstène, nickel, fer, cuivre, etc.
- Les capacités de détection de certains éléments légers sont limitées.

Avantages

- La préparation des échantillons est simple et ne nécessite pas de dissolution complexe.
- Les tests non destructifs permettent de conserver l'échantillon intact.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Convient pour la détection rapide sur site et le contrôle des processus.

limitation

- La détection des éléments légers (tels que l'oxygène, l'azote et l'hydrogène) est faible.
- La sensibilité de détection est légèrement inférieure à celle de l'ICP, ce qui rend difficile la détection d'impuretés extrêmement infimes.

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

Principe et application :

L'analyseur ONH mesure la teneur en oxygène, azote et hydrogène d'un gaz en faisant fondre un échantillon à haute température. Il est adapté à la détermination précise de ces éléments légers dans les tubes en alliage de tungstène. L'oxygène, l'azote et l'hydrogène ont un impact significatif sur les propriétés mécaniques, la résistance à la corrosion et la stabilité thermique des tubes en alliage de tungstène.

Contenu du test

- Teneur en oxygène (O)
- Teneur en azote (N)
- Teneur en hydrogène (H)

Avantages

- La mesure est sensible et précise.
- Indispensable pour la détection des éléments légers et des impuretés.

La préparation des échantillons

nécessite généralement de prélever un petit morceau d'échantillon de tube en alliage de tungstène, de le placer dans un four à haute température pour le faire fondre, puis d'analyser le gaz après sa libération via le système de détection.

4. Analyse complète et contrôle qualité

Les tubes en alliage de tungstène sont souvent combinés aux technologies ICP, XRF et ONH pour former un système d'analyse de composition multi-angles et multi-niveaux. Grâce à ces méthodes, nous pouvons :

- Assurez-vous que la teneur en principaux éléments d'alliage correspond au rapport conçu.
- Surveillez avec précision le niveau d'impuretés nocives pour éviter qu'elles n'affectent les performances.
- Contrôler les éléments légers tels que l'oxygène, l'azote et l'hydrogène pour garantir des performances élevées et une grande stabilité des matériaux.
- Favoriser l'optimisation des processus et améliorer la cohérence des produits.

V. Conclusion

Les tubes en alliage de tungstène sont essentiels pour garantir la qualité des produits. Des technologies d'essai avancées telles que l'ICP, la XRF et l'ONH permettent une analyse de composition extrêmement précise et efficace, fournissant des données solides pour l'assurance des performances, le contrôle des procédés et la recherche et développement technologiques. Grâce aux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

progrès constants de l'instrumentation analytique, les tests futurs seront encore plus précis et rapides, garantissant ainsi le développement de haute qualité de l'industrie des tubes en alliage de tungstène.

4.6 Méthode d'évaluation de l'uniformité de l'épaisseur de paroi et de la coaxialité des tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène requièrent une épaisseur de paroi uniforme et une coaxialité, indicateurs clés pour garantir leurs propriétés mécaniques, leur sécurité de fonctionnement et la précision de leur usinage. L'uniformité de l'épaisseur de paroi est liée à la répartition de la résistance mécanique et à la résistance à la pression du tube, tandis que la coaxialité affecte directement la précision de l'assemblage et les performances mécaniques du tube. Des méthodes d'évaluation scientifiques et précises sont essentielles au contrôle qualité et à l'optimisation des procédés des tubes en alliage de tungstène.

1. Méthode d'évaluation de l'uniformité de l'épaisseur de paroi

1. Mesure d'épaisseur par ultrasons

- **Principe** : La différence de temps de propagation des ondes ultrasonores dans la paroi du tube en alliage de tungstène est utilisée pour mesurer l'épaisseur de la paroi du tube.
- **Avantages** :
 - Contrôle non destructif.
 - La vitesse de mesure est rapide et une numérisation rapide multipoint peut être réalisée.
 - Convient aux tests sur site et en ligne.
- **Mise en œuvre** :
 - Appliquer un agent de couplage sur la surface du tuyau pour assurer le couplage par ultrasons.
 - Utilisez une jauge d'épaisseur à ultrasons portable ou automatisée pour mesurer l'épaisseur de la paroi à plusieurs points prédéfinis.
 - Après la collecte des données, une analyse statistique est effectuée pour calculer les indicateurs d'uniformité de l'épaisseur de paroi (tels que la différence maximum-minimum, l'écart type, etc.).

2. Fluoroscopie aux rayons X ou gamma (mesure de l'épaisseur radiographique)

- **Principe** : Le rayonnement pénètre dans le tuyau et le changement d'intensité d'absorption du rayonnement reflète le changement d'épaisseur de la paroi du tuyau.
- **Avantages** :
 - Peut détecter simultanément l'épaisseur des parois et les défauts internes.
 - Forte adaptabilité aux tuyaux de formes complexes.
- **Limites** :
 - Le coût de l'équipement est élevé.
 - Des mesures de radioprotection sont nécessaires.
- **application** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Convient pour la détection de distribution d'épaisseur de paroi de haute précision et le contrôle de qualité au stade de la R&D.

3. Mesure mécanique (pieds à coulisse mécaniques, machines à mesurer tridimensionnelles)

- **Principe** : Mesurer les diamètres intérieur et extérieur du tuyau par contact mécanique et calculer l'épaisseur de la paroi.
- **avantage** :
 - Simple et intuitif, adapté aux tuyaux de grandes tailles.
- **insuffisant** :
 - L'échantillon doit être démonté, ce qui peut endommager la surface.
 - Les points de mesure sont limités, ce qui rend difficile de refléter pleinement l'uniformité de l'épaisseur de la paroi.

2. Méthode d'évaluation de la coaxialité

La coaxialité fait référence à la précision de position relative entre le diamètre intérieur et le diamètre extérieur du tube en alliage de tungstène, reflétant la précision géométrique et la qualité de traitement du tube.

1. Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT)

- **Principe** : Utiliser une sonde de mesure 3D pour collecter des données de nuage de points des surfaces intérieures et extérieures du tuyau et calculer la coaxialité via un logiciel.
- **Avantages** :
 - Mesure de haute précision.
 - Des rapports détaillés sur les écarts géométriques peuvent être générés.
 - Convient aux tuyaux complexes et aux exigences de tolérance strictes.
- **étape** :
 - Configurez le programme de mesure et collectez plusieurs points des diamètres intérieurs et extérieurs selon les besoins.
 - Le logiciel adapte la forme cylindrique et calcule l'écart d'axe entre les deux.

2. Méthode de mesure du diamètre intérieur et extérieur

- **méthode** :
 - Mesurez respectivement les valeurs de diamètre multipoint du diamètre intérieur et du diamètre extérieur du tuyau.
 - L'écart des lignes centrales des deux cylindres est estimé par des méthodes mathématiques.
- **applicabilité** :
 - Convient aux évaluations rapides sur site.
 - La précision est limitée par l'outil de mesure.

3. Technologie de mesure optique

- **Les scanners laser et les instruments de mesure d'image peuvent réaliser une détection de coaxialité sans contact .**
- Les avantages comprennent une haute précision, une non-destructivité et une adéquation aux tubes en alliage de tungstène à parois minces ou de précision.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Analyse des données et indicateurs d'évaluation

- **Indice d'uniformité de l'épaisseur de paroi :**
 - Différence d'épaisseur de paroi maximale (Max-Min)
 - Écart type (σ)
 - Coefficient d'uniformité (pourcentage d'uniformité)
- **Coaxialité indice :**
 - Décalage de l'axe (niveau μm)
 - Taux de conformité aux tolérances (s'il répond aux exigences de tolérance de conception)

4. Recommandations en matière de contrôle qualité

- Il est recommandé de mettre en place un système de détection en ligne de l'épaisseur de paroi et de la coaxialité pour obtenir une surveillance en temps réel.
- Calibrez régulièrement l'équipement de mesure pour garantir des données de test précises.
- Sur la base des résultats des tests, des commentaires sont donnés sur les ajustements du processus, la conception du moule et le processus de formage sont optimisés et la qualité globale des tubes en alliage de tungstène est améliorée.

V. Résumé

L'uniformité de l'épaisseur de paroi et la coaxialité sont des indicateurs clés de qualité pour les tubes en alliage de tungstène. Grâce à diverses techniques, telles que la mesure d'épaisseur par ultrasons, les contrôles radiographiques, la mesure de coordonnées tridimensionnelles et la mesure optique, nous pouvons réaliser une évaluation complète et précise des tubes en alliage de tungstène, fournissant ainsi des données solides pour garantir la performance des produits et améliorer les processus.

4.7 Technologie de détection des défauts de surface et de paroi intérieure des tubes en alliage de tungstène (courants de Foucault, tomodynamométrie, ultrasons)

Les tubes en alliage de tungstène présentent des défauts de surface et internes qui impactent directement leurs propriétés mécaniques, leur durée de vie et leur sécurité. Par conséquent, l'utilisation de techniques de contrôle non destructif de haute précision pour inspecter ces tubes afin de détecter les défauts de surface et internes est essentielle au contrôle qualité et à l'assurance de performance. Les applications et avantages des contrôles par courants de Foucault, de la tomodynamométrie (TDM) et des ultrasons pour la détection des défauts dans les tubes en alliage de tungstène sont détaillés ci-dessous.

1. Essai par courants de Foucault (ECT)

1. Introduction au principe

Les tests par courants de Foucault utilisent le principe de l'induction électromagnétique pour identifier les fissures de surface, les piqûres, la corrosion et d'autres défauts en détectant les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

changements dans les courants de Foucault induits sur la surface du tuyau et les matériaux conducteurs proches de la surface.

2. Avantages de l'utilisation de tubes en alliage de tungstène

- **Haute sensibilité** : Très sensible aux minuscules fissures de surface et à la corrosion, capable de détecter des défauts submillimétriques.
- **Numérisation rapide** : convient aux tests non destructifs rapides et peut réaliser des tests en ligne en production de masse.
- **Détection sans contact** : évite d'endommager la surface du tuyau.
- **géométries complexes** : Différentes conceptions de sondes peuvent être utilisées pour détecter la paroi intérieure du tuyau et les pièces complexes.

3. Limitations

- La profondeur de détection est limitée, ce qui rend difficile la détection de défauts internes profonds.
- Une certaine connaissance des propriétés électromagnétiques du matériau est nécessaire pour ajuster les paramètres de détection.

2. Tomodensitométrie (TDM)

1. Introduction au principe

La tomodensitométrie utilise des rayons X pour faire tourner le tuyau afin de collecter des images de projection multi-angles et reconstruit la structure interne tridimensionnelle du tuyau via un ordinateur, obtenant ainsi une imagerie intuitive des défauts internes et externes.

2. Avantages de l'utilisation de tubes en alliage de tungstène

- **Capacité d'imagerie tridimensionnelle** : peut afficher avec précision l'emplacement, la taille, la forme et la distribution spatiale du défaut.
- **Haute résolution** : convient à la détection de défauts internes tels que fissures fines, pores, inclusions, etc.
- **Non destructif** : pas besoin de détruire l'échantillon, adapté à l'évaluation de la qualité des tubes en alliage de tungstène de grande valeur.
- **Tests multifonctionnels** : En plus de la détection des défauts, il peut également effectuer des analyses d'intégrité structurelle et des tests de dimensions géométriques.

3. Limitations

- Les coûts d'investissement et de maintenance des équipements sont élevés.
- Le cycle de détection est long et ne convient pas à la détection en ligne des lignes de production à grande vitesse.
- Pour les matériaux à haute densité tels que l'alliage de tungstène, l'énergie de rayonnement doit être ajustée pour assurer la pénétration.

3. Contrôle par ultrasons (UT)

1. Introduction au principe

Les tests par ultrasons utilisent des ondes sonores à haute fréquence pour se propager à travers les tuyaux et rencontrer des signaux d'ondes sonores réfléchis ou diffusés par les défauts pour détecter les défauts internes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Avantages de l'utilisation de tubes en alliage de tungstène

- **Forte capacité de pénétration** : convient à la détection de défauts profonds à l'intérieur des tuyaux, tels que les fissures, les pores, les inclusions et la séparation intercouche.
- **Plusieurs méthodes de détection** : y compris la méthode d'écho d'impulsion et la technologie de réseau phasé pour répondre aux besoins de détection de différents types de défauts.
- **La détection en ligne est possible** : adaptée à la détection rapide des lignes de production.
- **Contrôle non destructif** : aucun dommage au tube.

3. Limitations

- Il est sensible aux conditions de surface et nécessite un bon agent de couplage pour garantir la qualité de la détection.
- Les ondes sonores dans les matériaux à haute densité sont davantage atténuées et la fréquence et la puissance doivent être ajustées pour obtenir le meilleur effet.

4. Stratégie de détection complète

Afin de garantir la qualité et la sécurité des tubes en alliage de tungstène, une combinaison de diverses technologies de test est généralement utilisée :

- **Les tests par courants de Foucault** sont utilisés pour détecter rapidement les défauts de surface et proches de la surface.
- **Les tests par ultrasons** peuvent détecter en profondeur les défauts internes des parois des tuyaux, en particulier pour les tuyaux moyens et épais.
- **La tomographie** est utilisée pour l'imagerie des défauts de haute précision et l'analyse quantitative des défauts complexes.

Ce système de détection collaboratif multi-niveaux et multi-technologies améliore efficacement l'exhaustivité et la précision de la détection.

5. Résumé :

La détection des défauts de surface et d'intérieur des tubes en alliage de tungstène s'appuie sur des technologies avancées de contrôle non destructif telles que les courants de Foucault, la tomographie et les ultrasons pour comprendre parfaitement les défauts de différents types et profondeurs. Grâce à la modernisation continue et au développement intelligent des équipements de contrôle, la détection des défauts des tubes en alliage de tungstène gagnera en efficacité et en précision, garantissant ainsi la stabilité de la production et de l'application de tubes en alliage de tungstène hautes performances.

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

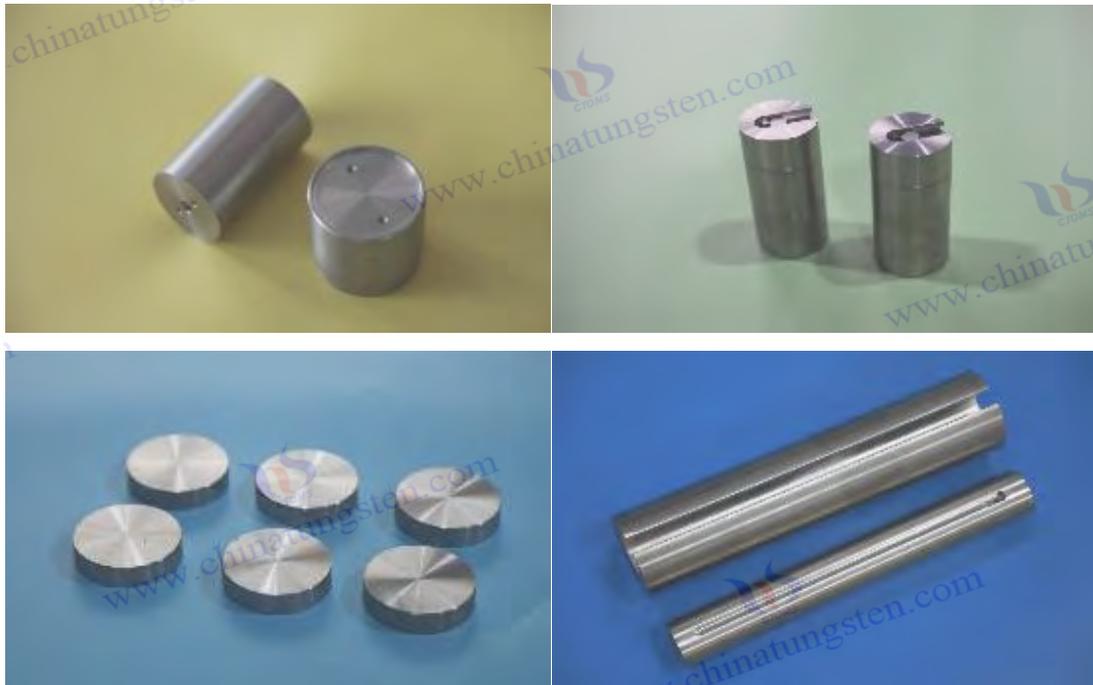
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 tubes en alliage de tungstène

5.1 Application des tubes en alliage de tungstène dans le blindage et le revêtement structural de l'industrie nucléaire

Les tubes en alliage de tungstène, grâce à leur densité extrêmement élevée, leur excellente résistance aux radiations et leur bonne résistance mécanique, jouent un rôle essentiel et irremplaçable dans l'industrie nucléaire, notamment pour le blindage radiologique et le revêtement structural. Les principales applications et avantages techniques des tubes en alliage de tungstène dans l'industrie nucléaire sont détaillés ci-dessous.

1. Avantages des tubes en alliage de tungstène comme matériaux de protection contre les radiations nucléaires

Dans les environnements industriels nucléaires, les rayonnements radioactifs représentent une menace importante pour la sécurité du personnel et le fonctionnement des équipements. La densité élevée (généralement supérieure à $17,0 \text{ g/cm}^3$) et le numéro atomique (74) des tubes en alliage de tungstène leur confèrent une excellente protection contre les rayons gamma et X, réduisant ainsi efficacement la transmittance des rayonnements et protégeant la sécurité des réacteurs nucléaires, des assemblages de combustible nucléaire et des opérateurs.

- **Blindage haute densité** : L'efficacité de blindage du tube en alliage de tungstène est meilleure que celle des matériaux traditionnels en plomb et en acier, et il présente de meilleures propriétés mécaniques et une meilleure adaptabilité environnementale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Haute résistance mécanique** : Maintient une excellente stabilité structurelle même dans des environnements à haute température et haute pression .
- **Bonne résistance à la corrosion** : adapté aux environnements chimiques complexes et aux champs de rayonnement dans l'industrie nucléaire.

2. Application du tube en alliage de tungstène dans les enveloppes structurelles de l'industrie nucléaire

Dans les réacteurs nucléaires et les équipements associés, les tubes en alliage de tungstène sont souvent utilisés comme enveloppes structurelles pour protéger et soutenir les composants clés de l'équipement. Parmi les applications spécifiques, on peut citer :

- **Revêtement des assemblages de combustible nucléaire** : Les tubes en alliage de tungstène peuvent être utilisés comme gaine de crayons de combustible pour empêcher les fuites de matières radioactives et améliorer l'intégrité mécanique des assemblages de combustible.
- **Tube absorbant les neutrons** : en optimisant la composition de l'alliage, le tube en alliage de tungstène peut absorber efficacement les neutrons, réguler la vitesse de réaction nucléaire et améliorer les performances de sécurité du réacteur.
- **Tuyaux du système de refroidissement du réacteur** : Profitant de sa résistance aux températures élevées, de sa haute résistance et de sa résistance à la corrosion, les tubes en alliage de tungstène sont utilisés dans les tuyaux de refroidissement des réacteurs nucléaires pour assurer un fonctionnement stable du système.

3. Exigences techniques des tubes en alliage de tungstène dans l'industrie nucléaire

Pour les applications de l'industrie nucléaire, les tubes en alliage de tungstène doivent répondre aux indicateurs techniques clés suivants :

- **La haute densité et la faible porosité** garantissent des performances de blindage et une résistance mécanique.
- **Une précision dimensionnelle stricte** garantit un assemblage et une étanchéité précis dans les équipements nucléaires.
- **La résistance aux radiations est stable** et les performances du matériau restent inchangées après une exposition prolongée aux radiations.
- **Il présente une forte résistance à la corrosion et à la chaleur** et convient aux températures élevées et aux milieux corrosifs dans les environnements nucléaires.

4. Cas d'application typiques des tubes en alliage de tungstène dans l'industrie nucléaire

- **Tube d'absorption de neutrons de réacteur** : une centrale nucléaire utilise des tubes en alliage de tungstène W-Ni-Fe comme matériaux d'absorption de neutrons, ce qui améliore considérablement la précision du contrôle et le facteur de sécurité du réacteur.
- **Tube de revêtement du conteneur de stockage des déchets nucléaires** : le tube en alliage de tungstène est utilisé comme revêtement du conteneur de déchets nucléaires pour empêcher efficacement les fuites de rayonnement et assurer la sécurité environnementale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Bouclier de protection des équipements radioactifs** : Les boucliers constitués de tubes en alliage de tungstène sont utilisés pour protéger les opérateurs de l'industrie nucléaire contre les dommages causés par les radiations.

V. Orientation future du développement

Avec le développement des technologies de l'industrie nucléaire, les exigences d'application des tubes en alliage de tungstène se diversifient de plus en plus. Les axes de recherche futurs comprennent :

- **Le tube en alliage de tungstène haute performance** réduit la charge structurelle tout en assurant l'effet de blindage.
- **L'optimisation de la nanostructure des tubes en alliage de tungstène** améliore leurs propriétés mécaniques et de résistance aux radiations.
- **La technologie intelligente de surveillance et de contrôle qualité** garantit le fonctionnement stable à long terme des tubes en alliage de tungstène dans les environnements nucléaires.

VI. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène jouent un rôle essentiel dans la sûreté nucléaire et la stabilité des équipements grâce à leurs excellentes propriétés physiques et à leur résistance aux intempéries. À l'avenir, grâce aux progrès constants de la science des matériaux et des technologies de fabrication, les tubes en alliage de tungstène offriront de plus vastes perspectives d'application dans le domaine de l'énergie nucléaire.

5.2 Structure et fonction de protection du tube en alliage de tungstène dans les systèmes d'armes militaires

Les tubes en alliage de tungstène, grâce à leur densité élevée, leur grande résistance et leur excellente résistance à la chaleur et à la corrosion, jouent un rôle structurel et protecteur essentiel dans les systèmes d'armes militaires modernes. Ces atouts clés en font un matériau idéal pour la fabrication de composants essentiels de divers systèmes d'armes, avec des applications dans de nombreux domaines, notamment les enveloppes de projectiles, les enveloppes de missiles, les blindages perforants et les barrières de protection.

1. Avantages structurels des tubes en alliage de tungstène dans les systèmes d'armes militaires

1. élevées

, capables de supporter des chocs et des vibrations extrêmes, garantissant l'intégrité structurelle des systèmes d'armes lors du lancement, du vol et des explosions. Son excellente résistance à la fatigue garantit la fiabilité à long terme des composants des armes.

2. La densité

des tubes en alliage de tungstène (généralement supérieure à $17,0 \text{ g/cm}^3$) en fait un matériau idéal pour les contreponds inertiels. Ils sont largement utilisés dans les systèmes de contrôle

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'attitude et les dispositifs de stabilisation balistique des missiles et des avions, afin d'améliorer la précision et la stabilité des armes.

3. Excellente stabilité thermique

Dans les environnements de vol à haute température, explosifs et à grande vitesse, les tubes en alliage de tungstène peuvent maintenir une bonne stabilité thermique et des propriétés mécaniques, empêchant ainsi les défaillances structurelles dues à la dilatation thermique ou au ramollissement.

2. Application de la fonction protectrice du tube en alliage de tungstène

1. Les tubes en alliage de tungstène sont souvent utilisés comme enveloppes pour projectiles perforants

en raison de leur dureté et de leur densité élevées. Ils permettent de concentrer efficacement l'énergie des balles, d'améliorer leur capacité à pénétrer le blindage et d'accroître la létalité des projectiles perforants.

2. et

des structures de corps de fusée, qui non seulement améliorent la résistance mécanique et la stabilité du corps, mais réduisent également efficacement le volume de la structure pour obtenir une conception légère haute performance.

3. Matériaux de blindage et de barrière de protection

En tant que matériau de protection à haute densité, les tubes en alliage de tungstène peuvent être transformés en raccords de tuyauterie de protection et installés dans des parties clés d'installations et de véhicules militaires importants pour améliorer leur résistance à l'élasticité et à l'impact des explosions.

3. Exigences techniques des tubes en alliage de tungstène dans le domaine militaire

• La densité et l'uniformité

garantissent que le tuyau est exempt de pores et d'inclusions, améliorant ainsi les propriétés mécaniques globales et la résistance aux chocs.

• La précision dimensionnelle et la coaxialité géométrique

répondent aux exigences élevées de l'assemblage de systèmes d'armes complexes et garantissent l'ajustement précis des interfaces mécaniques.

• La résistance à la corrosion et à l'usure

s'adapte à l'évolution de l'environnement militaire et prolonge la durée de vie des composants du système d'armes.

• La résistance aux radiations et la stabilité thermique

répondent aux exigences des environnements de combat à haute température et à rayonnement élevé, tout en maintenant des propriétés matérielles stables.

4. Cas d'application typiques

- Un certain type de projectile perforant avancé avec un noyau et une enveloppe utilise un tube en alliage de tungstène comme enveloppe centrale, pénétrant avec succès un blindage composite multicouche et améliorant considérablement la létalité des munitions.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les tubes en alliage de tungstène de haute précision **pour contreponds inertiels de missiles** sont utilisés comme contreponds inertiels dans les systèmes de contrôle d'attitude des missiles, garantissant la stabilité de la trajectoire de vol du missile et sa précision.
- **La couche protectrice du véhicule blindé**, les tubes en alliage de tungstène pour la protection du véhicule blindé améliorent les capacités anti-explosion et anti-pénétration du véhicule et améliorent la sécurité des occupants.

5. Tendances de développement futures

La conception de

matériaux de tubes en alliage de tungstène hautes performances combine des technologies de nano-renforcement et de micro-alliage pour améliorer les performances globales du matériau et répondre à la demande future de haute résistance et de haute ténacité.

- **La technologie de fabrication intelligente et de traitement de précision** utilise des technologies de fabrication avancées telles que l'impression 3D et le traitement laser pour réaliser la préparation de tubes en alliage de tungstène aux formes complexes et améliorer les performances globales des systèmes d'armes.
- **Tubes composites en alliage de tungstène** Les tubes composites en alliage de tungstène et autres matériaux fonctionnels sont développés pour réaliser une intégration multifonctionnelle et améliorer la protection et la capacité de combat des systèmes d'armes.

VI. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène sont indispensables pour les fonctions structurelles et protectrices des systèmes d'armes militaires. Leur densité élevée, leur grande résistance et leur excellente résistance aux intempéries constituent une base solide pour les systèmes d'armes modernes. Grâce aux progrès de la science des matériaux et des procédés de fabrication, les tubes en alliage de tungstène offriront des perspectives d'application plus larges et des avantages technologiques dans le secteur militaire.

5.3 Protection et positionnement des tubes en alliage de tungstène dans les équipements de radiothérapie médicale

Les tubes en alliage de tungstène, grâce à leur densité exceptionnelle et à leurs propriétés de blindage, jouent un rôle essentiel dans la protection et le positionnement des équipements de radiothérapie médicale. Pendant la radiothérapie, une exposition précise aux rayonnements et une protection sûre du personnel et des équipements sont essentielles à l'efficacité du traitement et à la sécurité opérationnelle. Grâce à leurs propriétés physiques uniques, les tubes en alliage de tungstène sont largement utilisés dans la conception et la fabrication d'équipements connexes.

1. Avantages des tubes en alliage de tungstène en termes de performances de blindage haute densité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **bloquent efficacement les rayonnements à haute énergie**

. La densité des tubes en alliage de tungstène est généralement supérieure à $17,0 \text{ g/cm}^3$. Leur capacité d'atténuation des rayonnements est supérieure à celle des matériaux de blindage traditionnels comme le plomb. Ils bloquent efficacement les rayonnements à haute énergie tels que les rayons X et gamma, réduisent les fuites de rayonnement et garantissent la sécurité des patients et des opérateurs.

2. **Optimiser le volume et le poids des équipements.**

Comparés aux matériaux traditionnels en plomb, les tubes en alliage de tungstène présentent une taille plus petite et une structure plus compacte, tout en offrant le même effet protecteur. Cela permet de concevoir des équipements de radiothérapie légers et flexibles, tout en améliorant leur facilité d'utilisation et leur durabilité.

2. **Applications typiques des tubes en alliage de tungstène dans les équipements de radiothérapie**

1. **Les tubes en alliage de tungstène sont souvent utilisés comme matériaux de gaine pour la sortie du**

faisceau des équipements de radiothérapie afin de contrôler avec précision la direction et l'intensité du rayonnement, d'éviter la diffusion du rayonnement et l'exposition inutile des tissus et d'améliorer la précision du traitement.

2. **Ensemble de protection contre les radiations et de blindage**

Le bouclier de contrôle en alliage de tungstène intégré est utilisé pour protéger les composants électroniques clés et les opérateurs, empêcher les fuites de rayonnement de l'équipement et assurer un fonctionnement stable de l'équipement et un environnement de fonctionnement sûr.

3. **Les structures de support de positionnement des patients**

en font un matériau structurel important pour les dispositifs de positionnement des patients, garantissant un positionnement précis des patients pendant la radiothérapie et améliorant les résultats du traitement.

3. **Exigences de performance physique du tube en alliage de tungstène**

• **La haute densité et l'uniformité**

assurent la continuité et la stabilité de l'effet de protection, évitant ainsi la diminution de l'effet de blindage en raison de défauts de matériaux.

• **La précision dimensionnelle et la qualité de surface**

garantissent l'ajustement précis de la structure interne de l'équipement de radiothérapie, améliorant ainsi la stabilité globale et la durabilité de l'équipement.

• **Une bonne stabilité thermique et une bonne résistance à la corrosion**

peuvent s'adapter à l'environnement à haute température et aux exigences de nettoyage et de désinfection pendant le fonctionnement de l'équipement, prolongeant ainsi la durée de vie des composants.

IV. **Tendances de développement et innovation technologique**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Les tubes en alliage de tungstène à gradient fonctionnel**
atteignent des performances optimales des tubes en alliage de tungstène dans différents endroits grâce à une conception graduée de la composition du matériau et de la structure organisationnelle, en tenant compte à la fois de l'efficacité du blindage et de la résistance mécanique.
- **Les tubes en alliage de tungstène et les systèmes de surveillance intelligents combinés**
à la technologie de détection permettent une surveillance en temps réel de l'état de protection des équipements de radiothérapie, améliorant ainsi la sécurité et la fiabilité des équipements.
- **La technologie de fabrication additive**
utilise la technologie d'impression 3D pour personnaliser les composants de tubes en alliage de tungstène avec des formes complexes afin de répondre aux besoins de conception des équipements médicaux personnalisés.

V. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène, grâce à leur densité et leurs propriétés mécaniques exceptionnelles, jouent un rôle essentiel dans la protection et le positionnement des équipements de radiothérapie médicale. À l'avenir, grâce aux progrès constants des technologies des matériaux et des procédés de fabrication, les tubes en alliage de tungstène offriront un potentiel accru d'amélioration des performances et de la sécurité des équipements médicaux, contribuant ainsi au développement de la médecine de précision.

5.4 Tubes en alliage de tungstène pour pièces inertielles et tubes à flux haute température dans l'aérospatiale

Les tubes en alliage de tungstène, grâce à leur densité élevée, leur résistance élevée et leur excellente tenue à haute température, jouent un rôle essentiel dans les composants inertiels et les conduits d'écoulement haute température de l'industrie aérospatiale. Ces applications imposent des exigences extrêmement élevées en termes de propriétés physiques et mécaniques et d'adaptabilité environnementale du matériau. Les tubes en alliage de tungstène répondent à ces exigences rigoureuses, garantissant ainsi la stabilité et la sécurité des systèmes aéronautiques et moteurs.

1. Avantages des tubes en alliage de tungstène comme pièces inertielles aérospatiales

1. Une densité élevée entraîne une forte inertie.

Les tubes en alliage de tungstène ont généralement une densité comprise entre 17 et 19 g/cm³, ce qui en fait un matériau de contrepoids idéal. Les composants inertiels tels que les contrepoids de gyroscope et les masselottes d'équilibrage des systèmes de navigation inertielle utilisent des tubes en alliage de tungstène pour atteindre une concentration massique élevée, améliorant ainsi la stabilité et la précision du système.

2. Excellente résistance mécanique et ténacité.

Les pièces inertielles aéronautiques doivent résister à des vibrations et des impacts importants. Les tubes en alliage de tungstène présentent une excellente résistance à la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

traction, une limite d'élasticité et une ténacité exceptionnelles, garantissant ainsi leur inviolabilité et leur résistance aux vibrations extrêmes.

3. **Stabilité dimensionnelle et précision de traitement**

Une précision dimensionnelle élevée et une excellente stabilité thermique permettent aux composants inertiels en tube d'alliage de tungstène de maintenir la stabilité structurelle dans des environnements complexes, garantissant le fonctionnement précis du système de navigation inertielle.

2. Valeur d'application du tube en alliage de tungstène dans les tubes de guidage d'écoulement à haute température

1. **Dotés d'une excellente résistance aux températures élevées,**

ils conservent de bonnes propriétés mécaniques et une bonne stabilité chimique dans les environnements à haute température. Ils conviennent comme tubes de guidage dans des domaines clés tels que les chambres de combustion des moteurs d'avion et les systèmes d'échappement haute température, afin de garantir la stabilité et l'efficacité du flux de gaz.

2. **Résistance à la fatigue thermique et adaptation à la dilatation thermique :**

les tubes en alliage de tungstène ont un faible coefficient de dilatation thermique et peuvent bien s'adapter à d'autres matériaux en alliage à haute température, réduisant les fissures et la fatigue causées par les contraintes thermiques et prolongeant la durée de vie du tube de guidage.

3. **Excellente résistance à la corrosion :**

L'environnement des gaz combustibles dans les moteurs d'avion est complexe et contient une variété de gaz corrosifs. Les tubes en alliage de tungstène présentent d'excellentes propriétés antioxydantes et anticorrosion, garantissant un fonctionnement stable à long terme du tube de guidage.

3. Technologie de fabrication de tubes en alliage de tungstène dans les applications aérospatiales

1. **La technologie avancée de formage par métallurgie des poudres produit des tubes en alliage de tungstène haute densité**

grâce au pressage isostatique, au pressage à matrice et à d'autres technologies, combinées à un frittage de précision et à un traitement thermique pour obtenir d'excellentes propriétés mécaniques et une microstructure dense.

2. **L'usinage de haute précision et le traitement de surface**

utilisent des technologies de meulage, de polissage et de revêtement de surface de précision pour garantir que la taille du tube et la qualité de la surface répondent aux exigences strictes des composants aérospatiaux.

3. **L'exploration de la technologie de fabrication additive**

combine la technologie de fabrication additive pour réaliser un prototypage rapide de composants de tubes en alliage de tungstène de forme complexe afin de répondre à des besoins de conception personnalisés et diversifiés.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

IV. Tendances et défis du développement futur

- **L'intégration fonctionnelle et la conception légère**
explorent la combinaison de tubes en alliage de tungstène et de matériaux composites, optimisent la conception structurelle des pièces inertielles et des tubes de guidage et atteignent un équilibre entre hautes performances et légèreté.
- **Performances améliorées dans les environnements à haute température**
Grâce à la conception de microalliages et de nanostructures, la résistance à haute température et la stabilité thermique des tubes en alliage de tungstène sont encore améliorées pour répondre aux besoins des futurs environnements aérospatiaux extrêmes.
- **La surveillance intelligente et la prédiction de la durée de vie**
intègrent la technologie des capteurs pour surveiller l'état des composants des tubes en alliage de tungstène en temps réel, prédire la durée de vie en fatigue et garantir la sécurité et la fiabilité des systèmes aérospatiaux.

V. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène, grâce à leurs propriétés physiques et mécaniques uniques, offrent de vastes perspectives d'application dans les composants inertielles aérospatiaux et les tubes de guidage d'écoulement haute température. Grâce aux progrès constants de la science des matériaux et des technologies de fabrication, les tubes en alliage de tungstène continueront de promouvoir le développement des technologies aérospatiales, offrant ainsi des performances et une sécurité accrues.

5.5 Application des tubes en alliage de tungstène comme tubes de dissipation thermique dans les équipements électroniques et de communication

À mesure que les équipements électroniques et de communication évoluent vers des performances élevées, une intégration poussée et une miniaturisation accrue, la dissipation thermique devient un facteur clé limitant leur stabilité et leur durée de vie. Les tubes en alliage de tungstène, avec leur excellente conductivité thermique, leur densité élevée et leur bonne résistance mécanique, sont devenus un matériau idéal pour la dissipation thermique dans les domaines de l'électronique et des communications.

1. Avantages matériels du tube de dissipation thermique en alliage de tungstène

1. **avec une conductivité thermique élevée**
ont une conductivité thermique élevée et peuvent transférer rapidement la chaleur générée par les composants électroniques vers le dissipateur thermique ou l'environnement externe, évitant ainsi la surchauffe locale et assurant le fonctionnement normal de l'équipement.
2. **Excellente adaptation de la dilatation thermique :**
le coefficient de dilatation thermique de l'alliage de tungstène est proche de celui de nombreux matériaux semi-conducteurs et électroniques, ce qui réduit le mauvais contact et la fatigue du matériau causés par le stress thermique et améliore la stabilité du système de dissipation thermique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. **Stabilité mécanique apportée par la haute densité**

La haute densité des tubes en alliage de tungstène leur confère une bonne résistance mécanique et une bonne résistance aux vibrations, leur permettant de maintenir leur intégrité structurelle dans des environnements de vibrations ou d'impacts d'équipements.

4. **Stabilité chimique et résistance à la corrosion :**

dans un environnement électronique en constante évolution, les tubes en alliage de tungstène ne s'oxydent pas ou ne se corrodent pas facilement, garantissant une utilisation fiable et à long terme des tubes de dissipation thermique.

2. **Applications spécifiques des tubes en alliage de tungstène dans les équipements électroniques et de communication**

1. **Dissipation thermique des semi-conducteurs haute puissance.**

Les amplificateurs de puissance, les modules RF et autres semi-conducteurs haute puissance génèrent beaucoup de chaleur. Des tubes en alliage de tungstène sont utilisés comme voies de conduction thermique pour améliorer l'efficacité de la dissipation thermique et prévenir la dégradation des performances causée par une température excessive.

2. **Dissipation thermique des équipements des stations de base de communication.**

Les amplificateurs, les unités de traitement et autres équipements clés des stations de base de communication nécessitent un système de dissipation thermique stable. Les tubes en alliage de tungstène assurent un transfert thermique efficace et un fonctionnement continu et stable des équipements.

3. Les tubes en alliage de tungstène sont utilisés comme conduits de refroidissement dans les instruments électroniques haut de gamme tels que les lasers et les capteurs pour maintenir la stabilité de la température de l'appareil, améliorer la précision des mesures et la durée de vie de l'instrument .

4. **Intégré à structure de micro-dissipation thermique**

peut être transformé en micro-caloduc grâce à la technologie de micro-usinage, qui est utilisée pour la dissipation thermique locale des circuits intégrés haute densité et répond aux exigences extrêmes des dispositifs microélectroniques en matière de performances de dissipation thermique.

3. **Fabrication et défis techniques des tubes de dissipation thermique en alliage de tungstène**

1. **Contrôle dimensionnel de haute précision.**

Les conduits de dissipation thermique des équipements électroniques doivent être rigoureusement dimensionnés et leur épaisseur doit être contrôlée afin de garantir une compatibilité optimale avec les autres composants de dissipation thermique. Les tubes en alliage de tungstène doivent être soumis à un traitement et à des tests de précision.

2. **La douceur des surfaces intérieures et extérieures nécessite que**

la paroi intérieure soit lisse pour faciliter l'écoulement fluide des fluides (tels que le liquide

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de refroidissement) et réduire la résistance, tandis que la finition de la surface extérieure affecte l'efficacité de la dissipation thermique et les performances de contact.

3. **Matériaux composites et technologie de revêtement**

Pour différents environnements d'application, la surface des tubes en alliage de tungstène peut devoir être revêtue pour améliorer la conductivité thermique, la résistance à la corrosion ou l'isolation électrique afin d'obtenir des composites multifonctionnels.

IV. Tendances futures du développement

- **Le système de refroidissement intelligent**

intègre des capteurs et un contrôle intelligent pour réaliser une surveillance de la température en temps réel et un réglage du conduit de dissipation thermique du tube en alliage de tungstène, améliorant ainsi la vitesse de réponse du système et l'efficacité du refroidissement.

- **L'optimisation de la conception de la microstructure**

utilise une conception de matériaux avancée et une technologie de micro-usinage pour optimiser la structure interne des tubes en alliage de tungstène afin d'obtenir une efficacité de transfert de chaleur et des propriétés mécaniques plus élevées.

- **Le développement de matériaux composites légers et performants améliore les performances globales des**

tubes en alliage de tungstène grâce à des technologies telles que le renforcement des nanoparticules et la conception fonctionnelle à gradient pour répondre aux besoins des équipements électroniques en matière de légèreté et de haute fiabilité.

V. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène, grâce à leur excellente conductivité thermique, leur résistance mécanique et leur adaptabilité environnementale, sont des matériaux idéaux pour les tubes de dissipation thermique des équipements électroniques et de communication. Avec l'amélioration continue des performances des équipements électroniques et les progrès des technologies de dissipation thermique, le champ d'application des tubes en alliage de tungstène va continuer de s'élargir, favorisant ainsi le développement constant de produits électroniques hautes performances.

pour le support structurel des moules industriels et des revêtements résistants à l'usure

Les tubes en alliage de tungstène sont largement utilisés dans les moules industriels et les revêtements résistants à l'usure en raison de leur densité élevée, de leur dureté élevée et de leur excellente résistance à l'usure. Ils jouent un rôle essentiel dans le soutien structurel et la protection contre l'usure, améliorant ainsi efficacement la durée de vie des moules et la stabilité de fonctionnement des équipements.

1. Les avantages matériels des tubes en alliage de tungstène se reflètent dans les moules industriels

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **Dureté et résistance à l'usure élevées.**

Les tubes en alliage de tungstène présentent une dureté et une résistance à l'usure extrêmement élevées. Ils résistent aux fortes pressions et aux frottements importants des matériaux lors du formage du moule, prolongeant ainsi considérablement sa durée de vie et réduisant les coûts de remplacement et d'entretien fréquents.

2. **Haute densité et résistance mécanique**

La haute densité des tubes en alliage de tungstène leur confère une excellente résistance mécanique et une résistance à la déformation, garantissant que le moule maintient la stabilité structurelle et la précision dimensionnelle dans des conditions de charge élevée et d'impact élevé.

3. **Bonne stabilité thermique :**

les moules industriels fonctionnent souvent à des températures élevées. Les tubes en alliage de tungstène offrent une excellente résistance aux hautes températures, résistent efficacement à la fatigue et à la dilatation thermiques, et réduisent l'impact de la déformation thermique sur la qualité du moulage.

2. **Le rôle clé du tube en alliage de tungstène dans la fabrication de revêtements résistants à l'usure**

1. **Support structurel**

du revêtement résistant à l'usure : le tube en alliage de tungstène est le matériau de support central du revêtement résistant à l'usure, offrant un support structurel solide pour assurer la stabilité du revêtement dans un environnement à grande vitesse et à forte usure, et réduire les fuites et les dommages causés par l'usure du pipeline.

2. **Résistance à la corrosion et stabilité chimique**

Dans les environnements difficiles tels que les industries chimiques et minières, les tubes en alliage de tungstène ont une résistance à la corrosion significative et peuvent résister aux milieux corrosifs tels que les acides, les alcalis et les sels, prolongeant ainsi la durée de vie des revêtements résistants à l'usure.

3. **Réduire la fréquence de maintenance et les temps d'arrêt**

Une excellente résistance à l'usure réduit efficacement la fréquence de remplacement de la doublure, réduit les coûts de maintenance de l'équipement et les temps d'arrêt et améliore l'efficacité de la production.

3. **Exigences techniques pour les tubes en alliage de tungstène dans les moules industriels et les revêtements résistants à l'usure : Précision dimensionnelle et uniformité de l'épaisseur de paroi.**

Les tubes en alliage de tungstène doivent faire l'objet d'un contrôle dimensionnel strict et d'une uniformité d'épaisseur de paroi pour garantir la précision de l'assemblage du moule et la résistance uniforme à l'usure de la chemise.

1. **Qualité de surface et contrôle des défauts :**

La surface du tube doit être lisse et exempte de défauts tels que fissures et pores afin d'éviter toute concentration de contraintes pouvant entraîner des dommages prématurés.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parallèlement, la rugosité de surface doit répondre aux exigences d'adhérence de la couche ou du revêtement résistant à l'usure.

2. Les tubes en alliage de tungstène doivent avoir de bonnes propriétés d'usinage et être faciles à transformer en formes complexes de composants de moules et de structures de revêtement.

4. Cas d'application typiques

- **Pour les tiges et bagues de noyau de matrice d'extrusion,** les tiges et bagues de noyau de matrice d'extrusion à haute résistance sont utilisées pour améliorer la résistance à l'usure et la stabilité dimensionnelle, garantissant une production continue de haute qualité de profilés métalliques.
- **Le revêtement résistant à l'usure minière** est utilisé pour le revêtement intérieur des pipelines de transport minier afin de résister à l'érosion à grande vitesse de matériaux tels que le sable et le gravier, de prolonger la durée de vie du pipeline et de réduire la fréquence de maintenance.
- **Les bagues de moulage par injection en plastique** améliorent la résistance à l'usure des composants principaux du moule d'injection, garantissant la précision du moulage et la durée de vie du moule.

V. Tendances futures du développement

- **Les tubes en alliage de tungstène à structure composite** combinent des matériaux à haute ténacité pour développer des tubes composites avec différentes propriétés de couches intérieures et extérieures, en tenant compte à la fois de la résistance à l'usure et de la résistance aux chocs.
- **La technologie de renforcement nanométrique et de revêtement de surface** utilise la nanotechnologie pour renforcer les performances de la matrice du tube en alliage de tungstène et coopère avec un revêtement résistant à l'usure pour améliorer la résistance globale à l'usure.
- **La surveillance intelligente et la prédiction de la durée de vie** intègrent la technologie des capteurs pour réaliser une surveillance en temps réel et une prédiction de la durée de vie de l'état d'utilisation des moules et des chemises de tubes en alliage de tungstène, améliorant ainsi l'efficacité de la maintenance.

VI. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène, grâce à leur résistance exceptionnelle à l'usure, leur grande solidité et leur résistance aux températures élevées, sont devenus un matériau de support structurel indispensable pour les moules industriels et les revêtements résistants à l'usure. Grâce aux progrès constants des technologies de fabrication, les performances et les domaines d'application des tubes en alliage de tungstène continueront de s'élargir, garantissant ainsi un fonctionnement efficace et stable de la production industrielle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 6 Direction de la recherche et du développement et de l'innovation des tubes en alliage de tungstène spécial

Préparation et optimisation des performances des tubes en alliage de tungstène renforcés par des nanoparticules

Les tubes en alliage de tungstène enrichis en nanoparticules, une innovation de pointe dans ce domaine, améliorent considérablement les propriétés des matériaux grâce à l'introduction de nanoparticules dans une matrice traditionnelle en alliage de tungstène. Cette technologie améliore non seulement les propriétés mécaniques des tubes en alliage de tungstène, mais optimise également leur résistance à l'usure, leur stabilité thermique et leur résistance aux radiations, offrant ainsi un support solide pour les applications haut de gamme.

Technologie de préparation d'un tube en alliage de tungstène renforcé par des nanoparticules

1. Sélection et préparation des nanoparticules :

Les nanoparticules couramment utilisées pour le renforcement comprennent les oxydes (par exemple, l'oxyde de zirconium (ZrO_2) et l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3)), les carbures (par exemple, le carbure de titane (TiC) et le carbure de silicium (SiC)) et les nanoparticules métalliques (par exemple, le titane et le vanadium). Ces particules sont préparées par dépôt chimique, alliage mécanique ou méthodes sol-gel. La taille des particules est généralement contrôlée dans la plage de 10 à 100 nm pour assurer une bonne dispersion et un bon renforcement.

2. Mélange de poudre et dispersion uniforme :

Le mélange uniforme de nanoparticules avec de la poudre de tungstène et du liant

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

métallique est essentiel à la préparation de tubes en alliage de tungstène nano-améliorés hautes performances. Des techniques de broyage à billes et de dispersion par ultrasons sont utilisées pour améliorer la répartition uniforme des nanoparticules dans la matrice métallique et éviter l'agglomération des particules et les défauts d'interface.

3. **L'optimisation du procédé de formage par métallurgie des poudres consiste** à compacter la poudre mélangée par des techniques de moulage telles que le pressage à l'emporte-pièce et le pressage isostatique, puis à la réaliser par frittage à haute température. Les paramètres de frittage (température, atmosphère et temps) sont optimisés expérimentalement afin de favoriser une bonne liaison entre les nanoparticules et la matrice, tout en contrôlant le processus de densification et en réduisant la porosité et les fissures.

4. **Le traitement thermique renforce**

le tube en alliage de tungstène nano-amélioré. Il régule la microstructure, favorise l'interaction entre les nanoparticules et la matrice, forme une phase de renforcement et améliore considérablement les performances globales de l'alliage.

2. Avantages en termes de performances du tube en alliage de tungstène renforcé par des nanoparticules

1. **Renforcement des propriétés mécaniques**

Les nanoparticules améliorent considérablement la résistance à la traction, la limite d'élasticité et la ténacité à la rupture des tubes en alliage de tungstène en empêchant le mouvement de dislocation et la migration des joints de grains, améliorant ainsi efficacement le défaut de rupture fragile des tubes en alliage de tungstène traditionnels.

2. **Améliorer la résistance à l'usure et aux chocs**

Les nanoparticules ont une dureté élevée et sont uniformément réparties, ce qui améliore la résistance à l'usure de la matrice, résiste efficacement aux frottements mécaniques et aux charges d'impact et convient aux conditions d'usure élevées.

3. **Améliorer la stabilité thermique et la conductivité thermique**

Les structures nano-améliorées améliorent la stabilité des matériaux dans les environnements à haute température, réduisent la dilatation thermique et les dommages dus à la fatigue thermique, tout en maintenant ou en améliorant une bonne conductivité thermique pour répondre aux exigences de service à haute température.

4. Les nanoparticules **dotées d'une résistance accrue aux radiations peuvent capturer et passiver les défauts causés par les radiations, réduire la dégradation des propriétés des matériaux causée par l'irradiation et conviennent aux occasions de rayonnement élevé telles que l'industrie nucléaire.**

3. Perspectives d'application des tubes en alliage de tungstène renforcés de nanoparticules

1. Les tubes en alliage de tungstène nano-améliorés **pour pièces structurelles aérospatiales à haute température**

peuvent être utilisés comme matériaux pour des composants clés tels que des buses à haute

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

température et des chemises de chambre de combustion, répondant aux exigences de haute température, de haute résistance et de résistance à la corrosion.

2. **Les matériaux de blindage et de structure dans le domaine de l'énergie nucléaire** présentent une excellente résistance aux radiations et des propriétés de résistance élevée, ce qui les rend adaptés aux pièces structurelles internes et au blindage de radioprotection des réacteurs nucléaires.
3. **Les noyaux de projectiles perforants hautes performances et les composants de protection des équipements militaires** améliorent la résistance et la ténacité des projectiles perforants et renforcent la résistance à l'usure et aux chocs des blindages de protection.
4. **Les bagues et supports résistants à l'usure dans les instruments de haute précision** augmentent la durée de vie et la stabilité des performances des composants de l'instrument et réduisent les coûts de maintenance.

4. Défis et orientations futures de la recherche dans la préparation de tubes en alliage de tungstène renforcés par des nanoparticules

1. **Le contrôle uniforme de la dispersion des nanoparticules**
pour éviter l'agglomération des particules reste un défi technique majeur dans le processus de préparation, et des technologies de dispersion et des méthodes composites plus efficaces doivent être développées.
2. **L'étude du mécanisme de liaison des interfaces**
permet de mieux comprendre l'interaction entre les nanoparticules et les interfaces de la matrice de tungstène, ce qui contribuera à concevoir des structures de phase de renforcement plus stables et plus efficaces.
3. **La mise à l'échelle et le contrôle des coûts du processus de préparation**
favorisent l'application industrielle de la technologie de nano-amélioration, qui nécessite de résoudre les problèmes de coût et d'efficacité de la préparation des poudres, du formage et du traitement thermique.
4. **Le développement de nanocomposites multifonctionnels**
combine de multiples fonctions telles que la conductivité et l'antimagnétisme pour répondre aux exigences plus élevées des futurs équipements haut de gamme pour les performances globales des matériaux.

V. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène renforcés par des nanoparticules présentent un potentiel significatif pour améliorer la résistance mécanique, la résistance à l'usure et la stabilité thermique des tubes en alliage de tungstène conventionnels. Grâce aux progrès constants des technologies de préparation et de la recherche théorique, ces matériaux joueront un rôle de plus en plus important dans l'aérospatiale, l'énergie nucléaire, l'armée et la fabrication haut de gamme, stimulant l'innovation technologique et la modernisation industrielle des matériaux pour tubes en alliage de tungstène.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Stratégie de conception et contrôle de la microstructure des tubes en alliage de tungstène microallié

microallié sont une technologie de matériaux avancée qui optimise la microstructure et améliore les performances en ajoutant des traces d'éléments d'alliage à la matrice traditionnelle des tubes en alliage de tungstène. Grâce à une conception et un contrôle précis des éléments, cette technologie améliore efficacement les propriétés mécaniques, la stabilité thermique et la résistance à la corrosion des tubes en alliage de tungstène, offrant ainsi une base solide pour les applications haut de gamme.

Stratégie de conception d' un tube en alliage de tungstène microallié

1. Les éléments couramment utilisés en microalliage comprennent le titane (Ti), le niobium (Nb), le vanadium (V), l'aluminium (Al), le zirconium (Zr) et de faibles quantités de terres rares (comme le lanthane La et le cérium Ce). Ces **éléments** présentent généralement des effets importants de renforcement en solution solide et de renforcement par précipitation, ce qui peut affecter significativement l'évolution de la microstructure et les performances de l'alliage.
2. **Optimisation de la teneur et des proportions des éléments :**
L'ajout d'éléments de microalliage est généralement contrôlé entre 0,1 % et 1,0 %, ce qui maximise l'effet de renforcement tout en évitant la fragilisation ou la complexité de fabrication due à des quantités excessives. Le calcul de l'équilibre thermodynamique et les retours expérimentaux permettent d'ajuster la proportion de chaque élément afin d'obtenir l'équilibre optimal entre renforcement et ténacité.
3. **La conception du mécanisme de renforcement synergique**
utilise pleinement les multiples mécanismes de renforcement des éléments de microalliage, tels que le renforcement de la solution solide, le raffinement des grains et la précipitation de la deuxième phase, pour former des précipités fins et uniformes et améliorer les performances globales de l'alliage.
4. **Considérations relatives à l'adaptabilité des processus La conception**
des microalliages doit prendre en compte l'adaptabilité des processus de formage, de frittage et de traitement thermique pour garantir que les éléments d'alliage ne subissent pas de changements de phase défavorables ou d'agglomération pendant le processus de préparation et maintiennent une structure uniforme et stable.

2. Méthode de contrôle de la microstructure du tube en alliage de tungstène microallié

1. **de microalliage**
forment de fins précipités qui entravent la migration des joints de grains, favorisent l'affinement du grain et améliorent la résistance et la ténacité du matériau. De plus, une répartition uniforme de la microstructure est obtenue grâce au contrôle de la température et de la durée du frittage et du traitement thermique.
2. **Le contrôle de la morphologie et de la distribution de la phase précipitée**
régule la morphologie (comme les carbures, les nitrures ou les oxydes) et l'uniformité de la distribution de la phase précipitée, empêche l'agrégation de précipités grossiers et réduit l'interface faible et les sources de défauts du matériau.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. **Mécanisme de renforcement de l'interface :**

les éléments de microalliage peuvent former une liaison solide à l'interface entre la matrice et la phase précipitée, améliorant ainsi la force de liaison interfaciale et améliorant la résistance à la fracture du matériau.

4. **Ajustement du processus de traitement thermique**

: Concevoir rationnellement les processus de recuit, de mise en solution et de vieillissement pour favoriser la solution et la précipitation efficaces des éléments de micro-alliage et ajuster la dureté et la plasticité du matériau.

Amélioration des performances des tubes en alliage de tungstène microallié

1. **Propriétés mécaniques améliorées**

Le microalliage améliore considérablement la résistance à la traction et la limite d'élasticité tout en maintenant une bonne ductilité et une bonne ténacité à la rupture, résolvant ainsi le défaut de fragilité des alliages de tungstène traditionnels.

2. **La stabilité thermique améliorée,**

les grains raffinés et la structure uniforme de la phase précipitée améliorent la stabilité organisationnelle des tubes en alliage de tungstène dans les environnements à haute température, réduisent le coefficient de dilatation thermique et réduisent les dommages dus à la fatigue thermique.

3. **Résistance à l'usure et à la corrosion améliorée :**

la deuxième phase dure et le film d'oxyde protecteur stable formés par des éléments de micro-alliage améliorent la résistance à l'usure et à la corrosion de la surface du matériau et prolongent sa durée de vie.

4. **Optimisation des performances du processus**

Après le microalliage, l'effet de densification des tubes en alliage de tungstène est amélioré, les performances de traitement sont améliorées, le taux de génération de fissures et de défauts est réduit et il peut s'adapter à des exigences de formage et de traitement plus complexes.

Perspectives d'application des tubes en alliage de tungstène microallié

1. Les tubes en alliage de tungstène **dans la fabrication d'équipements haut de gamme**, l'aérospatiale, l'industrie nucléaire et les domaines militaires sont en pleine croissance, et la technologie de microalliage peut répondre aux exigences des environnements de service difficiles.

2. Les composants de réacteurs haute température et les revêtements d'échangeurs de chaleur soumis à **des conditions extrêmes de températures nécessitent** des tubes en alliage de tungstène offrant une excellente stabilité thermique et une excellente résistance à la corrosion. Le microalliage offre une solution matérielle efficace.

3. **Machines et moules de précision**

Les tubes en alliage de tungstène micro-allié sont largement utilisés dans la fabrication de machines de précision, en particulier dans les pièces structurelles résistantes à l'usure et aux chocs.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

V. Orientations et défis du développement futur

1. La conception collaborative de microalliages multi-éléments

développe davantage la conception de microalliages composites multi-éléments, explore l'effet de renforcement synergique de différents éléments et favorise les percées dans les performances des matériaux.

2. La technologie de surveillance de la microstructure en temps réel

est combinée à des méthodes de caractérisation avancées, telles que la microscopie électronique à transmission (MET) et les rayons X à rayonnement synchrotron, pour réaliser une surveillance dynamique de l'évolution des éléments de microalliage et des phases précipitées, et guider l'optimisation du processus.

3. L'optimisation de l'intégration du processus

intègre l'ensemble du processus de préparation de la poudre, de formage, de frittage et de traitement thermique pour améliorer l'efficacité de la préparation et la cohérence des tubes en alliage de tungstène micro-allié.

4. Considérant

la protection de l'environnement et l'économie, nous développons des procédés de microalliage verts et économes en énergie, réduisons les coûts de production et favorisons la transformation de la technologie vers des applications industrielles à grande échelle.

Résumé :

La technologie des microalliages améliore considérablement les performances globales des tubes en alliage de tungstène grâce à une conception précise et à un contrôle efficace des oligo-éléments qu'ils contiennent. En tant qu'approche importante pour améliorer les performances des tubes en alliage de tungstène et élargir leurs domaines d'application, la recherche et le développement de tubes en alliage de tungstène microalliés constitueront une orientation clé pour le développement futur de matériaux à base de tungstène hautes performances .

Propriétés électriques, thermiques et antimagnétiques des tubes multifonctionnels en alliage de tungstène

Les tubes multifonctionnels en alliage de tungstène sont des matériaux avancés alliant haute résistance, haute densité et fonctions spécialisées, particulièrement remarquables en termes de conductivité électrique et thermique, ainsi que de propriétés amagnétiques. Face à la demande croissante d'équipements haut de gamme et aux conditions d'utilisation extrêmes, le développement de tubes en alliage de tungstène à fonctions composites est devenu une avancée majeure en science des matériaux. Les sections suivantes détaillent les propriétés électriques, thermiques et amagnétiques combinées des tubes multifonctionnels en alliage de tungstène, leurs facteurs d'influence, leurs techniques de préparation et leurs avantages applicatifs.

1. Propriétés conductrices du tube multifonctionnel en alliage de tungstène

1. Mécanisme de conductivité et facteurs d'influence :

La conductivité des tubes en alliage de tungstène dépend principalement de la composition,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la microstructure et de la teneur en impuretés de l'alliage. Le tungstène possède intrinsèquement une conductivité électrique élevée. Si l'ajout de liants métalliques tels que le nickel et le fer peut améliorer les propriétés mécaniques, il réduit également la conductivité globale. En modifiant le ratio des éléments d'alliage et en optimisant la microstructure, il est possible d'améliorer la conductivité électrique tout en préservant la résistance mécanique.

2. **Les tubes en alliage de tungstène hautement conducteur sont conçus**

à partir de poudre de tungstène de haute pureté et à faible teneur en impuretés. La teneur en nickel-fer est contrôlée de manière rationnelle pour favoriser l'affinement du grain et une distribution uniforme, ce qui contribue à réduire la diffusion des électrons et à améliorer la conductivité. De plus, l'introduction d'éléments de microalliage et de nanoparticules de renforcement optimise le trajet de transmission des électrons et permet d'obtenir une conductivité élevée.

3. **L'influence du processus de préparation sur la conductivité**

Le contrôle de la température et de l'atmosphère de frittage et l'optimisation du processus de traitement thermique peuvent aider à réduire les défauts d'interface et les pores, à améliorer le canal de flux d'électrons et ainsi à améliorer la conductivité.

2. **Conductivité thermique du tube multifonctionnel en alliage de tungstène**

1. **Conductivité thermique :**

Les tubes en alliage de tungstène utilisent principalement les électrons libres et les vibrations du réseau pour transférer l'énergie. Le tungstène de haute pureté et la conception optimisée de l'alliage contribuent à réduire la diffusion des joints de grains et des défauts, améliorant ainsi la conductivité thermique.

2. **Les principaux facteurs influençant la conductivité thermique**

comprennent la teneur en liant métallique de l'alliage, la densité microstructurale, la granulométrie et la qualité de la liaison interfaciale. Les techniques de nanorenforcement et de microalliage peuvent améliorer efficacement la conductivité thermique.

3. **Optimisation du procédé pour la conductivité thermique :**

Le frittage et le traitement thermique à haute température peuvent améliorer la densité du matériau et la connectivité des grains, réduisant ainsi la résistance thermique. Les traitements de surface (tels que les revêtements PVD) peuvent également contribuer à améliorer l'efficacité de la conduction thermique de surface.

3. **Propriétés antimagnétiques du tube multifonctionnel en alliage de tungstène**

1. Le tungstène et ses alliages présentent généralement de bonnes **propriétés diamagnétiques**

, ce qui les rend adaptés aux applications nécessitant une faible interférence magnétique. La conception de l'alliage module la réponse magnétique du matériau en contrôlant la teneur et la répartition des éléments magnétiques tels que le fer et le nickel.

2. **La stratégie d'amélioration antimagnétique**

optimise le ratio d'éléments d'alliage, réduit la teneur en phases magnétiques douces et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

utilise le microalliage pour former des phases amagnétiques et des structures d'interface afin de supprimer la magnétisation. De plus, les procédés de traitement thermique permettent d'ajuster la structure du domaine magnétique et d'améliorer les propriétés antimagnétiques.

3. Importance de l'application des propriétés antimagnétiques

Les tubes en alliage de tungstène hautement antimagnétiques sont largement utilisés dans les équipements d'énergie nucléaire, le blindage électronique aérospatial, les composants antimagnétiques d'instruments de haute précision et d'autres domaines pour assurer un fonctionnement stable de l'équipement et l'intégrité du signal.

4. Contrôle des performances composites et technologie de préparation du tube multifonctionnel en alliage de tungstène

1. La conception collaborative des composites performants

permet d'obtenir un équilibre optimal entre conductivité électrique, conductivité thermique et propriétés antimagnétiques grâce à une conception précise des composants, évitant ainsi l'impact négatif de l'optimisation d'une propriété sur les autres. La conception structurelle multi-échelle et la technologie du gradient fonctionnel sont des outils clés.

2. La technologie de préparation avancée

utilise des processus avancés tels que la métallurgie des poudres, le pressage isostatique à chaud, la fabrication additive, etc., combinés au traitement thermique et à la modification de surface pour réaliser la préparation de tubes en alliage de tungstène composites multifonctionnels à haute densité.

3. Ingénierie du renforcement nanométrique et des interfaces

Les technologies de renforcement des nanoparticules et de contrôle des interfaces améliorent efficacement les performances synergétiques des propriétés thermiques, électriques et magnétiques, et améliorent les performances globales et l'adaptabilité des applications des matériaux.

5. Perspectives d'application des tubes multifonctionnels en alliage de tungstène

1. Équipements électroniques et de communication haut de gamme

pour le packaging électronique, les dissipateurs thermiques et le blindage anti-interférences pour améliorer les performances et la fiabilité des équipements.

2. Industrie nucléaire et équipements médicaux

Dans les réacteurs nucléaires et les appareils de radiothérapie, les propriétés composites des tubes en alliage de tungstène garantissent l'efficacité du blindage et la stabilité de l'équipement.

3. Les tubes en alliage de tungstène hautes performances dans les domaines de l'aérospatiale et de la défense

répondent aux exigences structurelles et fonctionnelles des environnements extrêmes, tels que les composants de navigation inertielle, les tubes d'écoulement et les manchons de protection haute température.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

VI. Résumé

Les tubes multifonctionnels en alliage de tungstène allient une excellente conductivité électrique et thermique à des propriétés amagnétiques, ce qui en fait un matériau essentiel pour les conditions de travail complexes et les applications haut de gamme. Grâce à l'intégration de la conception des alliages, du contrôle de la microstructure et de techniques de fabrication avancées, les tubes en alliage de tungstène réalisent continuellement des avancées en matière de performances composites, offrant ainsi une base solide pour le développement futur de la fabrication intelligente et des équipements haute performance.

6.4 Stabilité thermique des tubes en alliage à haute teneur en tungstène et voies de traitement thermique

Les tubes en alliage de tungstène haute température sont largement utilisés dans l'aérospatiale, le nucléaire et d'autres industries à haute température en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et de la stabilité de leurs caractéristiques physiques et chimiques. La clé de l'excellence des performances des tubes en alliage de tungstène dans les environnements à haute température réside dans la stabilité thermique de leur microstructure et la conception de procédés de traitement thermique appropriés. Cette section explore le mécanisme de stabilité thermique microstructurale des tubes en alliage de tungstène haute température, les facteurs qui l'influencent et les procédés de traitement thermique courants, fournissant des orientations scientifiques pour améliorer les performances globales du matériau dans des conditions de haute température.

1. La connotation et l'importance de la stabilité thermique des tubes en alliage de tungstène à haute température

1. Définition de la stabilité thermique des tissus

La stabilité thermique des tissus fait référence à la capacité d'un matériau à maintenir sa microstructure (taille des grains, structure de phase, distribution des précipités, etc.) stable et à ne pas subir de changements défavorables (tels que le grossissement des grains, la transformation de phase, la dissolution des précipités, etc.) dans un environnement à haute température.

2. Influence de la stabilité thermique sur les performances

Une bonne stabilité thermique garantit que le tube en alliage de tungstène conserve une résistance, une dureté et une résistance au fluage élevées lorsqu'il fonctionne à des températures élevées, évitant ainsi une baisse significative des propriétés du matériau due à une dégradation structurelle.

3. Les applications à haute température telles que

les carters d'aubes de turbines de moteurs d'aviation, les revêtements de fours à haute température et les composants de réacteurs nucléaires nécessitent tous des tubes en alliage de tungstène pour résister à des températures élevées pendant une longue période.

2. Facteurs affectant la stabilité thermique des tubes en alliage de tungstène à haute température

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **dans**

les alliages de tungstène, ils forment des particules de seconde phase stables, inhibant la croissance des grains et le mouvement des dislocations, améliorant ainsi la stabilité thermique.

2. Les grains fins et uniformes et les particules de seconde phase uniformément réparties **dans l'état microstructural initial sont la base de l'amélioration de la stabilité à haute température.**

3. **Éléments d'impuretés et inclusions**

Les impuretés et les inclusions deviendront les premiers sites de grossissement des grains et réduiront la stabilité thermique.

4. **Historique du traitement thermique**

Le processus de traitement thermique affecte directement la formation et la distribution des phases précipitées et régule la stabilité structurelle de l'alliage.

3. Évolution organisationnelle typique des tubes en alliage de tungstène à haute température

1. **Les grains**

ont tendance à grossir, ce qui entraîne une réduction de la plasticité et de la résistance. L'effet de fixation des particules de seconde phase peut efficacement inhiber le grossissement des grains.

2. **Précipitation et dissolution des phases précipitées**

Les températures élevées peuvent provoquer la dissolution ou la reprécipitation des phases de renforcement, affectant les propriétés mécaniques.

3. **Comportement de transformation de phase**

Certains alliages peuvent subir une transformation de phase à haute température et un traitement thermique est nécessaire pour contrôler la stabilité de phase.

4. Conception du chemin de traitement thermique des tubes en alliage de tungstène haute température

1. **Le traitement en solution**

favorise une dissolution uniforme des éléments d'alliage, élimine les contraintes internes et améliore la plasticité et l'uniformité grâce au traitement en solution à haute température.

2. **Le traitement de vieillissement**

est effectué à une température appropriée pour favoriser la précipitation uniforme des phases de renforcement et améliorer la résistance à haute température et la stabilité thermique.

3. **Le processus de traitement thermique en plusieurs étapes**

combine une solution solide et un vieillissement en plusieurs étapes pour optimiser la taille et la distribution de la phase de renforcement et maximiser les performances globales.

4. **Le traitement de recuit**

est effectué dans des conditions de température et de temps contrôlées pour améliorer la ténacité, restaurer la structure et s'adapter aux différentes exigences d'application.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Optimisation des paramètres du processus de traitement thermique à haute température

1. La température de la solution à température contrôlée

est généralement sélectionnée au-dessus de la température de dissolution de la phase de renforcement, et la température de vieillissement doit être déterminée en combinaison avec la température de précipitation de la phase de renforcement.

2. Le temps de maintien

assure une solution solide suffisante et uniforme et une réaction de vieillissement pour éviter un grossissement excessif.

3. le refroidissement

ou le refroidissement contrôlé affecte la morphologie et la distribution de la phase précipitée et doit être optimisé en fonction des exigences de performance.

6. Maintien de la stabilité des tissus dans un environnement de service à haute température

1. Stabilité du cycle thermique

Les tubes en alliage de tungstène à haute température sont sujets à une dégradation structurelle lors de cycles thermiques répétés et nécessitent une combinaison de traitement thermique et de conception d'alliage pour améliorer la durée de vie du cycle.

2. Oxydation et corrosion à haute température

La formation d'un film d'oxyde de surface et l'application de revêtements résistants à la corrosion sont des mesures clés pour garantir la stabilité à haute température.

3. La relaxation des contraintes et le fluage

peuvent améliorer la résistance au fluage et prolonger la durée de vie grâce à une réglementation organisationnelle raisonnable et à un traitement thermique.

VII. Exemples et progrès de la recherche

1. Le cas de traitement thermique avancé des tubes en alliage de tungstène présente la

solution typique + le processus de traitement thermique de vieillissement des tubes en alliage de tungstène à haute température et son influence sur la microstructure et les performances.

2. Amélioration des nanoparticules et stabilité à haute température

Les derniers résultats de recherche sur la technologie d'amélioration des nanoparticules pour améliorer la stabilité thermique.

3. Simulation et optimisation du processus de traitement thermique

Basée sur la science des matériaux informatiques, la simulation des paramètres de traitement thermique est utilisée pour obtenir une optimisation du processus.

8. Résumé et perspectives

Les tubes en alliage de tungstène haute température sont la principale garantie de leur performance à haute température. Grâce à une conception scientifique de la composition de l'alliage, à l'optimisation des procédés de traitement thermique et à l'association d'une technologie avancée de nano-renforcement et de mesures de protection de surface, les performances des tubes en alliage de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungstène dans des conditions de températures extrêmement élevées peuvent être considérablement améliorées. À l'avenir, grâce aux technologies de fabrication intelligente et de simulation des matériaux, le traitement thermique des tubes en alliage de tungstène gagnera en précision et en efficacité, offrant des solutions de matériaux clés plus fiables pour les industries de l'aérospatiale, de l'énergie nucléaire et des hautes températures.

6.5 Étude du mécanisme de liaison de l'interface du tube en alliage de tungstène composite tungstène-cuivre/tungstène-nickel

Alors que les équipements de pointe imposent des exigences croissantes en matière de propriétés multifonctionnelles des matériaux, les tubes en alliage de tungstène monocomposant sont de moins en moins en mesure de répondre aux exigences de performance globales de haute densité, de conductivité thermique élevée, de résistance élevée et d'usinabilité. Les tubes composites en alliage de tungstène, notamment ceux composés de structures composites tungstène-cuivre (W-Cu) et tungstène-nickel (W-Ni), deviennent un matériau de choix pour les applications haut de gamme (telles que les centrales nucléaires, les composants d'accélérateurs de particules et les systèmes de contrôle thermique) grâce aux avantages synergétiques de l'intégration multiphasée. Cette section explore de manière systématique les mécanismes de liaison interfaciale des tubes en alliage de tungstène composite tungstène-cuivre/tungstène-nickel, notamment les processus de liaison physique, chimique et métallurgique, et leur impact sur les performances finales. Cela fournit une base théorique et un support technique pour optimiser la préparation des matériaux composites.

1. Caractéristiques structurelles et contexte d'application du tube en alliage de tungstène composite tungstène-cuivre/tungstène-nickel

1. Les tubes en alliage composite tungstène-cuivre

allient le point de fusion élevé et la résistance élevée du tungstène à l'excellente conductivité électrique et thermique du cuivre. Ils sont largement utilisés dans les composants à haute densité de flux thermique (tels que les électrodes, les dissipateurs thermiques et les manchons de dispositifs de collision plasma).

2. Caractéristiques du tube en alliage composite tungstène-nickel : Les alliages tungstène-nickel sont couramment utilisés dans les composants inertiels, les composants de protection et

les zones à fort impact en raison de leur excellente maniabilité et de leur robustesse. Leur conception composite améliore la fiabilité de service.

3. La tendance de la structure composite multifonctionnelle

Les tuyaux composites adoptent une conception multicouche (comme une couche intérieure en cuivre tungstène et une couche extérieure en nickel tungstène), qui prend en compte la résistance, la conductivité thermique et la résistance à la corrosion, et est devenue l'avant-garde de l'aviation, de l'énergie nucléaire et de la recherche sur les matériaux militaires.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Types de connexion d'interface des tubes en alliage de tungstène composite tungstène-cuivre/tungstène-nickel

1. La liaison physico-mécanique

repose principalement sur la rugosité de surface, la force de compression et la surface de contact de l'interface. Il s'agit d'une liaison non métallurgique dont la force de liaison est limitée.

2. La liaison par diffusion (liaison métallurgique)

favorise la diffusion des atomes de tungstène et de Cu/Ni à l'interface grâce à un traitement thermique à haute température, formant une couche de diffusion ou une phase intermédiaire, qui est une forme de liaison plus idéale.

3. Le système de formation de phase intermédiaire/liaison de réaction

peut former des composés intermédiaires caractéristiques à l'interface, tels qu'une zone d'alliage W-Ni et une couche de transition W-Cu, qui améliorent la résistance de l'interface.

4. L'infiltration en phase liquide/le frittage de revêtement

utilise du cuivre ou du nickel liquide pour s'infiltrer dans le squelette poreux du tungstène à haute température afin de former une liaison métallurgique d'interface, qui est couramment utilisée dans la fabrication de tubes en alliage de tungstène formés de composites.

3. Analyse du mécanisme de liaison de l'interface tungstène-cuivre

1. **La combinaison d'infiltration solide-liquide utilise le bas point de fusion du cuivre et réalise la liaison tungstène-cuivre grâce à la pénétration capillaire du cuivre liquide dans l'ébauche de tube de tungstène pré-frittée.**

2. Couche de diffusion d'interface

Bien que le tungstène et le cuivre soient immiscibles, une couche de transition d'interface de plusieurs dizaines de nanomètres se formera toujours à des températures élevées pour améliorer la force de liaison.

3. Contrôle des fissures d'interface

En raison de la grande différence entre les coefficients de dilatation thermique des deux, le contrôle de la vitesse de refroidissement et l'introduction d'une structure de couche à gradient sont les clés pour prévenir les fissures thermiques.

4. Analyse du mécanisme de liaison de l'interface tungstène-nickel

1. **Diffusion à l'état solide et réaction eutectique Il existe une certaine solubilité solide** entre le tungstène et le nickel, qui peut diffuser et se lier lors du frittage à haute température pour former une solution solide W-Ni.

2. Les phases intermétalliques

telles que Ni_4W et NiW formées à des températures élevées améliorent la force de liaison interfaciale, mais une formation excessive entraînera une fragilité accrue.

3. Mécanisme de renforcement :

les particules W sont dispersées dans la matrice Ni pour former une structure biphasée typique, qui peut empêcher la propagation des fissures et améliorer la résistance aux chocs.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Caractérisation de la microstructure de l'interface d'un tube composite en alliage de tungstène

- L'observation par microscopie électronique à balayage (MEB)**
a été utilisée pour observer la micromorphologie de l'interface, la source des fissures, la distribution des pores et la largeur de la zone de diffusion des éléments.
- La spectroscopie dispersive en énergie (EDS)**
analyse le gradient de concentration des éléments à l'interface W-Cu ou W-Ni pour évaluer l'épaisseur de la couche de diffusion et l'uniformité de la composition.
- La microscopie électronique à transmission (MET) et la DRX**
peuvent révéler la formation de nouvelles phases, la structure des dislocations et l'existence possible de nano-précipités à l'interface.

6. Technologie d'évaluation et d'optimisation des performances de liaison d'interface

- Les tests de résistance au cisaillement et au pelage**
sont utilisés pour évaluer quantitativement la résistance de liaison de l'interface des tuyaux composites et constituent des méthodes de test clés avant l'application industrielle.
- Les essais de fatigue thermique**
simulent la stabilité de l'interface des tuyaux composites pendant les cycles thermiques et reflètent leur adaptabilité à l'environnement de service.
- La conception du contrôle des contraintes d'interface**
ajuste le décalage de dilatation thermique via une couche tampon intermédiaire (telle que la structure à gradient W-Ni-Cu) pour améliorer la fiabilité.
- Les nouvelles technologies d'assemblage**
telles que le soudage laser, le pressage isostatique à chaud et l'assemblage par réaction-diffusion ont montré un grand potentiel en termes de résistance et d'intégrité de l'interface.

7. Analyse typique d'un tube en alliage composite de tungstène

taper	Matériau intérieur	Matériau extérieur	Méthode de connexion	Scénario d'application
Tube W-Cu-W	cuivre	Tungstène	Infiltration en phase liquide	Tube de chauffage par induction haute fréquence
Tube W-Ni-W	nickel	Tungstène	Collage par diffusion par pressage à chaud	Kit de vol inertiel tactique
Tube W-Ni-Cu	alliage Ni-Cu	Tungstène	Co-frittage de poudre	Paroi de tuyau du système d'injection de faisceau de particules

8. Orientations et défis du développement futur

- La conception composite à structure à gradient multicouche**
adopte un concept de conception de couche de transition ou de matériau à gradient

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fonctionnel (FGM) pour atténuer les problèmes de contrainte thermique et d'inadéquation des interfaces.

2. **Les recherches sur les revêtements de renforcement d'interface**

explorent les méthodes de modification d'interface telles que les revêtements nanocouches et les couches d'alliage électrolytiques pour améliorer les performances de liaison et la résistance à la corrosion.

3. **La surveillance intelligente des interfaces et la prédiction de la durée de vie**

combinent l'émission acoustique, les ultrasons, le XCT et d'autres technologies pour réaliser la détection en ligne des dommages de l'interface et l'évaluation de la durée de vie pendant le service.

4. **Le développement de procédés écologiques**

favorise l'application de nouvelles technologies de connexion à faible consommation d'énergie et à haute efficacité de liaison dans la fabrication de tubes composites en alliage de tungstène.

La compréhension du mécanisme de liaison interfaciale des

tubes composites en alliage de tungstène tungstène-cuivre/tungstène-nickel est essentielle pour obtenir des performances structurelles composites synergétiques. Grâce à une compréhension approfondie des processus de liaison physique et chimique, à l'optimisation des traitements thermiques et au contrôle des microstructures interfaciales, les tubes composites en alliage de tungstène hautes performances joueront un rôle encore plus important dans des conditions d'exploitation extrêmes et des scénarios intégrés multifonctionnels.

Technologie de revêtement de surface et d'amélioration de la résistance à la corrosion des tubes en alliage de tungstène fonctionnalisés

Avec l'utilisation généralisée des tubes en alliage de tungstène dans des secteurs haut de gamme tels que l'énergie nucléaire, l'aérospatiale, les soins médicaux et l'électronique, leurs environnements de service deviennent de plus en plus complexes, souvent confrontés à des défis extrêmes tels que des températures élevées, une corrosion sévère, un rayonnement élevé et une forte oxydation. Pour améliorer la résistance à la corrosion de surface, la résistance à l'usure, la stabilité thermique et le niveau de fonctionnalisation des tubes en alliage de tungstène, la technologie de revêtement de surface est devenue un moyen essentiel d'optimiser leurs performances de service. Cette section explique de manière systématique les types de revêtement, les procédés de préparation, les mécanismes d'optimisation des performances et les approches techniques permettant d'améliorer la résistance à la corrosion des surfaces des tubes en alliage de tungstène.

1. Aperçu des problèmes de corrosion de surface des tubes en alliage de tungstène

Bien que l'alliage de tungstène lui-même présente une certaine stabilité chimique et une résistance à l'oxydation à haute température, il existe toujours un risque de défaillance de surface dans les environnements suivants :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Environnement oxydant à haute température** : à 600–1000 °C, le tungstène forme facilement de l'oxyde WO_3 cassant, qui se décolle ensuite ;
- **Milieus corrosifs acides/alcalins** : présente une réaction corrosive évidente dans un acide fort, un alcali fort ou une solution de fluorure ;
- **Électrolyte ou environnement physiologique** : Les équipements médicaux ou l'environnement marin peuvent être confrontés à une corrosion électrochimique et à une corrosion par piqûres localisées ;
- **Corrosion par frottement et corrosion abrasive** : Sous l'effet de vibrations à haute fréquence et du contact des particules, une couche de pelage par fatigue se forme facilement sur la surface.

2. La fonction principale du revêtement de surface fonctionnel

1. **Améliorer la résistance à la corrosion** : éviter le contact direct entre les milieux corrosifs et le métal de base ;
2. **la résistance à l'usure et aux chocs** : le revêtement dur peut réduire considérablement l'usure de la surface ;
3. **Stabilité thermique et capacité antioxydante améliorées** : le revêtement d'oxyde peut former un film protecteur dense ;
4. **Réaliser une fonctionnalisation de surface** : telle que la conductivité électrique, la conductivité thermique, l'antireflet, le blindage électromagnétique et d'autres propriétés ;
5. **Améliorer la finition de surface et le collage de l'interface** : faciliter l'emballage, le soudage, la connexion et d'autres traitements ultérieurs.

3. Types et technologies de revêtement de surface courants pour les tubes en alliage de tungstène

1. Placage autocatalytique

- Revêtements courants : Ni-P, Ni-B, Ni-Cr, etc.
- Avantages : Le revêtement a une bonne uniformité, peut recouvrir la paroi intérieure et convient aux canalisations complexes.
- Application : Améliorer la résistance à la corrosion et la compatibilité électromagnétique.

2. Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

- Types de revêtement : TiN , CrN , ZrN , AlTiN , MoS_2 , etc.
- Caractéristiques : revêtement dense, forte adhérence et épaisseur contrôlable au niveau nano.
- Applications : structures à haute température, composants résistants à l'usure, revêtements de radioprotection, etc.

3. Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

- Type de revêtement : SiC , TiC , Cr_3C_2 , WC et autres revêtements céramiques.
- Avantages : Le revêtement présente une dureté extrêmement élevée et convient aux environnements extrêmement corrosifs.
- Inconvénients : La température de dépôt est élevée et la stabilité thermique du substrat doit être élevée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Technologie de projection thermique (projection plasma/flamme)

- Matériaux couramment utilisés : Al_2O_3 , Cr_2O_3 , NiCr , WC- Co, etc.
- Avantages : Convient au traitement des murs extérieurs de grande surface et peut former des revêtements composites épais.
- Scénarios applicables : composants de contrôle thermique de l'aviation, gaines de zone de rayonnement élevé, etc.

5. Revêtement sol-gel

- Caractéristiques : faible coût, adapté aux structures de formes complexes.
- Application : Les revêtements à couches minces multifonctionnels (conducteurs/antibactériens/hydrophobes) ont un grand potentiel de développement.

6. Revêtement électrochimique (anodisation, galvanoplastie)

- Peut réaliser une couverture en nickel, cuivre, oxyde métallique, etc.
- domaines conducteurs ou médicaux .

4. Technologie d'adhérence du revêtement et d'optimisation de l'interface

1. **Nettoyage et prétraitement des interfaces** : tels que le sablage, le décapage et le nettoyage au plasma pour améliorer l'activité de liaison ;
2. **Introduction de la couche de transition** : la couche intermédiaire Ni et la couche de liaison Cr sont définies pour atténuer les différences de dilatation thermique ;
3. **Conception de structure composite multicouche** : telle que combinaison couche dure + couche résistante, structure de couche à gradient, etc.
4. **Frittage/densification après traitement thermique** : améliore la liaison métallurgique du revêtement et réduit la porosité ;
5. **Traitement de rugosité de surface** : améliore l'adhérence du revêtement par gravure, perçage au laser et autres méthodes.

5. Méthode d'essai des performances du revêtement des tubes en alliage de tungstène et d'évaluation de la corrosion

Indicateurs de performance	Méthode de détection
épaisseur du revêtement	Analyse de section transversale SEM, mesureur d'épaisseur XRF
Adhésion	Essai de pelage par traction, essai de rayure
Résistance à la corrosion	Essai au brouillard salin, essai d'immersion acide, courbe de Tafel
dureté	Dureté Vickers, nanoindentation
Résistance à l'usure	Essai de frottement bille-disque, essai d'usure par fatigue

6. Cas d'application typiques de la technologie de revêtement de tubes en alliage de tungstène

Scénario d'application	Solutions de revêtement	Fonction principale
------------------------	-------------------------	---------------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tuyaux de refroidissement des réacteurs nucléaires	Cr ₂ O ₃ - Couche céramique PVD	Améliorer la résistance à la corrosion et la stabilité aux radiations
Manchon pour appareil de radiothérapie médicale	placage chimique Ni-P	Améliorer la résistance aux acides et aux alcalis et la stabilité biologique
Assemblage de caloducs	Revêtement AlTiN	Améliorer la dureté de surface et la conductivité thermique
Système de refroidissement laser	Revêtement par pulvérisation WC-Co	Résistance à l'usure et aux chocs thermiques améliorées

VII. Orientations futures de développement et pôles de recherche

1. de revêtements intelligents réactifs

Revêtements intelligents réactifs qui ajustent automatiquement les propriétés de surface dans des environnements spécifiques tels que les températures élevées/acides forts.

2. Le revêtement fonctionnalisé superhydrophobe/anti-tartre

résout le problème d'entartrage des tubes en alliage de tungstène dans l'eau de refroidissement ou les fluides physiologiques.

3. Le système de revêtement auto-cicatrisant in situ

prolonge la durée de vie du revêtement et améliore la stabilité du service multi-cycles.

4. Technologies de revêtement à basse température vertes et respectueuses de l'environnement

telles que la technologie de revêtement au plasma à température ambiante et les méthodes CVD à basse température.

Conclusion :

La technologie de revêtement fonctionnel des tubes en alliage de tungstène est un élément clé du développement futur de l'intégration hautes performances et multifonctionnelle. Grâce au choix des matériaux, à la conception structurelle, à l'optimisation des procédés de préparation et au contrôle des interfaces, les tubes en alliage de tungstène peuvent démontrer d'excellentes performances globales dans des environnements de service plus exigeants, favorisant ainsi leur application généralisée et leur modernisation dans les secteurs de la fabrication haut de gamme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 7 Normes internationales et système de conformité pour les tubes en alliage de tungstène

7.1 Normes nationales/industrielles chinoises pour les tubes en alliage de tungstène (GB/T, YS/T)

En Chine, les tubes en alliage de tungstène, matériau métallique haute performance, sont largement utilisés dans des secteurs stratégiques tels que l'énergie nucléaire, l'aérospatiale, l'armée, le médical et l'électronique. Leur production, leur contrôle et leur utilisation sont réglementés par de multiples normes nationales et sectorielles. Le système normatif actuel de la Chine repose principalement sur des normes nationales (GB/GBT) et sectorielles (YS/T, pour l'industrie métallurgique), couvrant les matières premières, les propriétés physiques, la composition chimique, les méthodes d'essai, les tolérances dimensionnelles et la sécurité des emballages.

1. Application des normes nationales chinoises (GB, GB/T) aux tubes en alliage de tungstène

Les normes nationales chinoises (GB) et les normes nationales recommandées (GB/T) sont des éléments importants du système national de contrôle de la qualité, garantissant l'universalité, la sécurité et l'interchangeabilité des tubes en alliage de tungstène sur le marché intérieur. Bien qu'il n'existe actuellement aucune norme nationale indépendante spécifique aux « tubes en alliage de tungstène », plusieurs normes pertinentes peuvent servir de référence :

- **GB/T 4187.1-2008 « Règles générales pour l'analyse chimique du tungstène et des produits à base de tungstène »**
→ spécifie les exigences générales pour l'analyse de la composition chimique des matériaux à base de tungstène (y compris les alliages de tungstène) ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **GB/T 34920-2017 « Tiges en alliage de tungstène haute densité »**
→ Cette norme s'applique aux matériaux de traitement par déformation pour les alliages de tungstène haute densité tels que le tungstène-nickel-fer et le tungstène-nickel-cuivre. Certaines de ses exigences techniques peuvent servir de référence pour la conception des tubes.
- **GB/T 25744-2010 « Ébauches compactées et frittées en alliage lourd à base de tungstène »**
→ Normalise les propriétés physiques, les écarts de composition et les exigences de qualité d'apparence pour les compacts en alliage de tungstène issus de la métallurgie des poudres ;
- **GB/T 15825-1995 « Détermination de la densité des pièces de structure métalliques issues de la métallurgie des poudres »**
→ Méthode normalisée pour les essais de densité des tubes en alliage de tungstène ;
- **Série GB/T 2423, GB/T 10125-2021**
→ Relatif aux normes de test d'adaptabilité environnementale telles que la résistance à la corrosion, le cyclage thermique et les tests au brouillard salin.

2. Certaines spécifications de la norme de l'industrie métallurgique chinoise (YS/T) applicables aux tubes en alliage de tungstène

La norme YS/T est une norme industrielle métallurgique publiée par l'Association chinoise de l'industrie des métaux non ferreux et ses organisations subordonnées. Les éléments suivants sont étroitement liés aux tubes en alliage de tungstène :

- **YS/T 798-2012 « Alliages de tungstène lourds pour la métallurgie des poudres »**
→ Cette norme spécifie la composition, la masse volumique, les propriétés mécaniques et les normes de contrôle dimensionnel des alliages à base de tungstène (tels que le tungstène-nickel-fer et le tungstène-nickel-cuivre). Une partie de cette norme s'applique à l'évaluation des performances des ébauches de tubes ou des produits finis en alliage de tungstène.
- **YS/T 1083-2015 « Règles générales pour l'emballage, le marquage, le stockage et le transport des produits en tungstène et en alliage de tungstène »**
→ Cette norme spécifie les exigences techniques pour l'emballage, la protection et le transport des matériaux en tungstène et sert de base importante pour les réglementations sur l'emballage des tubes en alliage de tungstène.
- **YS/T 1187-2017 « Spécification technique pour les produits travaillés à chaud en alliages de tungstène à forte densité »**
→ Applicable aux pièces de structure en alliage de tungstène formées par laminage à chaud, forgeage et extrusion. Bien qu'elle ne concerne pas directement les tubes, elle constitue une référence importante pour le contrôle de l'épaisseur des parois et l'évaluation des propriétés mécaniques.
- **YS/T 1190-2017 Spécifications techniques pour les produits en tungstène fritté et en alliage de tungstène**
→ Applicable à la détermination de la précision dimensionnelle et au contrôle des défauts des ébauches de tubes frittés ou des tubes en tungstène de forme quasi nette .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Champ d'application de la classification des normes et des niveaux de qualité

La plupart des fabricants de tubes en alliage de tungstène formulent des normes d'entreprise ou des spécifications de contrôle interne basées sur les exigences générales des normes susmentionnées et sur les caractéristiques de leurs produits. Les classifications de qualité courantes des matériaux dans ces normes comprennent :

- **Grade de densité ($\geq 17,0, 17,5, 18,0, 18,5, 18,8 \text{ g/cm}^3$) ;**
- **Classe de propriétés mécaniques (divisée par la résistance à la traction et l'allongement) ;**
- **Qualité de surface (traitée, polie, brillante) ;**
- **Niveau de tolérance dimensionnelle (généralement $\pm 0,05 \text{ mm} \sim \pm 0,2 \text{ mm}$) .**

IV. Lien avec les normes et certifications internationales

Ces dernières années, avec l'expansion des exportations de tubes en alliage de tungstène, les entreprises chinoises ont progressivement aligné leurs normes chinoises sur les normes internationales (ASTM, MIL, ISO, etc.). Parmi les approches courantes, on peut citer :

- Énumérez les normes de mise en œuvre dans la description du produit, telles que « Normes de mise en œuvre : YS/T 798-2012, référence ASTM B777-15 » ;
- Fournir des rapports d'inspection et des certificats bilingues en chinois et en anglais pour répondre aux exigences de traçabilité de la qualité à l'étranger ;
- Mettre en œuvre la conversion d'équivalence standard et l'enregistrement de certification, tels que le système de gestion de la qualité ISO 9001, la déclaration de conformité RoHS/REACH, etc.

V. Conclusion

La Chine n'a pas encore établi de système de normes complet et indépendant pour les tubes en alliage de tungstène. Un ensemble de normes nationales et industrielles existantes constitue une base essentielle pour garantir la qualité de fabrication, les techniques de test et la cohérence des produits. À l'avenir, avec la pénétration et le développement des tubes en alliage de tungstène dans des secteurs haut de gamme comme l'aviation, l'énergie nucléaire et l'électronique, ils devraient affiner et internationaliser davantage les normes spécialisées, renforçant ainsi le leadership technologique et la part de marché de la Chine dans l'industrie mondiale des alliages de tungstène.

7.2 Interprétation du système de normes américaines (ASTM, MIL) pour les tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage lourd de tungstène (tubes en alliage lourd de tungstène) sont largement utilisés aux États-Unis dans l'industrie nucléaire, l'aérospatiale, l'armée, la protection médicale et les composants structurels haute température. En raison de leur densité élevée, de leur grande solidité et de leur excellente résistance à la chaleur et aux radiations, le système américain de normes des matériaux impose des exigences de qualité extrêmement strictes aux tubes en alliage de tungstène. Les États-Unis utilisent principalement les normes ASTM (American Society for Testing and

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Materials) et MIL (Military Standard) pour réglementer les tubes en alliage de tungstène et les produits connexes. Cette section détaille les normes fondamentales, les spécifications techniques et l'intégration des applications des tubes en alliage de tungstène dans ces deux systèmes.

1. Spécifications relatives aux tubes en alliage de tungstène dans les normes ASTM

L'ASTM (American Society for Testing and Materials) est l'un des organismes de normalisation des matériaux les plus reconnus au monde, et ses normes publiées sont largement adoptées et mises en œuvre dans le monde entier. Bien qu'ASTM n'ait pas élaboré de norme distincte pour les « tubes en alliage de tungstène », plusieurs normes relatives aux alliages de tungstène haute densité et aux produits en tungstène peuvent servir de référence pour la production et l'inspection des tubes en alliage de tungstène :

1. Spécification standard ASTM B777-15 pour les produits en alliage métallique de tungstène lourd pressés et frittés

- **Champ d'application** : Revêtement de produits pressés et frittés en alliages à haute densité tels que le tungstène-nickel-fer et le tungstène-nickel-cuivre, adaptés aux ébauches de tuyaux ou aux pièces de forme quasi nette.
- **Niveau de performance** : Classe 1–4, correspondant à différentes densités (17,0–18,5 g/cm³) et propriétés mécaniques.
- **Adéquation du tube** : Il peut être utilisé comme spécification de matériau de base pour les tubes en alliage de tungstène, fournissant une gamme de composition, un contrôle de densité et des objectifs de propriétés mécaniques.

2. ASTM B705 « Spécification générale pour les tubes en tungstène et en alliage de tungstène » (Remarque : bien qu'elle fasse référence aux tubes en tungstène plutôt qu'aux alliages de tungstène, elle reste une valeur de référence)

- **Réglementation** : écart de taille des tuyaux, contrôle de l'épaisseur des parois, qualité de surface, courbure et méthodes d'essai.
- **Matériaux applicables** : tubes en tungstène pur et ses alliages traités à chaud, produits laminés à froid ou recuits.

3. ASTM E8/E8M - Méthodes d'essai de traction pour matériaux métalliques

- **Application** : Utilisé pour les tests de propriétés mécaniques des tubes en alliage de tungstène, y compris la résistance à la traction, la limite d'élasticité et l'évaluation de l'allongement.
- **Tests de soutien** : Souvent utilisés en conjonction avec la norme ASTM B777 pour garantir que le produit répond aux exigences de résistance à l'utilisation finale.

4. ASTM E384 - Méthode d'essai de microdureté

- **Utilisé pour évaluer** : la dureté Vickers/Knoop des surfaces des parois intérieures et extérieures des tubes en alliage de tungstène, particulièrement adapté aux produits à haute densité.

5. ASTM E112 - Méthode d'évaluation de la granulométrie

- **Contrôle de structure** : utilisé pour détecter l'uniformité de la microstructure des tubes en alliage de tungstène après frittage ou traitement thermique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Scénarios d'application des tubes en alliage de tungstène dans les normes militaires MIL

Les normes militaires américaines (MIL-SPEC/MIL-STD) servent principalement à la sélection et à l'homologation des matériaux clés des équipements et systèmes militaires. L'alliage de tungstène, grâce à sa densité et à ses performances énergétiques cinétiques exceptionnelles, est largement utilisé dans les noyaux de missiles, les contrepoids de compartiments de queue, les blindages balistiques et les composants des systèmes inertiels. Les normes MIL suivantes sont étroitement liées à la fabrication de tubes en alliage de tungstène :

1. MIL-T-21014C (alliage à base de tungstène, haute densité)

- **Catégories applicables** : Couvrant les alliages à haute densité à base de tungstène (principalement W-Ni-Fe), y compris les barres, les pièces forgées et les tubes ;
- **Applications typiques** : Convient aux pièces structurelles militaires telles que les pièces anti-pénétration à haute résistance (noyaux de balle), les composants inertiels, etc.
- **Réglementation** : incluant la composition chimique, les conditions de traitement thermique, la densité, la tolérance, les propriétés mécaniques et les exigences de qualité d'apparence ;
- **Contrôle qualité** : incluant les contrôles non destructifs (ultrasons, rayons X), les analyses métallographiques et les mesures de dureté, etc.

2. MIL-STD-2154 (norme de test par ultrasons)

- **Application** : Utilisé pour la détection des défauts internes des pièces militaires telles que les tubes en alliage de tungstène ;
- **Classement** : L'acceptabilité est déterminée en fonction de la taille du défaut et de l'amplitude de réflexion.

3. MIL-STD-883 (Tests environnementaux pour les dispositifs microélectroniques)

- **Valeur de référence** : Si des tubes en alliage de tungstène sont utilisés dans des emballages électroniques ou des structures de dissipateur thermique, leur résistance aux chocs thermiques, leur isolation électrique et leurs propriétés d'étanchéité peuvent se référer à cette spécification de test standard.

3. Caractéristiques techniques et avantages du système de normes américain

Catégorie de projet	Caractéristiques du système standard
Conformité aux normes	Les normes ASTM et MIL sont hautement unifiées en termes de composition des matériaux, d'indicateurs de performance, de méthodes de test, etc., ce qui facilite l'approvisionnement et l'amarrage à l'échelle mondiale.
Large applicabilité	La plupart des normes ASTM s'appliquent aux plaques, tiges, tubes et pièces de forme spéciale en alliage de tungstène, avec une compatibilité élevée.
Évaluation claire de la qualité	Par exemple, la norme B777 divise les alliages de tungstène en différentes « classes » correspondant à des niveaux de densité et de résistance spécifiques, ce qui permet aux entreprises de se connecter plus facilement à des applications haut de gamme.
Méthodes de test faisant autorité	Les tests impliquant la microstructure, les propriétés mécaniques, les défauts de surface, etc. sont tous pris en charge par un système de méthodes complet.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Recommandations de certification et de correspondance pour les tubes en alliage de tungstène exportés vers les États-Unis

Pour satisfaire aux exigences de conformité du marché américain des tubes en alliage de tungstène, il est conseillé aux fabricants nationaux de :

1. **Comparaison des normes de produits** : ASTM B777, MIL-T-21014C et d'autres normes doivent être clairement adoptées ou référencées dans les spécifications techniques ;
2. **Fournir des rapports d'inspection de qualité en chinois et en anglais** : y compris l'analyse de la composition chimique, les tests de propriétés mécaniques, les enregistrements de tests par ultrasons, etc.
3. **des rapports de test tiers** : tels que les certificats de test standard ASTM émis par SGS, BV et d'autres institutions ;
4. **Enregistrement et dépôt de l'industrie militaire** : si le client est impliqué dans la chaîne d'approvisionnement militaire américaine, les qualifications de conformité ITAR pertinentes doivent être obtenues.

V. Conclusion

Les normes américaines ASTM et MIL offrent un soutien complet à la production normalisée et au commerce international des tubes en alliage de tungstène. Bien qu'il n'existe pas de norme unique et dédiée aux « tubes en alliage de tungstène », les spécifications pertinentes suffisent à guider la production, l'inspection et le contrôle qualité. Les fabricants chinois de tubes en alliage de tungstène, lorsqu'ils explorent le marché américain, doivent comprendre et respecter scrupuleusement les normes clés telles que ASTM B777 et MIL-T-21014 afin de réaliser des avancées constantes et une croissance durable dans la chaîne d'approvisionnement mondiale des matériaux haut de gamme.

7.3 Normes internationales de l'UE et de l'ISO pour les tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage lourd de tungstène (tubes en alliage lourd de tungstène), un matériau avancé doté d'une densité élevée, d'un point de fusion élevé et d'une excellente résistance aux radiations et à la corrosion, sont largement utilisés dans l'aérospatiale, l'énergie nucléaire, la protection médicale, l'armée et la fabrication haut de gamme. Face à l'exigence croissante d'homogénéité et de traçabilité des produits sur le marché international, l'Union européenne (EN) et l'Organisation internationale de normalisation (ISO) ont établi des normes et spécifications complètes et rigoureuses pour la conception, les performances, la sécurité et l'impact environnemental des tubes en alliage de tungstène. La compréhension et la maîtrise de ces normes internationalement reconnues sont essentielles pour que les fabricants de tubes en alliage de tungstène puissent s'engager dans le commerce international, la coopération technique et le développement de systèmes qualité.

1. Spécifications relatives aux tubes en alliage de tungstène dans le système de normes européennes EN

Bien qu'il n'existe aucune disposition indépendante spécifique pour les « tubes en alliage de tungstène » dans les normes EN de l'UE, les systèmes généraux de normes de produits de matériaux métalliques et de métallurgie des poudres qui peuvent être référencés incluent :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. EN ISO 4499-1/2 : Examen métallographique et analyse microstructurale du carbure cémenté

- Il peut être utilisé pour l'évaluation microstructurale des tubes en alliage de tungstène, en particulier pour la description quantitative de l'uniformité et de la morphologie des grains de la structure dense frittée.
- Guider le processus de préparation des échantillons métallographiques et unifier la terminologie d'inspection et les méthodes d'évaluation.

2. EN 10204 : Essais et certification des produits métalliques

- Les entreprises sont tenues de fournir des rapports d'inspection des matériaux et des certificats, qui peuvent servir de certificats de qualité pour les tubes en alliage de tungstène lorsqu'ils sont exportés.
- Y compris 2.1 (Déclaration de conformité), 3.1 (Certification de qualité par un tiers) et d'autres formulaires de documents.

3. EN ISO 6506 / 6507 / 6508 : normes d'essai de dureté Brinell, Vickers et Rockwell

- Convient pour tester la dureté des parois intérieures et extérieures des tubes en alliage de tungstène, souvent utilisé dans l'étape d'inspection du produit fini.
- Clarifier les exigences détaillées telles que la charge d'indentation, le temps de maintien et le traitement de surface d'essai.

4. EN ISO 6892 : Norme d'essai de traction pour les matériaux métalliques

- Convient pour évaluer la résistance à la traction, la limite d'élasticité et l'allongement des tubes et tubes en alliage de tungstène, et convient aux matériaux laminés à chaud, recuits ou frittés.

5. EN ISO 6508-1 : Essai de dureté Rockwell pour les métaux

- pour les produits en alliage de tungstène à haute dureté et convient à la mesure de la dureté locale des tubes de petit diamètre et à parois minces.

6. EN ISO 9001 : Exigences relatives au système de gestion de la qualité

- Pour les fabricants de tubes en alliage de tungstène exportant vers l'UE, la mise en œuvre d'un système de contrôle qualité conforme à la norme ISO 9001 est l'une des conditions de base pour entrer sur le marché.

2. Spécifications relatives aux tubes en alliage de tungstène selon le système de normes internationales ISO

En tant qu'Organisation internationale de normalisation, l'ISO publie des normes relatives aux matériaux et aux essais, largement adoptées par l'industrie manufacturière haut de gamme mondiale. Elles font particulièrement autorité dans les systèmes de certification transnationaux, les appels d'offres internationaux et les comparaisons de normes.

1. ISO 2768 (Norme de tolérance géométrique)

- Fournit des critères de tolérance généraux pour le diamètre intérieur, le diamètre extérieur, l'épaisseur de paroi, l'ovalité, la longueur et d'autres contrôles dimensionnels des tubes en alliage de tungstène.
- La norme ISO 2768-m est couramment utilisée comme norme d'usinage pour les exigences générales de précision.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. ISO 9001 / ISO 14001 / ISO 45001 trois principaux systèmes de gestion

- Les entreprises doivent obtenir la certification par un tiers du système de gestion de la qualité (9001), du système de gestion environnementale (14001) et du système de santé et de sécurité au travail (45001) pour répondre aux exigences des clients internationaux en matière de production conforme.

3. ISO 6892-1/-2 : Méthodes d'essai de traction pour matériaux métalliques

- Guider les tests de propriétés mécaniques des tubes en alliage de tungstène dans différents environnements de température, y compris les processus de test à température ambiante (-1) et à haute température (-2).

4. ISO 6506/6507 : Mesure de la dureté des métaux

- Prend en charge les méthodes de test de dureté Brinell et Vickers, adaptées à l'évaluation de la dureté de haute précision des tubes en alliage de tungstène.

5. Série ISO 10110 : normes relatives à la qualité des matériaux et des surfaces des composants optiques

- Si des tubes en alliage de tungstène sont utilisés dans des structures optiques ou des systèmes de protection d'instruments nucléaires, cette norme peut être utilisée comme référence pour la rugosité de surface, la déformation et la planéité.

6. ISO 14062 : Lignes directrices pour la conception de produits respectueux de l'environnement

- des tubes en alliage de tungstène au cours de leur cycle de vie, y compris la consommation d'énergie, la recyclabilité et l'emballage respectueux de l'environnement.

L'importance des normes UE/ISO dans l'exportation de tubes en alliage de tungstène

Dimension de conformité	de	Critères clés	Exigences de conformité	Scénario d'application
Performance produit	du	ISO 6892, EN ISO 6507	Essais unifiés de traction et de dureté	Acceptation des clients et comparaison des performances
Tolérance dimensionnelle		ISO 2768	Contrôle des écarts de diamètre intérieur et extérieur/épaisseur de paroi	Support technique et ancrage du système
Réglementations environnementales		ISO 14001 / REACH / RoHS	Conforme aux réglementations environnementales et ne contient aucune substance nocive	Exportation vers l'UE, certification verte
Système de qualité		ISO 9001, EN 10204	Traçabilité des documents et certification qualité	Examen des contrats commerciaux et des achats
Détection des défauts		ISO 9712 / EN 10308	Qualifications en matière de contrôles non destructifs et opérations normalisées	Acceptation dans les domaines de l'aviation et de la médecine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Recommandations pour la conformité des entreprises de tubes en alliage de tungstène aux normes internationales

1. **base de données technique internationale standard** : organiser et mettre à jour régulièrement les textes des normes ISO et EN relatifs aux tubes en alliage de tungstène pour référence interne et orientation R&D.
2. **Analyse comparative des paramètres et des normes des produits** : Établir un tableau comparatif des dimensions, des performances et des normes internationales des produits pour garantir que les liens R&D et processus répondent aux exigences du marché cible.
3. **tests par des tiers** :
 - Certification du système ISO 9001/14001 obtenue ;
 - Nous confions à SGS, TÜV, BV et à d'autres institutions la réalisation de tests de composition, de dimensions et de propriétés mécaniques selon les normes EN ou ISO.
4. **Formuler des normes de contrôle interne d'entreprise (Q/)** : Sur la base de la norme ISO/EN, formuler des normes d'entreprise en combinaison avec les exigences des clients et la réalité des produits pour former un système d'assurance qualité efficace.

V. Conclusion

Le système de normes de l'UE et de l'ISO fournit des spécifications techniques systématiques et hautement fiables pour le commerce international, les applications techniques et le développement de produits pour les tubes en alliage de tungstène. Ces normes couvrent non seulement les différentes méthodes d'essai et d'évaluation des performances des tubes en alliage de tungstène, des matières premières aux produits finis, mais aussi le respect des réglementations environnementales et de sécurité. Pour les fabricants de tubes en alliage de tungstène souhaitant se développer sur le marché mondial, notamment au sein de l'UE, une compréhension approfondie et un respect rigoureux de ces normes seront essentiels pour renforcer leur compétitivité internationale et assurer un développement de qualité.

Exigences de conformité pour les tubes en alliage de tungstène (RoHS, REACH, MSDS)

Les tubes en alliage lourd de tungstène (tubes en alliage lourd de tungstène), un matériau métallique essentiel à haute densité, haute résistance, résistance aux hautes températures et à la corrosion, sont largement utilisés dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'énergie nucléaire, de l'armée, de la médecine et de l'électronique. Face à l'importance croissante accordée par le marché international à la protection de l'environnement, à la sécurité et au développement durable, les tubes en alliage de tungstène doivent respecter scrupuleusement les réglementations et normes environnementales en vigueur lors de leur exportation et de leur utilisation technique. En particulier, des réglementations telles que **RoHS** (restriction des substances dangereuses), **REACH** (enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques) et les fiches de données de sécurité (**FDS**) constituent un obstacle majeur à l'entrée sur le marché des tubes en alliage de tungstène au sein de l'UE et à l'international.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cette section analysera systématiquement les points clés de la conformité environnementale des tubes en alliage de tungstène et proposera des voies de mise en œuvre et des recommandations de gestion pour les entreprises.

1. Analyse de l'applicabilité de la directive RoHS et des tubes en alliage de tungstène

La directive RoHS (Restriction of Hazardous Substances) est une réglementation environnementale de l'Union européenne qui restreint l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les produits électriques et électroniques. Actuellement, la directive RoHS 2.0 (2011/65/UE) et ses versions révisées sont en vigueur.

1. Les substances soumises à des restrictions RoHS comprennent principalement :

- Plomb (Pb) : < 0,1 %
- Mercure (Hg) : < 0,1 %
- Cadmium (Cd) : < 0,01 %
- Chrome hexavalent (Cr6+) : < 0,1 %
- Polybromobiphényles (PBB) et polybromodiphényléthers (PBDE) : < 0,1 %
- Phtalates (DEHP, BBP, DBP, DIBP) : < 0,1 %

2. Facteurs de risque dans les tubes en alliage de tungstène :

- Bien que l'alliage de tungstène lui-même ne contienne pas les éléments restreints ci-dessus, si des matériaux de soudure, de placage ou de dopage contenant du plomb sont utilisés, il peut dépasser la limite ;
- Si des tubes en alliage de tungstène sont utilisés comme composants structurels, composants de refroidissement ou composants de protection contre les rayonnements d'appareils électroniques dans des systèmes électroniques et électriques, une déclaration de conformité RoHS est requise.

3. Exigences de conformité :

- Fournir une déclaration de conformité RoHS (DoC) indiquant que le produit ne contient pas de substances restreintes ;
- audits de conformité des fournisseurs ;
- Prise en charge de la certification des rapports de test tiers (SGS, TÜV).

2. Mécanisme de contrainte du règlement REACH sur les tubes en alliage de tungstène

REACH (enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques) est un règlement européen complet sur les produits chimiques, couvrant l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et la restriction des substances, et est largement applicable aux produits exportés vers l'UE.

1. Champ d'application du tube en alliage de tungstène :

- REACH s'applique à tous les produits chimiques, mélanges et articles fournis sur le marché de l'UE (article) ;
- Les tubes en alliage de tungstène sont considérés comme des « articles » et si leurs ingrédients contiennent des substances extrêmement préoccupantes (SVHC) et que la teneur dépasse 0,1 %, ils doivent être signalés et notifiés.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Risques associés aux substances extrêmement préoccupantes (SVHC) :

- Certains adhésifs, additifs ou agents de traitement de surface peuvent contenir des SVHC répertoriés dans REACH ;
- Si la teneur en ingrédients tels que le béryllium, certains phtalates, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dépasse la limite, elle doit être signalée à l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA).

3. Mesures de réponse de l'entreprise :

- Établir une liste de substances REACH et un mécanisme de comparaison ;
- Exiger des fournisseurs de matières premières qu'ils fournissent des déclarations de conformité REACH ;
- Effectuer une évaluation des risques sur les étapes du processus qui peuvent contenir des SVHC (telles que la galvanoplastie et le revêtement) ;
- Complétez les procédures d'enregistrement ou de notification REACH si nécessaire.

3. Exigences relatives aux documents MSDS pour une livraison en toute sécurité des tubes en alliage de tungstène

La FDS (Fiche de Données de Sécurité) est un document d'information sur la sécurité chimique accepté à l'échelle internationale qui contient des informations telles que la composition de base du produit, ses propriétés physiques et chimiques, ses caractéristiques de toxicité, ses impacts environnementaux, ses mesures d'urgence et sa classification de transport.

1. Situations dans lesquelles une fiche signalétique doit être préparée pour les tubes en alliage de tungstène :

- Si le tube en alliage de tungstène est sous forme de poudre, de fil ou traité en surface (par exemple par galvanoplastie, pulvérisation, etc.), il peut être considéré comme un risque pour la sécurité ;
- Si l'entreprise est impliquée dans le transport international et la coopération transfrontalière en matière de chaîne d'approvisionnement, les clients lui demandent généralement de fournir des fiches de données de sécurité (FDS) ;

2. Le contenu clé de la fiche signalétique comprend :

- Composition chimique et proportion (par exemple W 90 %, Ni 6 %, Fe 4 %)
- Identification des dangers : qu'il s'agisse de poussières combustibles, de fumées métalliques, etc.
- Mesures de protection de sécurité : équipements de protection, traitement des fuites, méthodes d'extinction d'incendie, etc.
- Précautions de stockage et de transport : étanchéité, étanchéité à l'humidité, antistatique, classification et code de transport, etc.

3. Recommandations de préparation et d'utilisation :

- Il est recommandé de compiler sur la base de la norme de classification unifiée mondiale SGH ;
- Fournir des versions bilingues en chinois et en anglais ;
- Régulièrement mis à jour et révisé en fonction des évolutions réglementaires ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Fournir aux clients des versions numériques et papier.

4. Recommandations sur le processus de gestion de la conformité environnementale pour les tubes en alliage de tungstène

Gestion	Action recommandée	Fichiers de base
Criblage des matières premières	Établir une liste d'approvisionnement en matières premières non toxiques et inoffensives	Déclaration de conformité RoHS
Contrôle des processus	Vérifiez la présence de soudure au plomb, de placage de métaux lourds, de solvants benzéniques, etc.	Rapport de conformité des processus
Test de produit	Confiez à une agence tierce la réalisation des tests RoHS/REACH	Rapport SGS/Intertek
Surveillance réglementaire	Suivre les mises à jour de la liste des SVHC et les changements réglementaires	Base de données de mise à jour réglementaire
Résultats de conformité	Fournir les documents RoHS, REACH, MSDS et autres documents requis par les clients	Dossiers de conformité

V. Résumé et perspectives

Dans un contexte de réglementations environnementales mondiales de plus en plus strictes, la fabrication et la gestion de la chaîne d'approvisionnement des tubes en alliage de tungstène doivent progressivement s'aligner sur les normes internationales telles que **RoHS, REACH et les fiches de données de sécurité (FDS)**. Les entreprises doivent non seulement contrôler la conformité des matières premières à la source, mais aussi intégrer les exigences environnementales tout au long du processus de conception, de production, d'emballage et de transport afin d'améliorer l'accès aux marchés internationaux et l'image écologique de leurs produits. À mesure que le concept de fabrication verte se développe, la conformité environnementale des tubes en alliage de tungstène deviendra un critère crucial pour mesurer la compétitivité globale d'une entreprise.

Par la suite, les fabricants de tubes en alliage de tungstène peuvent explorer la construction d'un système de traçabilité de conformité environnementale complet, intégrant la liste des matériaux RoHS, le statut de notification REACH et la bibliothèque de documents partagés MSDS via une plate-forme numérique pour réaliser une gestion efficace et une mise à jour dynamique du travail de conformité, prenant ainsi l'initiative dans la concurrence féroce du marché mondial.

7.5 Système qualité des tubes en alliage de tungstène dans l'aviation, l'énergie nucléaire, la médecine et d'autres domaines (AS9100, ISO13485)

Les tubes en alliage de tungstène, grâce à leur densité élevée, leur robustesse et leur excellente **résistance aux hautes températures et aux radiations**, jouent un rôle essentiel dans la fabrication haut de gamme et les applications hautement fiables des secteurs de l'aérospatiale, de l'énergie nucléaire et du médical. Ces secteurs imposent des exigences extrêmement strictes en matière de qualité, de sécurité et de régularité des produits, obligeant les fabricants de tubes en alliage de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungstène à adhérer strictement à des systèmes de gestion de la qualité internationalement reconnus afin de garantir la durabilité et la stabilité de leurs produits dans des environnements complexes ou extrêmes.

Cette section se concentre sur les trois normes clés du système qualité applicables aux fabricants de tubes en alliage de tungstène : **AS9100 (système de gestion de la qualité aérospatiale)**, **ISO13485 (système de gestion de la qualité des dispositifs médicaux)** et **ISO19443 (norme étendue du système de gestion de la qualité pour le domaine de l'énergie nucléaire)**, et analyse leur applicabilité, leurs éléments fondamentaux et leurs recommandations de mise en œuvre.

1. AS9100 : Exigences relatives au système de gestion de la qualité pour l'aérospatiale

L'**AS9100** est une norme de gestion de la qualité pour les secteurs de l'aéronautique, de l'aérospatiale et de la défense, publiée par l'International Aerospace Quality Group (IAQG). Il s'agit d'une version étendue de la norme ISO 9001, qui ajoute des exigences spécifiques à la fabrication aérospatiale.

1. Applicabilité :

- Les tubes en alliage de tungstène sont largement utilisés dans les moteurs d'aviation, les satellites, les fusées et autres équipements comme **contrepois d'aviation, composants inertiels, tuyaux résistants à la chaleur ou matériaux structuraux de protection** ;
- Si l'entreprise est un fournisseur de premier ou de deuxième rang dans la chaîne de l'industrie aérospatiale, elle doit passer la certification AS9100 avant de fournir des marchandises.

2. Contenu principal :

- Sécurité des produits et contrôle des erreurs ;
- Gestion des risques (réflexion fondée sur les risques)
- Contrôle de processus spéciaux (par exemple, traitement thermique, frittage, fabrication additive) ;
- Gestion de la chaîne d'approvisionnement et contrôle des changements ;
- Traçabilité, gestion des non-conformités et mesures correctives et préventives.

3. Recommandations de mise en œuvre :

- Mettre en place un système qualité complet et documenté ;
- Le personnel clé doit suivre une formation d'audit interne et de système AS9100 ;
- Effectuer régulièrement des analyses de capacité de processus et des inspections du premier article (FAI) ;
- Présentation d'outils aéronautiques tels que l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) et le PPAP.

2. ISO 13485 : Norme relative au système de gestion de la qualité des dispositifs médicaux

Les tubes en alliage de tungstène sont largement utilisés **dans les dispositifs de positionnement en radiothérapie, les écrans, les modulateurs de rayons gamma et les contrepois médicaux**. Leur stabilité, leur densité et leurs propriétés amagnétiques les rendent particulièrement adaptés aux équipements médicaux de haute précision. **La norme ISO 13485** est une norme internationale de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

système qualité spécifique à la conception, à la fabrication, à l'installation et à la maintenance des dispositifs médicaux.

1. Scénarios applicables :

- Si les fabricants d'équipements médicaux utilisent des tubes en alliage de tungstène pour le blindage contre les radiations, les composants des dispositifs de protection et **les composants à rayons X**, les matières premières et les pièces structurelles doivent provenir de fournisseurs ayant obtenu la certification ISO13485.
- Les tubes en alliage de tungstène médical constituent directement une partie d'un dispositif médical, les fabricants concernés doivent coopérer avec l'enregistrement, l'audit et l'examen des données techniques.

2. Points saillants des exigences :

- Gestion du cycle de vie des produits et contrôle des risques ;
- Vérification et validation des procédés (tels que les procédés irréversibles tels que le frittage et le laminage) ;
- Tenue de dossiers (fichier d'historique de conception) ;
- Suivi des processus, audit interne et mécanisme de rétroaction des clients ;
- Déclaration des événements indésirables et gestion du programme de rappel.

3. Contre-mesures de l'entreprise :

- Assurer la cohérence et la stabilité des lots de produits ;
- Améliorer l'inspection des matières premières, la surveillance des processus et les registres d'usine ;
- Les modifications de conception nécessitent une évaluation de l'impact médical potentiel et une revalidation ;
- Tracez chaque lot de tubes en alliage de tungstène jusqu'à la source d'approvisionnement d'origine et au processus de fabrication.

3. ISO 19443 : une norme de gestion de la qualité spécifiquement destinée au secteur de l'énergie nucléaire (référéncée ISO 9001)

Les tubes en alliage de tungstène **utilisés dans les équipements nucléaires comme tubes de protection contre les rayonnements, composants structurels ou composants de systèmes de conductivité thermique** doivent répondre aux exigences plus strictes de l'industrie nucléaire en matière de sécurité, de fiabilité et de traçabilité. **La norme ISO 19443** est une extension de la norme ISO 9001 pour l'industrie nucléaire, spécifiquement applicable à la gestion de la qualité des fournisseurs **d'installations nucléaires** .

1. Fonctionnalités de l'application :

- Principalement applicable aux fournisseurs de matériaux, de composants et de services pour **les centrales nucléaires, les cycles du combustible nucléaire, les réacteurs nucléaires et les projets connexes** ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les tubes en alliage de tungstène utilisés pour les supports de noyau, les manchons de rayonnement, les composants de blindage, etc. doivent être conformes au contrôle de processus complet de cette norme.

2. Points de contrôle principaux :

- La culture de sécurité est intégrée au système de gestion de la qualité ;
- Mécanisme d'évaluation des risques liés aux produits et services ;
- Traçabilité et intégrité de la documentation ;
- Conversion des exigences clients et mise en œuvre des clauses réglementaires ;
- Activités de témoignage par des tiers et de vérification spécifiées par le client.

4. Suggestions de comparaison et d'adaptation des trois principaux systèmes

standard	Zones applicables	Exigences clés	Applications typiques
AS9100	Aérospatial	Sécurité des produits, traçabilité et gestion des risques	Composants inertiels des satellites, contrepoids spatiaux
ISO13485	dispositifs médicaux	Validation des processus, signalement des événements indésirables et conformité réglementaire	Manchons de protection pour radiothérapie, composants de protection contre les rayons X
ISO19443	industrie de l'énergie nucléaire	contrôle de qualité de niveau nucléaire et intégrité des documents	Tubes de blindage nucléaire, composants d'irradiation

V. Résumé et perspectives

En tant que matériau structurel fonctionnel de haute technicité, les tubes en alliage de tungstène ne sont plus seulement compétitifs sur la base d'indicateurs de performance pour entrer dans le **secteur de la fabrication d'équipements haut de gamme**. Ils nécessitent également un système de gestion de la qualité systématique et durable. Les normes AS9100, ISO13485 et ISO19443, reconnues mondialement comme faisant autorité, sont devenues la clé de l'entrée des entreprises.

Pour les entreprises manufacturières, il est recommandé d'utiliser la norme ISO 9001 comme base de gestion de la qualité. Sur cette base, des normes étendues adaptées au secteur cible doivent être sélectionnées afin de promouvoir la modernisation des systèmes de contrôle interne, la transparence des processus, la traçabilité des lots et l'intégration approfondie des systèmes qualité et du développement du marché, posant ainsi des bases solides pour l'industrialisation et l'internationalisation des tubes en alliage de tungstène.

Les suggestions ultérieures incluent l'exploration de la construction intégrée du système de qualité, l'intégration horizontale des trois normes principales et la réalisation d'une plate-forme commune, la modularisation et la gestion numérique des activités de l'aviation, de l'énergie nucléaire et de la médecine, afin que les produits de tubes en alliage de tungstène puissent véritablement atteindre le niveau international de « cohérence haut de gamme, de haute qualité et de conformité ».

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

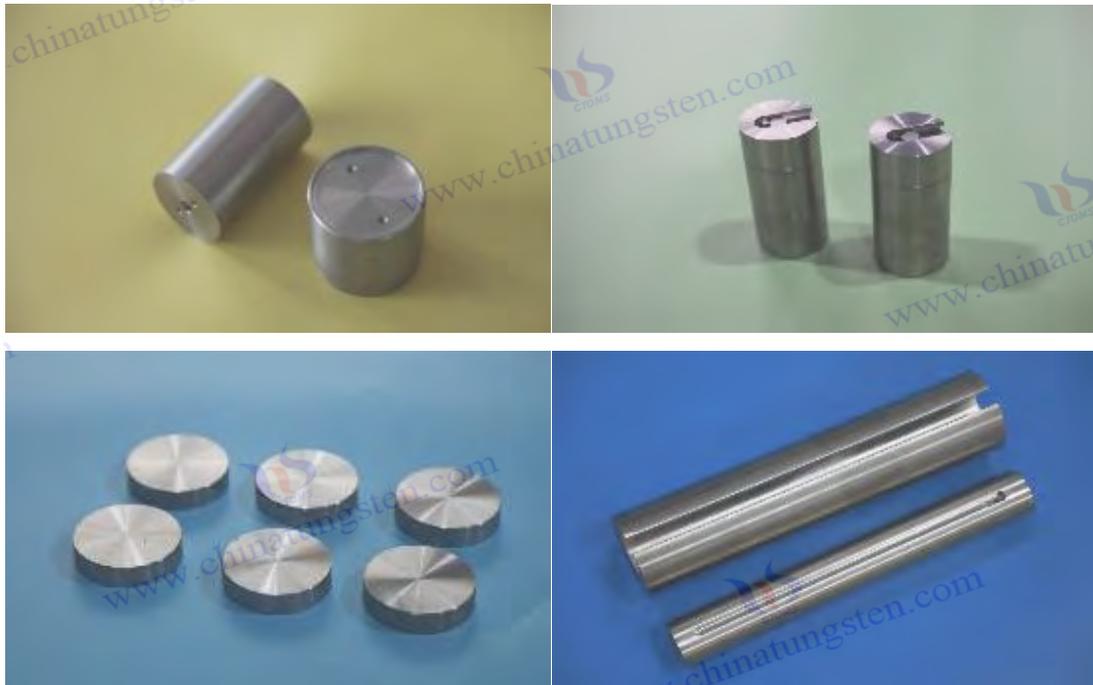
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Chapitre 8 Spécifications d'emballage, de stockage et de transport des tubes en alliage de tungstène

8.1 Sélection des matériaux d'emballage et conception de la protection pour les tubes en alliage de tungstène (vide, séchage et tamponnage)

En tant que produit en alliage de précision à haute densité, de grande valeur et cassant, les tubes en alliage de tungstène imposent des exigences extrêmement élevées aux systèmes d'emballage et de protection pendant **la production, le stockage et le transport international**. Un emballage inapproprié peut non seulement provoquer des rayures superficielles, des collisions sur les bords ou des déformations structurelles, mais aussi entraîner une oxydation ou une contamination du métal due à l'humidité, impactant ainsi la qualité du traitement ultérieur et les performances finales. Par conséquent, le développement scientifique et systématique d'un système de matériaux d'emballage et d'une conception de protection pour les tubes en alliage de tungstène est crucial pour garantir la qualité du produit et la fiabilité de la livraison.

1. Principes de base de la conception des emballages de tubes en alliage de tungstène

1. **Résistance à la compression et aux chocs** : En raison du poids élevé et de la structure fragile des tubes en alliage de tungstène, le système d'emballage doit avoir une capacité d'absorption des chocs suffisante pour éviter les dommages causés par une collision inertielle pendant le chargement, le déchargement et le transport.
2. **Étanchéité et étanchéité à l'humidité** : Bien que l'alliage de tungstène ait une bonne résistance à la corrosion, les composants tels que le nickel et le cuivre dans l'alliage peuvent

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

encore souffrir d'une décoloration de surface et d'une légère oxydation sous l'action de l'humidité, un emballage étanche à l'humidité doit donc être effectué.

3. **Matériaux propres et non polluants** : Les matériaux d'emballage ne doivent pas libérer de polluants organiques, de sulfures, de chlorures et d'autres composants chimiques actifs pour éviter d'affecter la propreté de la surface du tube en alliage de tungstène.
4. **normes de transport internationales** : La structure de l'emballage doit être pratique pour le chargement et l'inspection du dédouanement dans des unités de conteneurs standard pour le transport maritime, aérien et terrestre, et être conforme aux réglementations internationales telles que RoHS et ISPM 15.

2. Types de matériaux d'emballage courants et applicabilité

1. Matériau de protection intérieur

Matériel	Fonction	Caractéristiques
<i>Film de polyéthylène</i>	Hermétique, légèrement imperméable	Bonne flexibilité, convient à l'emballage sous vide
<i>Film composite en feuille d'aluminium</i>	Résistant à l'humidité et aux UV	Convient pour le stockage et le transport à long terme, forte performance anti-âge
<i>Mousse/EPE (polyéthylène émeraude)</i>	Mise en mémoire tampon et prévention des collisions	Souvent enroulé autour de la paroi intérieure d'un seul tube ou boîtier en tungstène
<i>Désoxydant/Dessiccant</i>	Absorption d'humidité et désoxygénation	Le gel de silice et les tamis moléculaires peuvent offrir une protection à long terme

2. Structure tampon de la couche intermédiaire

- **Carton nid d'abeille ou papier ondulé** : utilisé pour isoler le contact entre les tubes en alliage de tungstène, faible coût et forme personnalisable ;
- **Tampons EVA haute densité** : couramment utilisés pour le positionnement et la protection des tubes en tungstène de précision, forte résistance à la pression et découposables.

3. Récipient de protection extérieur

- **Caisse en bois haute résistance (logo IPPC)** : adaptée à l'exportation longue distance et au transport lourd, avec une structure stable ;
- **Boîtier en alliage d'aluminium ou boîtier en matériau composite** : adapté à une utilisation avec des équipements express aériens et haut de gamme ;
- **Supports de tubes spéciaux pour plusieurs tubes en alliage de tungstène** : Fabriqués en PE, ABS ou alliage d'aluminium, ils peuvent réaliser une fixation structurelle, un alignement du diamètre du tube et un transport par lots.

3. Exemples typiques de combinaisons d'emballages

1. **Structure de protection de tube en alliage de tungstène orientée vers l'exportation** (applicable aux tubes robustes > 1 m de long) :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Couche intérieure : emballage sous vide (film composite aluminium-plastique + déshydratant)
- Couche intermédiaire : ensemble complet EPE + entretoise de support de tuyau de dérivation unique
- Couche extérieure : caisse en bois renforcée de contreplaqué + traitement thermique IPPC + marque anti-basculement

2. Solution d'emballage d'accessoires d'aviation en tube de tungstène de précision :

- Couche intérieure : film PE propre et sans poussière + séparation en mousse multicouche
- Couche extérieure : Boîte en aluminium ou boîte en plastique recyclable à haute résistance avec serrure
- Pièces jointes : Étiquette laser + formulaire d'inspection d'usine + manuel d'instructions MSDS

4. Considérations relatives à la conception de l'emballage des tubes en alliage de tungstène

- **Principe d'enroulement simple** : Pour les tubes en tungstène de haute précision et de haute finition, il est strictement interdit d'avoir plusieurs tubes en contact sans espacement ;
- **Étiquettes d'identification normalisées** : doivent inclure le nom du matériau, le modèle de spécification, le numéro de lot, la date de production et le code de suivi de la qualité ;
- **Instructions et avertissements relatifs au transport** : L'emballage extérieur doit être étiqueté avec des étiquettes bilingues en chinois et en anglais telles que « Fragile », « Ne pas empiler » et « Résistant à l'humidité » ;
- **Vérification des performances sismiques** : Pour les applications spéciales (telles que les tubes en alliage de tungstène militaires et aéronautiques), il est recommandé d'introduire des tests de transport simulés (tels que les normes ISTA) dans le plan d'emballage.

5. Orientation future du développement de la technologie d'emballage

Avec l'avancement de la logistique internationale intelligente et des tendances vertes et à faible émission de carbone, la conception des emballages de tubes en alliage de tungstène présente également les directions de développement suivantes :

- **Système d'emballage recyclable** : Utiliser des ustensiles d'emballage réutilisables en métal/plastique pour réduire le gaspillage de matériaux jetables ;
- **Matériaux de protection intelligents** : étiquettes de détection de température et d'humidité intégrées et indicateurs d'impact pour surveiller l'environnement d'emballage en temps réel ;
- **numérique complet du processus** : La traçabilité des lots, la gestion des stocks et la synchronisation des informations logistiques sont réalisées grâce à des puces RFID ou des étiquettes QR code.

résumé

L'emballage des tubes en alliage de tungstène est non seulement un moyen de protection physique, mais aussi un maillon essentiel de la chaîne qualité des produits. Du choix des matériaux et de la conception de la structure protectrice au contrôle minutieux de la protection contre l'humidité, les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

vibrations et la contamination, il doit être mis en œuvre tout au long du processus, de la production à la livraison finale. Un système d'emballage standardisé et scientifique peut améliorer efficacement les capacités de livraison internationale des produits, réduire les pertes liées au transport et accroître la satisfaction client. Il témoigne également de l'expertise d'une entreprise en matière de fiabilité des produits et de gestion de la marque.

8.2 Conditions de stockage et exigences anticorrosion et antioxydation pour les tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène sont largement utilisés dans des secteurs haut de gamme tels que l'énergie nucléaire, l'industrie militaire, l'aérospatiale, les soins médicaux et les équipements électroniques. Cependant, sans contrôle environnemental efficace et mesures de protection pendant le stockage, des facteurs externes tels que l'humidité, la température et les gaz corrosifs peuvent facilement entraîner des problèmes de qualité tels que l'oxydation de surface, la corrosion, la contamination et la décoloration, affectant les performances de traitement ultérieures et la durée de vie du produit. Par conséquent, l'élaboration de réglementations de stockage scientifiques et raisonnables et la mise en place d'un environnement de stockage standardisé sont essentielles pour garantir la qualité et la stabilité des tubes en alliage de tungstène.

1. Exigences de base pour l'environnement de stockage des tubes en alliage de tungstène

1. Contrôle de la température :

- La plage de température de stockage recommandée est de **5°C ~ 30° C** .
- Les fluctuations de température fréquentes et drastiques doivent être évitées pour éviter la condensation et l'adhérence de la vapeur d'eau à la surface.

2. Contrôle de l'humidité :

- L'humidité relative doit être contrôlée à **< 60 % HR** , et pour un stockage à long terme, il est recommandé de ne pas dépasser 50 % HR.
- Un environnement à forte humidité peut facilement induire une micro-oxydation des alliages contenant des éléments tels que le nickel et le cuivre, qui se manifeste par un jaunissement et des taches sombres.

3. Exigences environnementales relatives au gaz :

- La zone de stockage doit éviter tout contact **avec des gaz corrosifs tels que le sulfure, le chlore, l'ammoniac, le brouillard acide, etc.**
- Essayez d'éviter de placer des tubes en alliage de tungstène à proximité de zones où sont stockés des acides forts, des alcalis forts, des solvants et d'autres matières premières chimiques.

4. Exigences de propreté :

- Le lieu de stockage doit être maintenu propre, exempt d'huile et de poussière, et les feux d'artifice sont strictement interdits.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Si les conditions le permettent, **un entrepôt propre à température et humidité constantes peut être mis en place** pour le stockage dédié des tubes en alliage de tungstène haut de gamme.

2. Points techniques clés du stockage des tubes en alliage de tungstène

1. Options de stockage verticales et horizontales

- Pour les tubes en alliage de tungstène moyens et longs d'une longueur supérieure à 500 mm :
 - Il est recommandé **de stocker horizontalement**, en utilisant des supports de tuyaux, des rainures en mousse ou des supports pour les séparer afin d'éviter la flexion et la déformation ;
- Pour les tubes courts de haute précision ou les tubes en tungstène de haute finition :
 - **Le stockage peut se faire en tube vertical**. La paroi du tube ne doit pas être en contact direct avec la structure dure et doit être soutenue par une couche de coussin souple.

2. Conteneurs de stockage et matériaux d'isolation

taper	Matériaux recommandés	Caractéristiques
Matériaux d'emballage de doublure	Coton perlé, film polyéthylène, papier sans soufre	Résistant aux rayures, à l'humidité, propre et non corrosif
Tube/rack de stockage	Acier inoxydable, alliage d'aluminium, plastique PVC	Stable, facile à nettoyer, anti-oxydation
Structure de l'étagère	Revêtement antirouille pour bois/acier	Gestion en couches et numérotée, coussinet inférieur en carton résistant à l'humidité pour éviter l'humidité

3. Durée de stockage et entretien des tubes en alliage de tungstène

Période de stockage	Conditions environnementales recommandées	Cycle de vérification de l'état	Précautions
Court terme (< 3 mois)	Température et humidité normales, scellé et sec	Une fois par mois	Veuillez refermer après ouverture
Moyen terme (3 à 12 mois)	Chambre à température et humidité constantes, avec dessiccant	Une fois toutes les deux semaines	Essayez d'utiliser un emballage sous vide
Long terme (> 12 mois)	Entrepôt de mise sous vide et de séchage	Vérifiez le joint chaque semaine	Il est recommandé de retourner et de remplacer périodiquement le dessiccant

4. Précautions de stockage dans des environnements particuliers

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **Bord de mer/ zones humides :**

- Une couche d'emballage doit être ajoutée, de préférence un sac hermétique composite aluminium-plastique.
- Les entrepôts doivent être équipés d'équipements de déshumidification industrielle et entretenus avec une ventilation.

2. **Haute altitude ou régions froides :**

- Faites attention au problème de condensation causé par la différence de température et augmentez lentement la température pour le desceller.

3. **Tubes en alliage de tungstène utilisés dans les salles blanches :**

- La zone de stockage doit répondre au niveau de propreté de classe 1000 ou supérieur ;
- Les matériaux stockés ne doivent pas produire de poussière ni libérer de substances organiques volatiles.

5. Recommandations relatives au système de gestion de l'entreposage et à la traçabilité

- Établir un numéro de produit et un système d'enregistrement entrant et sortant , y compris le numéro de lot de matériaux, la durée de stockage et la destination d'utilisation ;
- inspecter l'apparence et l'état d'oxydation des tubes en alliage de tungstène en stock ;
- Mettre en œuvre le principe de gestion premier entré, premier sorti (FIFO) pour assurer la rotation des stocks.

Résumé : Les tubes en alliage de tungstène

ont un impact non seulement sur leur état de surface et leur intégrité structurelle, mais aussi sur leur adaptabilité aux processus en aval et la fiabilité du produit final . Une gestion scientifique et rationnelle de la température et de l'humidité, des solutions d'emballage résistantes à la corrosion et des systèmes d'entreposage standardisés sont essentiels pour garantir la qualité des tubes en alliage de tungstène. Face à l'essor des applications haut de gamme des alliages de tungstène, la professionnalisation et la standardisation des processus de stockage sont devenues des éléments cruciaux pour la compétitivité globale des entreprises.

8.3 Spécifications de transport international pour les tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène, matériau de structure de précision doté d'une densité élevée, d'un point de fusion élevé, d'une résistance à la corrosion et aux radiations, sont largement utilisés dans des secteurs tels que l'énergie nucléaire, l'armée, l'aérospatiale et la protection médicale, et leur commerce mondial ne cesse de croître. En raison de leur densité et de leur valeur élevées, et du fait que certains types de tubes en alliage de tungstène sont utilisés à des fins militaires ou sensibles, le transport international doit respecter scrupuleusement les réglementations en vigueur dans différents pays et organisations internationales afin de garantir la sécurité, la conformité et l'efficacité des mouvements transfrontaliers de marchandises.

1. Base pour déterminer si les tubes en alliage de tungstène sont des articles contrôlés

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Avant tout transport international, il est nécessaire de déterminer si les tubes en alliage de tungstène transportés sont **des articles à double usage ou des produits militaires sous contrôle**. Cela déterminera directement la complexité du processus de transport. Les principaux critères de jugement sont les suivants :

1. **Composition de l'alliage :**

- Si le tube en alliage de tungstène contient **des métaux stratégiques tels que le molybdène, le nickel, le cobalt, le rhénium, etc. dans une proportion spécifique** et possède des propriétés physiques particulières (telles que la résistance aux radiations ou une densité ultra-élevée), il peut être classé comme restreint ;

2. **Déclaration d'utilisation :**

- Les tubes en alliage de tungstène utilisés dans l'industrie nucléaire, les systèmes d'armes ou les composants de protection des satellites doivent généralement être déclarés comme matériaux sensibles ;

3. **Réglementations pertinentes :**

- Il s'agit de réglementations telles que l'Arrangement de Wassenaar, le Règlement sur le contrôle des exportations de biens et technologies à double usage de la Chine, le Règlement sur l'administration des exportations des États-Unis (EAR) et le Règlement sur les biens à double usage de l'UE.

Si les marchandises sont identifiées comme des marchandises sensibles, l'exportateur doit généralement demander **une licence d'exportation ou fournir un certificat d'utilisateur final à l'avance**.

II. Principaux modes de transport et exigences de dédouanement

1. Choisissez le mode de transport

Les tubes en alliage de tungstène sont généralement expédiés des manières suivantes en fonction du poids, du degré de précision, du délai d'expédition et de la destination :

Mode de transport	Situations applicables	Caractéristiques
Fret maritime	Exportations à volume élevé et sensibles aux coûts	Faible fret, cycle long, besoin de renforcer la résistance à l'humidité
transport aérien	Commande urgente, à forte valeur ajoutée, en petite série	Transport rapide, exigences de dédouanement élevées et emballage plus strict
Transport terrestre (transfrontalier)	Asie/Pays voisins	Le dédouanement est pratique, mais vous devez faire attention aux politiques d'inspection aux frontières

2. Documents de dédouanement à l'importation et à l'exportation

- **Facture commerciale**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Liste de colisage**
- **Connaissance** / Lettre de transport aérien
- **Certificat d'origine (CO)**
- **Certificat de matériel (MTC)/Manuel du produit**
- **Licence d'importation et d'exportation ou approbation de double usage (le cas échéant)**

Remarque spéciale : si des tubes en alliage de tungstène sont utilisés dans les domaines militaire, nucléaire, aéronautique et autres, les douanes du pays de destination peuvent exiger des descriptions détaillées des paramètres techniques et des déclarations de l'utilisateur final.

3. Normes internationales pour l'emballage et le transport des tubes en alliage de tungstène

Pour garantir que le tube en alliage de tungstène ne se déforme pas, ne s'oxyde pas ou ne soit pas endommagé pendant le transport longue distance, son emballage doit être conforme aux pratiques et normes internationales de transport de marchandises :

1. Principes de conception de l'emballage

- **Résistance à la compression et aux chocs** : Utiliser des caisses en bois, des fûts métalliques ou des cartons alvéolés contenant des matériaux de rembourrage tels que l'EPE, la mousse, etc.
- **Résistant à l'humidité et anti- oxydation** : emballage sous vide ou ajout de dessiccant, avec film imperméable recouvrant la couche extérieure ;
- **Étiquetage clair** : clairement marqué avec « Tubes en alliage de tungstène », numéro de pièce, poids, taille, fournisseur, destination, précautions, etc.
- **Étiquette de conformité** : S'il s'agit d'un usage militaire, une étiquette de transport de fret à double usage doit être apposée .

2. Normes internationales pertinentes

- **Recommandations de l'ONU sur le transport des marchandises dangereuses**
- **Règlement de l'IATA sur les marchandises dangereuses (comme le transport aérien)**
- **NIMP 15 (Norme de fumigation des caisses en bois pour l'exportation)**
- **Spécifications de test d'emballage ASTM B777 ou GB/T 4169** (pour les produits en alliage de tungstène)

IV. Points clés pour la prévention et la maîtrise des risques pendant le transport

Type de risque	Contre-mesures
Déformation par collision/écrasement	Adopter une structure de séparation renforcée de type support/manchon structurel
Corrosion dans les environnements humides	Emballage sous vide + déshydratant + carte indicatrice d'étanchéité à l'humidité
Retenue douanière des marchandises	Demander à l'avance une licence d'exportation et un dépôt de données techniques
Inclus dans la liste sensible	Déclarez avec précision le nom/l'objectif/l'utilisateur final du produit pour éviter les risques de sanctions

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Retards de livraison	Sélectionnez une entreprise de logistique stable et fournissez des services complets de suivi et de dédouanement
----------------------	--

V. Cas réglementaires typiques dans le pays de destination

- **Chine continentale** : les produits en tungstène doivent être approuvés par le ministère du Commerce avant l'exportation et doivent être inclus dans le « Catalogue des licences d'exportation d'articles et de technologies à double usage ».
- **États-Unis** : les contrôles des séries EAR 99 ou 600 peuvent s'appliquer, et la nécessité d'une licence d'exportation dépend des propriétés et de l'utilisation prévue de l'alliage.
- **Pays de l'UE** : doivent se conformer au règlement de l'UE sur les biens à double usage et aux exigences d'enregistrement REACH.
- **Inde, Russie, Moyen-Orient et autres régions** : Certains pays exigent la fourniture d'instructions de terminal pour les matériaux d'alliage spéciaux et renforcent les contrôles de sécurité lors de l'étape de déclaration en douane.

résumé

Les tubes en alliage de tungstène impliquent de multiples facteurs de conformité, notamment les matériaux métalliques, les matériaux stratégiques et les produits à double usage. Les entreprises organisant des transports transfrontaliers doivent être très attentives aux politiques du pays de destination et mettre en place des procédures de conformité complètes. Il est conseillé aux entreprises de s'associer à **des transitaires/courtiers en douane expérimentés dans le commerce international des métaux** et de tenir des registres complets d'emballage, de déclarations, de licences et de traçabilité afin de garantir la sécurité, l'efficacité et la conformité des tubes en alliage de tungstène pendant le transport international.

8.4 Supervision douanière et demande de licence pour l'exportation de tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène, matériau de structure métallique haute performance, sont largement utilisés dans des secteurs manufacturiers haut de gamme tels que l'énergie nucléaire, l'industrie militaire, l'aérospatiale, les soins médicaux et l'électronique. Certains produits possèdent également des propriétés stratégiques. Par conséquent, lors de l'exportation de tubes en alliage de tungstène, les entreprises doivent se conformer strictement à la réglementation douanière et aux systèmes de contrôle des exportations en vigueur dans leur pays d'implantation, et demander les licences d'exportation et les documents de dédouanement appropriés en fonction des caractéristiques du produit. Les procédures d'exportation sont particulièrement strictes lorsque les tubes en alliage de tungstène sont destinés à des applications sensibles ou à double usage.

1. Code douanier des marchandises et attributs réglementaires des tubes en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lors de la déclaration d'exportation, les tubes en alliage de tungstène doivent être correctement classés selon le code douanier des marchandises (code SH). Les classifications courantes pour les exportations depuis la Chine continentale sont :

- **8101.99.10** (Autres tungstène et ses produits)
- **8101.99.90** (Autres produits en tungstène, y compris les alliages)

L'attribution d'un code spécifique est déterminée en fonction de la **composition de l'alliage du produit, de son état de transformation (poudre, tube, barre) et de son application**. Une classification précise permet d'éviter les retours de commandes, les retenues douanières et les notifications illégales.

Les tubes en alliage de tungstène sont souvent répertoriés dans les attributs réglementaires suivants :

- **technologies à double usage** : si applicable aux industries militaires ou nucléaires ;
- **Liste des matériaux stratégiques** : Contient des tubes spécifiques en alliage de tungstène haute densité ;
- **Catalogue de gestion des licences d'exportation** : produits métalliques à hautes performances soumis à des restrictions nationales d'exportation.

2. Principaux types de licences d'exportation de tubes en alliage de tungstène

Selon les politiques du pays exportateur (comme la Chine), les entreprises peuvent avoir besoin de demander les types de licences suivants avant d'exporter des tubes en alliage de tungstène :

Nom de la licence	Scénarios applicables	autorités compétentes
Licences d'exportation pour les biens et technologies à double usage	Impliquant des applications à double usage, sensibles et des alliages de tungstène à haute densité	Bureau des articles à double usage du ministère du Commerce
Licence générale d'exportation	Tubes en alliage de tungstène non sensibles, grandes quantités ou destinations spéciales	Département du Commerce ou Bureau local de promotion du commerce
Notification et dépôt d'exportation de produits militaires	Boîtiers en alliage de tungstène militaire, plaques de protection, douilles d'obus, etc.	Administration d'État de la science, de la technologie et de l'industrie pour la défense nationale
Certificat d'utilisateur final	Documents justificatifs obligatoires pour l'exportation vers certaines régions	Fourni par des clients des affaires étrangères ou de l'armée

3. Processus de déclaration d'exportation de tubes en alliage de tungstène

1. **Confirmation des attributs du produit** : déterminer si le tube en alliage de tungstène est un matériau à double usage ou stratégique ;
2. **Dépôt/ enregistrement anticipé** :
 - Déposer une demande d'enregistrement de produit d'exportation auprès du service commercial compétent ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les entreprises exportatrices doivent disposer de droits et de qualifications d'importation et d'exportation pour exporter des articles à double usage ;
- 3. **Demande de licence :**
 - Soumettre le formulaire de demande de licence d'exportation ;
 - Ci-joint : spécifications techniques, rapport d'analyse des composants, contrat client, instructions pour l'utilisateur final, etc.
- 4. **Examen et approbation :**
 - Le processus d'approbation prend généralement 7 à 15 jours ouvrables, mais peut prendre jusqu'à 30 jours pour certains produits.
- 5. **Acquisition de licence et déclaration d'exportation :**
 - Ce n'est qu'après avoir obtenu l'autorisation que vous pouvez soumettre les données de déclaration douanière formelle au système électronique portuaire chinois ;
 - Joignez le numéro de licence et les documents papier pour votre référence.

IV. Exigences relatives aux utilisateurs finaux et aux applications des tubes en alliage de tungstène

Afin d'éviter que les tubes en alliage de tungstène ne s'écoulent vers des canaux informels ou ne soient détournés vers des projets militaires sensibles, l'exportateur doit s'assurer que le client et l'utilisation finale sont conformes :

- **Questionnaire utilisateur final :** nom du client, adresse et certificat de qualification ;
- **Description d'utilisation :** par exemple « pour structure de protection d'accélérateur médical », « pour équipement expérimental de recherche scientifique », etc.
- **Garantie de non-réexportation :** Signature d'une lettre d'engagement de ne pas revendre ou détourner à des fins militaires ;
- **Commandes impliquant les États-Unis/ l'UE :** les réglementations locales de contrôle des réexportations (telles que les réglementations de réexportation EAR) doivent être respectées.

V. Exigences réglementaires particulières dans les pays ou régions clés

Pays/Région	Points réglementaires particuliers
USA	Impliquant les réglementations EAR et ITAR, certains alliages de tungstène nécessitent l'approbation du BIS
Union européenne	Règlement d'harmonisation du Conseil de l'UE sur les biens à double usage
Inde/Moyen-Orient	Pour les destinations d'exportation à haut risque, il est nécessaire de se concentrer sur l'utilisateur final et le flux de défense militaire.
Russie/Ukraine	Les régions qui peuvent être actuellement sanctionnées nécessitent une évaluation complète des risques et une déclaration de conformité

VI. Risques et responsabilités juridiques des exportations illégales

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Si le processus d'exportation de tubes en alliage de tungstène implique de dissimuler l'objectif, de fausser le code du produit ou d'exporter sans autorisation, l'entreprise peut être confrontée aux risques suivants :

- **Sanctions administratives** : amendes, suspension des autorisations d'importation et d'exportation ;
- **Responsabilité pénale** : soupçonné d'opérations commerciales illégales, de contrebande ou de mise en danger de la sécurité nationale ;
- **Risques de sanctions internationales** : inscription sur la liste des entités étrangères, gel des fonds des clients ou interruption d'activité ;
- **Perte de crédibilité** : affecte les relations de coopération avec les gouvernements, les douanes et les clients multinationaux.

VII. Recommandations de conformité

1. **Établir un mécanisme de classification et d'identification des articles d'exportation** et identifier les propriétés de tous les produits tubulaires en alliage de tungstène ;
2. **Déployer un personnel professionnel en matière de déclaration douanière et de conformité commerciale** qui connaît les procédures opérationnelles de licence et de déclaration d'exportation ;
3. **Renforcer la gestion de la diligence raisonnable des clients étrangers** pour garantir une utilisation appropriée et un flux de fonds clair ;
4. **la vérification après exportation** , et conserver des registres de vente complets et des archives de documents ;
5. **Soyez attentif aux situations internationales et aux changements de politique** , et élaborer des plans de réponse à l'avance (comme le stockage à l'avance et le changement des canaux de transport).

résumé

Les tubes en alliage de tungstène sont soumis à de multiples réglementations lors de leurs exportations internationales. Les entreprises doivent identifier précisément les caractéristiques de leurs produits, demander les licences d'exportation nécessaires conformément à la réglementation et effectuer les procédures de déclaration douanière conformément à la loi. Dans un contexte commercial international de plus en plus complexe, les fabricants et exportateurs de tubes en alliage de tungstène doivent renforcer leur gestion de la conformité, prévenir et maîtriser les risques et favoriser une expansion constante du marché mondial.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 9 Structure industrielle et tendance du marché des tubes en alliage de tungstène

9.1 Aperçu des ressources mondiales en tungstène et analyse de la chaîne industrielle des tubes en alliage de tungstène

Représentants clés des matériaux métalliques haute performance et haute densité, les tubes en alliage de tungstène sont largement utilisés dans des secteurs clés tels que l'énergie nucléaire, l'industrie militaire, l'aérospatiale, les soins médicaux et la fabrication d'équipements haut de gamme. Leur production repose sur le tungstène, une ressource rare et stratégique. Le paysage concurrentiel et le potentiel de développement de l'industrie des tubes en alliage de tungstène dépendent directement des réserves mondiales, de la distribution minière, des capacités de traitement et du développement coordonné de la chaîne industrielle en aval.

1. Répartition et réserves mondiales des ressources en tungstène

Le tungstène est un métal rare, extrêmement rare dans la croûte terrestre. Ses ressources sont principalement concentrées dans quelques pays. À l'heure actuelle, les réserves mondiales de tungstène sont estimées à plus de **3,5 millions de tonnes**, dont les réserves et les capacités de production sont principalement concentrées dans les pays suivants :

Pays/Région	Part des réserves	Principales zones minières/caractéristiques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chine	>50%	Dayu dans le Jiangxi, Yaogangxian dans le Hunan, Baiyin dans le Gansu, etc., sont riches en ressources et disposent de chaînes industrielles complètes.
Russie	6 à 8 %	Les régions de la Sibérie orientale et de l'Oural occidental sont riches en ressources minérales symbiotiques tungstène-molybdène.
Vietnam	5 à 6 %	de Nui Phao est riche en minerais polymétalliques de tungstène, de fluorite, de molybdène et de bismuth.
Canada	4 à 5 %	Principalement du minerai de sable de tungstène, avec un grand potentiel de ressources mais un coût d'extraction élevé
Bolivie, Royaume-Uni, Portugal, etc.	Petite quantité	Il existe de nombreux gisements de petite et moyenne taille présentant un potentiel de développement régional

Parmi eux, la Chine est non seulement le plus grand **propriétaire mondial de ressources en tungstène**, mais aussi le plus grand producteur et exportateur. Son développement des ressources, son traitement et sa purification des minéraux, ainsi que ses technologies de traitement en profondeur du tungstène sont parmi les plus performantes au monde.

2. Chaîne d'approvisionnement en matières premières des tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène contiennent principalement **de la poudre de tungstène de haute pureté**, des éléments d'alliage (tels que Ni, Fe, Cu) et une certaine proportion de liant métallique. La chaîne d'approvisionnement en matières premières comprend principalement les maillons suivants :

1. **Extraction et traitement du minerai de tungstène** : La wolframite (FeWO_4) et la scheelite (CaWO_4) sont obtenues par flottation ou séparation par gravité pour obtenir un concentré ;
2. **composés de tungstène** : conversion du concentré en APT (paratungstate d'ammonium) et en acide tungstique (H_2WO_4) ;
3. **Fabrication de poudre de réduction** : APT obtient de la poudre de tungstène (W) par réduction à l'hydrogène ;
4. **Rapport d'alliage** : ajoutez de la poudre de Ni, Fe ou Cu pour préparer la poudre d'alliage ;
5. **Préparation de tubes par métallurgie des poudres** : pressage, frittage et usinage.

Chaque maillon de la chaîne d'approvisionnement a un impact important sur les performances du produit, en particulier la taille des particules, la pureté et la morphologie des particules de poudre de tungstène, qui sont des facteurs clés affectant les performances des tubes en alliage de tungstène.

3. Schéma de la chaîne industrielle mondiale des tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène peuvent être divisés en trois maillons principaux : **les ressources en amont et les matières premières de base, la technologie de formage et de traitement en milieu de chaîne et l'intégration du système d'application en aval** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) En amont : Extraction de ressources en tungstène et fabrication de poudre

- Sociétés représentatives : China Tungsten Online, CTIA GROUP, etc.
- Caractéristiques : Ressources concentrées, politiques minières restreintes et tendance oligopolistique.

(2) Midstream : Préparation de matériaux en alliage de tungstène et traitement de tubes

- Sociétés représentatives : CTIA GROUP, Kennametal (États-Unis), Plansee (Autriche), Mitsubishi Materials (Japon) ;
- Technologies de base : pressage isostatique, frittage de précision, traitement des trous intérieurs et traitement de surface.

(3) En aval : entreprises militaires, aéronautiques, médicales et de fabrication haut de gamme

- Les domaines d'application sont en constante expansion, comme par exemple les boîtiers d'accélérateurs de particules à haute énergie, les tubes de guidage de contreponds inertiels, les boîtiers de radioprotection, etc.
- Les clients se concentrent principalement sur la personnalisation et la certification et ont des exigences extrêmement élevées en matière de cohérence des produits.

4. Statut du marché mondial et orientation de l'industrie des tubes en alliage de tungstène

À l'heure actuelle, le marché mondial des tubes en alliage de tungstène présente les caractéristiques suivantes :

1. **En raison des barrières techniques élevées et des longs cycles de certification** , les clients des domaines militaire et aérospatial adoptent généralement un « système d'entrée de gamme » ;
2. **La capacité de production est concentrée dans quelques entreprises de haute technologie** , telles que China Tungsten Manufacturing et l'allemand Plansee ;
3. **La plupart des pays européens et américains s'appuient sur de la poudre de tungstène importée ou des tubes en alliage de tungstène semi-finis pour un traitement ultérieur ;**
4. **La région Asie-Pacifique est devenue une base majeure de transformation, de fabrication et d'exportation** , en particulier la Chine, où les tubes en alliage de tungstène haute densité représentent plus de 70 % des exportations mondiales totales.

5. Contraintes et défis de l'industrie des tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène sont également confrontés à une série de défis :

- **Renforcement des contrôles sur les exportations de ressources** : Par exemple, la Chine a mis en place des quotas d'exportation sur l'APT et la poudre de tungstène ;
- **Réglementations environnementales et augmentation des coûts de l'énergie** : Le processus de frittage est très énergivore, ce qui impose de nouvelles exigences en matière de contrôle des émissions de carbone ;
- **Restrictions sur le transfert de technologie** : La technologie liée aux tubes en tungstène militaires/nucléaires est toujours soumise à des contrôles à l'exportation ;
- **Risque de stabilité de la chaîne d'approvisionnement** : En particulier lorsque la situation internationale est turbulente, l'offre et la demande de ressources en tungstène sont sujettes à des fluctuations.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

VI. Tendances du développement collaboratif industriel et de l'intégration verticale

Face à la demande croissante de tubes en alliage de tungstène, les grandes entreprises développent progressivement des stratégies d'intégration verticale, reliant l'ensemble du processus, des ressources minérales aux composants haut de gamme, afin d'améliorer la stabilité des produits, de réduire les coûts et de mieux contrôler les clients finaux. Des entreprises comme CTIA GROUP et Xiamen Tungsten New Energy intègrent déjà ressources, matériaux, dispositifs et systèmes, propulsant ainsi la transformation des tubes en alliage de tungstène, passant du statut de « produits » à celui de « fournisseurs de solutions de composants fonctionnels ».

résumé

Les ressources mondiales en tungstène sont très concentrées, la Chine en particulier bénéficiant d'avantages systémiques en termes de ressources, de technologie, de transformation et d'exportations. En tant qu'élément clé des applications haut de gamme, la filière des tubes en alliage de tungstène évolue vers une division mondiale du travail et une collaboration régionale. À l'avenir, la position d'une entreprise dans le secteur des tubes en alliage de tungstène sera déterminée par ses capacités globales en matière de sécurité des ressources, de percées technologiques et d'expansion du marché. La section suivante analysera plus en détail la taille du marché, les tendances de croissance et le paysage concurrentiel des principaux acteurs.

9.2 Prévisions de la capacité du marché et de la tendance de croissance de la demande pour les tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène, un matériau de structure métallique de précision à haute densité, haute résistance, hautes températures et résistance aux radiations, connaissent une croissance constante dans les secteurs de la défense, de l'énergie nucléaire, de l'aérospatiale, du médical, de l'électronique, des moules industriels et bien d'autres. Les exigences du marché en matière d'indicateurs de performance et de diversification des produits augmentent également d'année en année. Dans un contexte de modernisation des technologies de fabrication mondiales et de forte demande de matériaux fonctionnels hautes performances, l'industrie des tubes en alliage de tungstène connaît une période de croissance structurelle exceptionnelle.

1. État actuel de la capacité du marché mondial des tubes en alliage de tungstène

Selon de nombreuses données de recherche et informations divulguées par les entreprises de la chaîne industrielle, le marché mondial des tubes en alliage de tungstène devrait atteindre une valeur de production annuelle d'environ **1,2 à 1,5 milliard de dollars américains d'ici 2025**, les tubes haut de gamme destinés aux industries militaire et nucléaire représentant plus de 40 %. En tant que premier détenteur mondial de ressources en tungstène, la Chine produit **plus de 65 %** de la production mondiale, ce qui lui confère un avantage concurrentiel sur les marchés d'entrée de gamme et de milieu et haut de gamme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zone	Échelle de demande annuelle (estimée)	Fonctionnalités de l'application
Chine continentale	600 à 800 millions de dollars	Industrie militaire, énergie nucléaire, aviation, soins médicaux, fabrication de précision
Amérique du Nord	200 à 300 millions de dollars	Principalement l'énergie nucléaire et l'industrie militaire, avec une forte dépendance aux importations
Europe	150 à 200 millions de dollars	Matériaux médicaux et de protection, industrie aérospatiale
Autres pays d'Asie-Pacifique	100 millions de dollars et plus	La Corée du Sud et le Japon ont une utilisation importante des semi-conducteurs et des structures optiques.
Moyen-Orient/Afrique/Amérique du Sud	< 0,5 milliard de dollars	Phase initiale de l'application locale

2. Les principales applications en aval des tubes en alliage de tungstène stimulent la croissance

1. La modernisation des équipements de défense

, notamment les projectiles perforants, les tubes de guidage inertiel et les structures de protection, renforce l'importance stratégique des tubes en alliage de tungstène haute densité dans l'industrie militaire. Ce secteur devrait connaître une croissance **annuelle moyenne de plus de 8 %** entre 2025 et 2030.

2. Les tubes en alliage de tungstène constituent une excellente alternative aux tubes en plomb et en molybdène pour le développement des systèmes d'énergie nucléaire et de radioprotection, grâce à leur résistance supérieure aux neutrons et aux rayons gamma

. Avec le redémarrage mondial de l'énergie nucléaire et la commercialisation de petits réacteurs, la demande devrait continuer de croître.

3. croissante

de pièces structurelles hautes performances dans la chaîne de l'industrie aérospatiale, telles que les tubes de guidage haute température, les composants de transmission inertielle et les kits de contrôle de vol, pousse le développement de tubes en alliage de tungstène vers la légèreté et la fonctionnalisation.

4. La demande en équipements de radiothérapie médicale est en pleine expansion. Les équipements de protection médicale, les collimateurs gamma et les accélérateurs de faisceaux d'électrons, entre autres, exigent des tubes en tungstène de très haute précision et de pureté, et le marché haut de gamme présente un potentiel considérable.

5. Des équipements haut de gamme et des systèmes de contrôle thermique électronique se développent

dans les domaines de la dissipation thermique des communications, du refroidissement laser, de l'emballage des puces, etc. Les tubes en alliage de tungstène ont de bonnes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

propriétés de conductivité thermique et de blindage et entrent progressivement dans les applications de gestion thermique grand public et industrielles.

3. Prévisions de croissance annuelle du marché des tubes en alliage de tungstène (2025-2030)

Enquêtes sectorielles complètes, Modèle international de développement des matériaux (IMDF) et estimations de planification des grandes entreprises :

années	Taille du marché mondial (milliards de dollars américains)	Taux de croissance annuel moyen (TCAC)
2025	12–15	Année de base
2026	13,5–17	10 à 12 %
2027	15–19	11–13 %
2028	17–22	12–14 %
2030	20–26	12 à 15 % (croissance composée)

Parmi eux, les domaines de la médecine et de l'énergie nucléaire seront les deux sous-secteurs qui connaîtront la croissance la plus rapide à l'avenir, suivis par les contrepoids aérospatiaux et les applications de conductivité thermique des équipements électroniques.

4. Facteurs clés affectant l'expansion du marché

Facteurs d'influence	Effet positif	Contraintes potentielles
Progrès technologique	Contrôle de la taille amélioré et densité améliorée	Des exigences élevées en matière d'équipement et de talent
Soutien politique	Les industries de la défense et du nucléaire stimulent la libération de la demande	Les exportations sont affectées par des facteurs politiques internationaux
Collaboration industrielle	Connecter l'amont et l'aval contribuera à accroître le développement	Coût d'investissement initial élevé et cycle de certification long
Garantie des ressources	La Chine détient la position dominante en matière de ressources	Les fluctuations du prix du tungstène affectent les coûts des produits

5. Conclusion et analyse des tendances

En résumé, le marché des tubes en alliage de tungstène est actuellement porté par les avancées technologiques et le développement d'applications haut de gamme. Porté notamment par la neutralité carbone, la modernisation militaire, la miniaturisation des équipements nucléaires et la croissance mondiale des équipements d'imagerie médicale, il devrait maintenir **une croissance annuelle moyenne à deux chiffres au cours des cinq prochaines années**, évoluant progressivement vers une fabrication intelligente et une intégration fonctionnelle. Les entreprises maîtrisant les technologies de formage de haute précision et les capacités de certification client haut de gamme se démarqueront dans ce cycle d'expansion du secteur.

9.3 Introduction au tube en alliage de tungstène CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP, acteur majeur du secteur des nouveaux matériaux en Chine, est une entreprise de fabrication de pointe spécialisée dans la recherche, le développement, la production et la commercialisation de matériaux à base de tungstène hautes performances et de leurs produits transformés. L'entreprise possède des capacités clés en termes de compétitivité et d'industrialisation, notamment dans le domaine des tubes en alliage de tungstène. Tirant parti des abondantes ressources chinoises en tungstène et de sa solide base en métallurgie des poudres, l'entreprise intègre les ressources en tungstène en amont et en aval pour créer une chaîne d'approvisionnement complète, de la préparation des matières premières à la conception des alliages, en passant par le formage de précision et les applications finales. L'entreprise se consacre à la fabrication d'équipements haut de gamme, à la protection nucléaire, à la radioprotection médicale, aux composants inertiels militaires, aux contreponds aérospatiaux et aux composants structurels haute température.

1. Caractéristiques du tube en alliage de tungstène CTIA GROUP

Les tubes en alliage de tungstène du groupe CTIA utilisent une technologie avancée de métallurgie des poudres associée à des procédés de pressage, de pressage isostatique, de frittage de précision et de traitement thermique. Ils offrent des performances stables, une gamme complète de produits et les avantages significatifs suivants :

- **Contrôle de haute densité et de précision dimensionnelle** : la densité peut atteindre 18,8–19,2 g/cm³, avec une épaisseur de paroi uniforme et un excellent contrôle de coaxialité interne et externe , répondant aux exigences d'assemblage d'accessoires de haute précision.
- **propriétés mécaniques et thermophysiques** : Le produit a une bonne résistance, une bonne ténacité, une bonne conductivité thermique et une bonne stabilité à haute température, et peut servir pendant longtemps dans des conditions extrêmes telles qu'un flux de chaleur élevé et un fort rayonnement.
- **Forte personnalisation** : CTIA GROUP prend en charge le traitement personnalisé de différents systèmes d'alliages (tels que W-Ni-Fe, W-Ni-Cu), diverses spécifications et tailles (diamètre extérieur allant de 3 mm à 200 mm) et des tubes en alliage de tungstène à usage spécial (pièces inertielles creuses, tubes de guidage de flux à micro-parois, etc.) selon les besoins du client.
- **Traitement de surface interne et externe mature** : polissage, traitement électrolytique, placage chimique ou revêtement PVD sont utilisés pour améliorer considérablement la qualité de surface, la résistance à la corrosion et la résistance aux radiations.

2. Produits représentatifs de la série de tubes en alliage de tungstène

Modèle de série	Système d'alliage	Plage de diamètre extérieur	Instructions d'application
ZW-TG90	W-Ni-Fe	Φ6–Φ100 mm	Contrepoids inertiel perforant pour l'armée
ZW-TG95	W-Ni-Cu	Φ3–Φ60 mm	Protection médicale, structure de l'énergie nucléaire

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ZW-HHT	Alliage haute température	Φ10–Φ200 mm	Tuyaux à haute température, conduits de champ thermique
ZW-MP	Microtube de précision	Φ3–Φ20 mm, épaisseur de paroi < 0,5 mm	Caloduc électronique, collimation optique

3. Cas d'application et configuration du marché

- 1. Domaine de l'énergie nucléaire :** Le boîtier en alliage de tungstène haute densité proposé par CTIA GROUP est largement utilisé dans divers types de composants de protection neutronique et de tubes de renforcement structurel. Ses performances répondent aux exigences de CNNC et des fournisseurs internationaux d'équipements nucléaires.
- 2. Radiothérapie médicale :** Fournit des composants de tubes en alliage de tungstène avec un contrôle précis du diamètre intérieur et une efficacité d'absorption de rayonnement élevée pour les systèmes de positionnement de radiothérapie et les dispositifs de mise en forme de faisceau.
- 3. Composants et buses inertiels aérospatiaux :** Les produits ont été équipés de divers systèmes de contrôle de vol de navigation inertielle de haute précision et ont participé à de nombreuses missions aérospatiales nationales majeures, répondant aux besoins de conditions de travail à forte charge et à haute intensité.
- 4. Exportation : Les tubes en alliage de tungstène du groupe CTIA sont exportés vers l'Europe , l'Amérique, le Japon, la Corée du Sud, l'Asie du Sud-Est et d'autres pays et régions.** Certains produits sont conformes aux normes de certification qualité ASTM B777 et ISO 9001/AS9100.

4. R&D technologique et capacité de production

- **Système de R&D :** Il a établi un « Centre de recherche sur la technologie d'ingénierie des tubes en alliage à base de tungstène » et a construit des laboratoires communs avec des universités telles que l'Université du Centre-Sud et l'Université du Hunan, et continue de faire des efforts dans la conception des alliages, la technologie de densification, le formage par soudage et d'autres directions.
- **Capacités de l'équipement :** Équipée de plusieurs ensembles d'équipements de pressage isostatique haute puissance , de systèmes de mélange de poudre intelligents, de fours de frittage sous vide, de rectifieuses internes et externes CNC et de systèmes de mesure et de contrôle de précision laser, l'entreprise peut atteindre une production annuelle de près de 100 tonnes de tubes en alliage de tungstène.
- **Transformation de la fabrication intelligente :** CTIA GROUP a déployé un système MES numérique et une plateforme de traçabilité qualité pour promouvoir la gestion intelligente, standardisée et traçable de la fabrication de tubes en alliage de tungstène.

V. Orientation future du développement

CTIA GROUP élargit continuellement l'applicabilité des tubes en alliage de tungstène dans les scénarios d'application émergents, avec des domaines clés comprenant :

- Pièces structurelles de tubes en tungstène pour petits réacteurs modulaires

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- unité de refroidissement à tube de tungstène à conductivité pour serveurs 5G et IA
- Manchon en alliage de tungstène à structure balistique spéciale et à fort impact
- conduit poreux en alliage de tungstène pour blindage électromagnétique à haute résistance

Parallèlement, l'entreprise s'engage également dans la recherche, le développement et la promotion de procédés de fabrication écologiques pour les alliages de tungstène (frittage sans ammoniac, recuit vert, etc.) et dans la promotion de la mise à niveau des produits de tuyauterie à base de tungstène vers « une faible carbonisation, une fiabilité et une fonctionnalité élevées ».

Résumé : CTIA GROUP a mis en place un système complet en boucle fermée dans le domaine des tubes en alliage de tungstène, de la recherche et développement de matériaux à la fabrication de produits, en passant par les services personnalisés. À l'avenir, il poursuivra sa mission de « fabrication intelligente d'alliages de tungstène haute performance et fourniture d'équipements haut de gamme au pays », de promouvoir les tubes en alliage de tungstène pour des applications à forte valeur ajoutée dans de nombreux domaines et de consolider sa position de leader mondial dans la fabrication de précision d'alliages de tungstène.

9.4 Fluctuation des prix des matières premières des tubes en alliage de tungstène et impact sur la structure des coûts

Exemple représentatif de matériaux hautes performances à base de tungstène, le coût de fabrication des tubes en alliage de tungstène est influencé par divers facteurs, les fluctuations du prix des matières premières étant particulièrement critiques. En raison de la nature stratégique et de la rareté du tungstène, et du fait que les tubes en alliage de tungstène sont généralement fabriqués à partir de poudre de tungstène de haute pureté et de liants métalliques tels que le nickel, le fer et le cuivre, leur structure de coûts est extrêmement sensible aux conditions du marché des matières premières. Les fluctuations du prix des matières premières déterminent non seulement directement le prix de vente et la marge bénéficiaire des tubes en alliage de tungstène, mais ont également, dans une certaine mesure, un impact sur la compétitivité internationale du produit et la stabilité opérationnelle de l'entreprise.

1. Caractéristiques des fluctuations du prix de la matière première du tungstène

1. La rareté des ressources entraîne une hausse des prix.

Le tungstène est considéré comme une ressource minérale essentielle dans de nombreux pays, ses réserves prouvées étant principalement concentrées en Chine, en Russie, au Canada et au Vietnam. La Chine détient un monopole, représentant plus de 65 % des réserves et de la production mondiales. Par conséquent, les contrôles de l'offre nationale et internationale de concentré de tungstène, les changements de politique environnementale et la gestion des quotas d'exportation ont tous un impact significatif sur les prix du tungstène.

2. cycliques

, comme la flambée des prix du concentré de tungstène en 2011, due à la réglementation de l'industrie des terres rares et aux restrictions de production, ont également eu lieu. De 2020 à 2023, les prix du tungstène ont connu des hausses irrationnelles répétées en raison de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pandémie, des crises énergétiques et des tensions commerciales internationales. De plus, les fortes hausses à court terme de la demande de certaines industries en aval (comme la défense et le nucléaire) peuvent également entraîner des pénuries d'approvisionnement et des anomalies de prix périodiques.

3. Compte tenu de l'important effet de liaison des prix des métaux,

les fluctuations des prix des liants couramment utilisés dans les tubes en alliage de tungstène, tels que le nickel, le cuivre et le fer, auront également un impact cumulatif sur la structure globale des coûts. Les prix du nickel sont souvent influencés par les fluctuations de l'industrie de l'acier inoxydable et des nouveaux matériaux pour batteries énergétiques, tandis que le cuivre est étroitement lié aux investissements mondiaux en infrastructures. Bien que la marge de fluctuation de la poudre de fer soit relativement faible, elle ne peut être ignorée dans les rapports de mélange à grande échelle.

2. Structure des coûts des tubes en alliage de tungstène

Selon le processus de production et l'analyse de la consommation de matières premières des tubes en alliage de tungstène typiques, sa structure de coût peut être grossièrement divisée en les parties suivantes :

Éléments de coût	Plage de proportions	illustrer
Coût de la matière première de la poudre de tungstène	40%–55%	Cela dépend de la teneur en tungstène de l'alliage (généralement 85 à 97 %) et du prix du marché au moment de l'achat
Métal de liaison (Ni/Cu/Fe)	10%–20%	Les tubes en alliage à haute teneur en nickel (comme l'alliage W-Ni à haute densité) représentent une part importante
Coûts de traitement et de fabrication	15%–25%	Y compris le moulage/pressage isostatique, le frittage, le traitement thermique et la finition
Coûts de l'énergie et des matières auxiliaires	5%–10%	Principalement le frittage sous vide, la consommation d'énergie et le gaz de refroidissement, etc.
Coûts de gestion, de logistique et de main d'œuvre	5%–10%	Lié à la taille de l'entreprise et au degré d'automatisation

On constate que le prix des matières premières, notamment de la poudre de tungstène, est le facteur déterminant. Une augmentation de 30 % du prix de la poudre de tungstène entraînera une hausse du coût de fabrication global d'environ 15 à 20 %.

3. Cas typiques de l'impact des fluctuations des prix des matières premières sur les coûts

Par exemple, entre le quatrième trimestre 2022 et la mi-2023, le prix de la poudre de tungstène est passé de 260 yuans/kg à 300 yuans/kg, soit une hausse d'environ 15,4 %. Prenons l'exemple des tubes en alliage de tungstène contenant 95 % de tungstène : pour un volume d'achat de 100 tonnes de matière première, cette fluctuation entraînera une augmentation du coût par tonne d'alliage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Augmentation = $(300-260) \times 95 \% = 38 \text{ yuans/kg} \times 1\,000 \text{ kg} = 38\,000 \text{ yuans/tonne}$**
- **Variation en pourcentage = Les coûts des matières premières ont augmenté d'environ 14 à 18 %, et les coûts de fabrication globaux ont augmenté d'environ 10 %**

De telles fluctuations ont un impact significatif sur les bénéfices des commandes, en particulier sur les petites et moyennes entreprises ou les entreprises orientées vers l'exportation avec des cycles de commande longs.

4. Stratégies de réponse des entreprises de tubes en alliage de tungstène

Afin de réduire l'impact des fluctuations des matières premières sur la structure des coûts, les fabricants de tubes en alliage de tungstène adoptent souvent les stratégies suivantes :

1. **Mettre en place un mécanisme de réserves de matières premières et un accord d'approvisionnement stratégique. En signant des accords d'approvisionnement à long terme avec de grandes sociétés minières ou en participant à l'intégration des ressources en tungstène au sein du groupe, nous pouvons sécuriser à l'avance les prix des matières premières clés et constituer des réserves stratégiques pour réduire l'exposition aux risques.**
2. **Optimiser la structure du produit et la conception de l'alliage**
en ajustant les ratios d'alliage, comme la réduction de la teneur en nickel, l'utilisation de fer à faible coût pour remplacer une partie du cuivre, etc., pour réduire la proportion de matières premières par unité de poids et développer davantage de produits de densité moyenne/fonctionnels pour partager la pression du marché.
3. **Améliorez l'efficacité des processus et le contrôle de la consommation d'énergie dans le processus de fabrication**
en introduisant des systèmes de formage automatisés, de frittage et de finition intelligents, réduisez les tolérances de traitement et les coûts énergétiques et réduisez la consommation d'énergie par unité de produit tout en garantissant la qualité.
4. **Le mécanisme de liaison des prix et la conception de conditions contractuelles flexibles**
peuvent être utilisés pour lier les changements de prix au marché des matières premières en ajoutant une clause d'ajustement des prix au contrat, protégeant ainsi la marge bénéficiaire de l'entreprise.

V. Conclusion

Globalement, la structure de coût des tubes en alliage de tungstène est très sensible aux fluctuations des prix des matières premières. La rareté et le caractère stratégique des ressources en tungstène rendent également les prix sensibles aux politiques, à l'offre et à la demande, ainsi qu'aux tendances internationales. À mesure que des entreprises comme CTIA GROUP continuent d'investir dans des procédés d'extraction de tungstène écologiques, l'utilisation de ressources renouvelables et une fabrication intelligente, leur capacité à faire face aux fluctuations de coûts continuera de se renforcer, propulsant les tubes en alliage de tungstène vers des performances accrues, des applications plus larges et une plus grande valeur ajoutée.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.5 Demande émergente et orientation politique pour les tubes en alliage de tungstène dans la fabrication haut de gamme

Alors que la nouvelle révolution scientifique et technologique et la transformation industrielle s'intensifient, les industries manufacturières haut de gamme, représentées par l'aérospatiale, le développement de l'énergie nucléaire, les équipements médicaux haut de gamme, la fabrication de semi-conducteurs et l'industrie de la défense, exigent des matériaux de pointe plus performants pour une meilleure intégration et des capacités de service extrêmes. Les tubes en alliage de tungstène, grâce à leur densité élevée, leur résistance élevée, leur stabilité à haute température et leur résistance aux radiations, constituent un choix idéal pour de nombreux composants clés. Leur potentiel d'application dans la fabrication haut de gamme du futur est constamment exploré et ils bénéficient d'une attention particulière et d'orientations stratégiques dans les politiques nationales.

1. Tendances spécifiques de la demande de tubes en alliage de tungstène dans les nouveaux secteurs de fabrication haut de gamme

1. Systèmes de propulsion aérospatiaux et satellites

Les engins spatiaux, les satellites d'exploration, les engins spatiaux habités et autres systèmes requièrent une stabilité thermique et une précision de forme extrêmement élevées pour des composants tels que le guidage des flux de gaz à haute température, l'encapsulation plasma et le contrôle d'attitude. Les tubes en alliage de tungstène, utilisés comme tubes de flux thermique pour propulseurs, canaux de gaz à grande vitesse et carters de volants d'inertie, excellent dans les environnements à très haute température, sous vide et soumis à des cycles thermiques intenses, et deviennent un matériau clé pour remplacer les traditionnels alliages d'acier inoxydable et de titane.

2. Énergie nucléaire et technologie de l'énergie de fusion

Dans les réacteurs de fission et de fusion nucléaires, les tubes en alliage de tungstène sont largement utilisés pour les matériaux de gainage, les manchons de blindage neutronique, les tubes de refroidissement à métal liquide et d'autres composants. Ils doivent présenter une excellente résistance au rayonnement neutronique, une excellente conductivité thermique et une excellente résistance à la corrosion. Leur inertie chimique et leur stabilité thermodynamique constituent notamment leurs atouts uniques dans les systèmes de refroidissement au lithium liquide, à l'hélium et au sodium.

3. Équipement médical haut de gamme

Dans les équipements de radiothérapie, les accélérateurs de particules, les boîtiers de gamma knife et les composants de positionnement de précision des cibles, les tubes en alliage de tungstène, grâce à leur haute densité, leurs propriétés anti-diffusantes et leur excellente formabilité, absorbent efficacement les radiations, protègent des effets secondaires et assurent la stabilité structurelle. Avec la transition des équipements de radiothérapie de précision 2D vers 3D, les exigences en matière de précision dimensionnelle et de protection contre les champs magnétiques sont plus élevées.

4. Industrie des équipements semi-conducteurs et de l'électronique

Les tubes sont utilisés dans les canaux de faisceaux d'électrons, les réacteurs de dépôt et les dispositifs de contrôle de faisceaux de particules à haute énergie dans des environnements à vide

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

poussé, à fort champ magnétique et à chocs thermiques. Ils nécessitent une stabilité à la déformation, une conductivité thermique et une neutralité électrique extrêmement élevées pour éviter les perturbations du champ électrique et l'accumulation de points chauds. Les tubes en alliage de tungstène font également leur entrée progressive dans les applications de tubes de conductivité thermique pour l'encapsulation de puces et de micro-dissipateurs thermiques, ouvrant ainsi la voie à la production de masse.

5. Équipements d'énergie verte et d'hydrogène

Dans les piles à combustible à haute température et les systèmes de stockage et de transport d'hydrogène, les tubes en alliage de tungstène présentent une excellente résistance à la fragilisation par l'hydrogène et une stabilité thermochimique, et devraient servir de matériaux de canal clés pour un stockage efficace de l'hydrogène et un échange de chaleur à l'avenir, répondant à la demande de pièces structurelles hautes performances dans les industries vertes et à faible émission de carbone.

II. Orientation politique et soutien aux stratégies nationales

1. La promotion de la politique nationale de « renforcement des bases et de consolidation de la chaîne d'approvisionnement »

Ces dernières années, le gouvernement chinois a accordé une grande importance au problème des goulets d'étranglement des matières premières essentielles. En tant que métal rare stratégique du pays, l'alliage de tungstène a été explicitement inclus dans des politiques clés telles que le « Plan stratégique des ressources minérales » et le « Plan d'action pour les insuffisances des matières premières essentielles ». Les tubes en alliage de tungstène, en raison de leur large application et de leurs importantes barrières techniques, sont devenus un axe de recherche clé dans le cadre de l'initiative « Renforcer et compléter les chaînes d'approvisionnement ». Les entreprises leaders sont encouragées à collaborer sur des questions clés et à développer des alternatives de produits performantes.

2. Soutien à la substitution économe en énergie des matériaux à haute densité dans le contexte du « double carbone »

Les tubes en alliage de tungstène offrent une efficacité bien supérieure en termes de protection contre les radiations, de protection et de conductivité thermique par rapport aux tubes traditionnels en plomb, en acier ou en acier inoxydable fortement allié. Ils permettent des applications légères, durables et à haut rendement thermique, offrant un avantage naturel en matière d'économie d'énergie, de réduction des émissions et de production verte. De nombreuses collectivités locales ont mis en place des mesures incitatives spécifiques pour soutenir le remplacement des composants métallurgiques traditionnels, très énergivores, par des tubes en alliage de tungstène, favorisant ainsi la transition écologique.

3. Les politiques d'intégration militaro-civile encouragent l'expansion des matériaux haut de gamme dans les applications civiles

La Chine encourage le transfert de technologies de matériaux militaires spécialisés vers des applications civiles. Les tubes en alliage de tungstène, forts d'une expérience avérée dans les composants inertiels militaires, les revêtements de munitions et la protection des cathéters, se développent progressivement sur des marchés à forte valeur ajoutée tels que l'instrumentation industrielle, les équipements électroniques et les composants structurels médicaux. Grâce à ce

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

soutien politique, plusieurs entreprises de matériaux haut de gamme ont modernisé leurs lignes de production et procédé à des transferts de technologie, accélérant ainsi leur commercialisation.

4. Construction de grands projets scientifiques et technologiques et de plateformes expérimentales de base

Les projets de recherche liés aux tubes sont largement couverts par les projets scientifiques et technologiques du 14e Plan quinquennal, le « Projet de démonstration de premier lot pour de nouveaux matériaux clés » et le programme de recherche collaborative militaro-civile, qui englobe la recherche sur les performances de service, le développement de procédés composites et la simulation de conditions de service complexes. L'Académie chinoise d'ingénierie physique, la Cinquième Académie chinoise des sciences et technologies aérospatiales, la China National Nuclear Corporation et le China General Nuclear Power Group, entre autres, ont déjà lancé des activités systématiques de recherche et développement, favorisant un écosystème en boucle fermée axé sur les applications.

3. Conclusion : La valeur stratégique de l'industrie des tubes en alliage de tungstène continue de croître

Dans un contexte de modernisation des procédés de fabrication haut de gamme, de sécurité technologique accrue et de restructuration de la chaîne d'approvisionnement mondiale, les tubes en alliage de tungstène connaissent une nouvelle poussée de la demande industrielle. Face à la hausse constante des exigences de performance, les tubes en alliage de tungstène joueront un rôle clé dans l'obtention d'un contrôle structurel plus précis, de fonctions composites plus complexes et d'environnements de service plus exigeants. Pour les entreprises de matériaux, suivre scrupuleusement les orientations politiques, renforcer le développement des applications et surmonter les goulots d'étranglement des processus sera essentiel pour saisir les opportunités stratégiques offertes par les tubes en alliage de tungstène et réaliser des avancées technologiques et commerciales.

Obstacles techniques et voies de développement approfondies de l'industrie des tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène occupent une place stratégique dans les secteurs nucléaire, aérospatial, militaire, médical et électronique. Cependant, ce marché n'est pas totalement ouvert, caractérisé par des barrières techniques extrêmement élevées et une chaîne industrielle complexe. Il a longtemps été dominé par un petit nombre d'entreprises et d'instituts de recherche de pointe. Les entreprises souhaitant s'implanter ou développer leurs capacités de fabrication de tubes en alliage de tungstène doivent comprendre parfaitement les principaux obstacles à chaque maillon de la chaîne industrielle et élaborer un plan de développement multidimensionnel pour mettre en place un système d'innovation en boucle fermée, de la préparation des matières premières aux produits haut de gamme.

1. Principaux obstacles techniques de l'industrie des tubes en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Technologie de préparation de poudre de tungstène et de poudre d'alliage de haute pureté

Les performances des tubes en alliage de tungstène résident dans la pureté, la granulométrie, la sphéricité et la teneur en oxygène de la poudre brute. Actuellement, la production de poudre de tungstène sphérique de haute pureté repose encore sur des techniques complexes de réduction, d'atomisation ou de sphéroïdisation au plasma, nécessitant des investissements importants en équipements, un contrôle de procédé de haute précision et des exigences de rendement strictes. Certains équipements et systèmes de contrôle de procédé de base sont encore monopolisés par des technologies étrangères.

2. Procédé de formage à haute densité et de pressage de structures tubulaires

Les tubes en alliage de tungstène doivent présenter une structure creuse lors de l'étape de formage. La conception du moule exige un calcul précis du retrait des diamètres intérieur et extérieur. Parallèlement, les procédés de moulage, de pressage isostatique à froid ou à chaud doivent produire une billette dense et exempte de fissures. Cela impose des exigences extrêmement élevées en matière de capacité de pression, de fluidité de la poudre et de contrôle du lubrifiant.

3. Technologie de frittage à haute température et de densification sous atmosphère contrôlée

Les tubes en alliage de tungstène doivent être frittés à des températures comprises entre 1 400 et 1 600 °C, sous un contrôle strict du type d'atmosphère (hydrogène, gaz inerte, etc.) et de la pression partielle d'oxygène. Certains tubes en alliage de tungstène haut de gamme nécessitent un frittage sous vide, micropression et hydrogène, complété par un procédé de compression isostatique à chaud (CIC) pour augmenter la densité. Ce procédé présente des goulots d'étranglement en termes de précision et de risques pour la sécurité.

4. Capacités de finition de trous profonds et de traitement de surface pour pièces tubulaires

Les tubes en alliage de tungstène constituent un obstacle majeur à la technologie actuelle. Les procédés traditionnels de tournage et de rectification peinent à atteindre les trous profonds ou à maintenir la concentricité des parois intérieures et la rugosité de surface. Des procédés spécialisés tels que la rectification par vibration haute fréquence, le polissage chimique et l'usinage assisté par ultrasons sont nécessaires. De plus, la galvanoplastie, le revêtement PVD et les systèmes de revêtement antioxydant des parois intérieures et extérieures imposent également des exigences extrêmement élevées à l'environnement de production.

5. Le système de certification des produits et d'évaluation des services inter-domaines n'est pas solide

Les tubes en alliage de tungstène sont largement utilisés dans des applications à haut risque telles que le blindage contre les radiations nucléaires, les tubes de propulsion plasma et les composants de radiothérapie médicale. Ces applications sont souvent soumises à des exigences complexes, notamment en matière de stabilité aux radiations, de fatigue thermique, d'interférences magnétiques et de résistance à la corrosion. Cependant, l'absence d'un système complet d'équipements d'évaluation, de méthodes expérimentales et de normes d'essai a limité l'adoption rapide de ces produits.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Le développement approfondi de l'industrie des tubes en alliage de tungstène

Pour que l'industrie des tubes soit compétitive et durable, il est nécessaire de progresser, des matières premières, des procédés, des équipements et des systèmes d'évaluation au développement d'applications à plusieurs niveaux. Les axes principaux sont les suivants :

1. Intégrer verticalement la chaîne de ressources pour créer une boucle fermée depuis les matières premières jusqu'à la fabrication des tuyaux

Renforcer l'intégration de la purification du concentré de tungstène, de la sphéroïdisation de la poudre de tungstène, de la préparation, de la régénération et de la récupération des poudres d'alliage afin de former une chaîne d'approvisionnement en poudre à faible coût et hautement fiable. Parallèlement, promouvoir le remplacement national des équipements de frittage indépendants, des presses isostatiques et des équipements de laminage à froid de tubes afin de réduire la dépendance systémique.

2. Conception d'alliages de tungstène haute performance et innovation dans les systèmes de matériaux

Conception d'alliages multi-échelles et multi-éléments, développement de nouveaux systèmes d'alliages pour tubes tels que W-Ni-Fe-Cr, W-Ni-Co et W-Cu-Re, et amélioration des propriétés composites telles que la conductivité thermique et électrique, la résistance à la corrosion et aux interférences magnétiques. Introduction de mécanismes de renforcement par microalliage et dispersion de nanoparticules pour améliorer l'uniformité structurelle et la stabilité à long terme.

3. Construire une plateforme de fabrication haut de gamme et une chaîne de processus intelligente

Promouvoir le développement d'équipements intelligents de pressage et de formage creux pour les tubes en alliage de tungstène, établir une ligne de production intégrée de contrôle précis de la température, de frittage assisté par plasma et de HIP, combiner l'IA industrielle et les réseaux de capteurs pour effectuer des prédictions et des retours en temps réel sur la microstructure, la densité et la porosité, et créer une « densification visible ».

4. Construire une plateforme complète de gestion de la qualité et de certification des normes

Promouvoir l'inclusion de matériaux de tubes en alliage de tungstène haut de gamme dans les normes des systèmes aéronautiques/médicaux telles que AS9100 et ISO13485, établir des chaînes de données de traçabilité des produits et de contrôle des processus, construire une plate-forme expérimentale de test de service (comme les cycles thermiques à haute température, l'irradiation neutronique, la fatigue par corrosion et d'autres simulations composites) et améliorer la certification internationale des produits et les capacités d'accès aux applications.

5. Développer les marchés d'applications à forte valeur ajoutée et stimuler l'innovation axée sur la demande

En ciblant les projets stratégiques nationaux et les domaines émergents haut de gamme, tels que les projets de fusion nucléaire, les tubes de flux de chaleur des sondes spatiales, les canaux d'accélérateurs de particules, les tubes de dissipation de chaleur des puces électroniques, etc., nous réalisons le développement personnalisé de tubes en alliage de tungstène et la conception collaborative d'applications composites, et favorisons la transformation des « produits matériels » en « solutions d'application ».

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

III. Conclusion

L'industrie des tubes en alliage de tungstène représente non seulement une technologie de pointe dans le traitement en profondeur du tungstène, mais reflète également de manière significative les capacités de fabrication haut de gamme de la Chine. Les futures modernisations industrielles ne se limiteront plus à la production de matériaux plus denses et plus durables, mais engloberont des avancées majeures sur l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement, axées sur la collaboration entre les systèmes, l'intelligence des processus et l'intégration des applications. Si des entreprises leaders comme CTIA GROUP continuent de se concentrer sur les systèmes d'alliages avancés, les technologies de fabrication intelligente et leur influence dans les normes internationales, elles s'assureront une position concurrentielle clé dans l'industrie mondiale des tubes en alliage de tungstène.

en.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatun

1


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

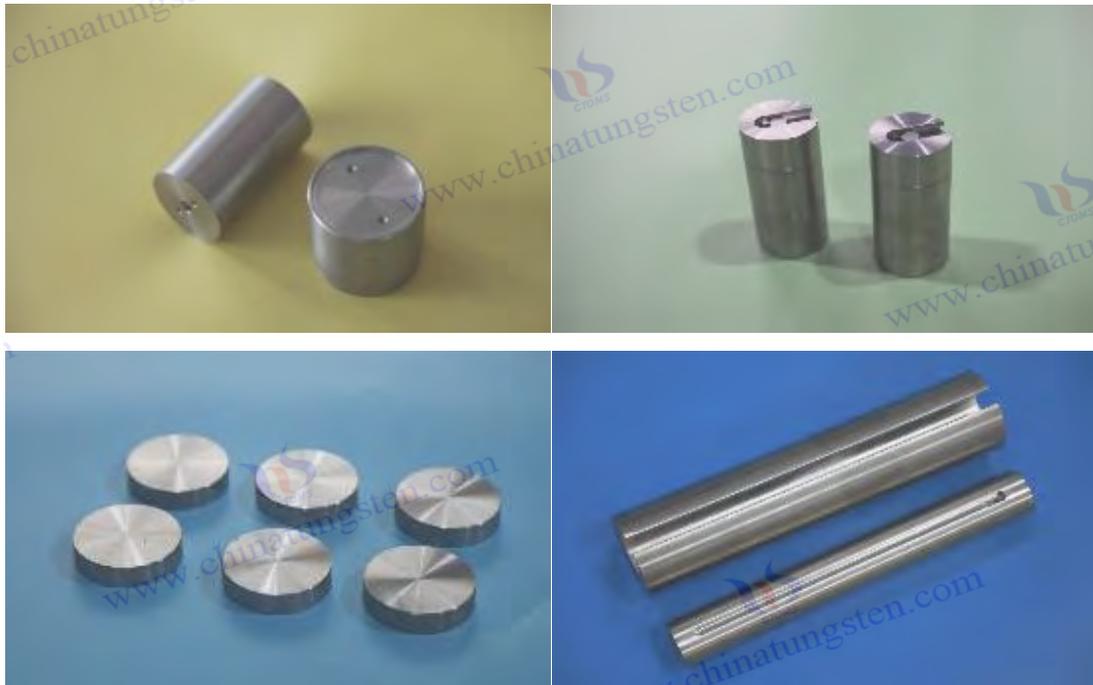
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Chapitre 10 Frontières de la recherche et développement futur des tubes en alliage de tungstène

10.1 Recherche sur la densification élevée et le formage de formes complexes de tubes en alliage de tungstène

Grâce à leurs excellentes propriétés physiques et mécaniques, les tubes en alliage de tungstène occupent une position stratégique incontournable dans des secteurs tels que l'énergie nucléaire, l'aviation, la médecine et l'électronique. Cependant, face à des environnements d'exploitation et des exigences de conception de plus en plus stricts, le contrôle de leur densité structurale et de leur forme géométrique est devenu un obstacle technique majeur. Face à la demande croissante de tubes en alliage de tungstène haute densité et de composants structurels complexes, les instituts de recherche et les entreprises nationales et internationales mènent en permanence des recherches approfondies sur leurs mécanismes de formage, leurs procédés de densification et leurs techniques de fabrication innovantes, favorisant ainsi l'évolution de ce matériau, passant de tubes homogènes traditionnels à des formes complexes fonctionnalisées, structurellement intégrées et multi-échelles.

1. L'importance des tubes en alliage de tungstène haute densité

ont un impact direct sur leur efficacité de blindage, leur résistance mécanique et leur durée de vie. Dans des conditions telles que des rayonnements à haute énergie, des différences de pression élevées et un flux thermique important, la porosité ou des zones desserrées localisées peuvent facilement entraîner une instabilité thermique, une dégradation de la résistance, voire une défaillance structurelle. Par conséquent, l'augmentation de la densité du matériau ($\geq 99,5$ % de la densité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

théorique) est non seulement une condition préalable à la performance du produit, mais aussi une exigence fondamentale pour des applications haut de gamme dans de nombreux domaines.

2. Principales orientations et technologies de base de la recherche sur la haute densification

1. Préparation de poudre ultrafine et modification sphérique

Les conditions préalables à une mise en forme dense sont une grande fluidité et une composition uniforme. Les recherches actuelles portent sur :

- Traitement de co-sphéroïdisation de **poudre de tungstène nano-submicronique et de poudre d'éléments d'alliage (Ni, Fe, Cu, etc.)** ;
- Sphéroïdisation au plasma, voie de réduction par séchage par atomisation pour améliorer la densité de remplissage et la compressibilité de la poudre ;
- Distribution granulométrique et conception du tensioactif pour optimiser l'état de formation initial.

2. Technologie de pressage à haute uniformité

Le moulage et le pressage isostatique à froid (NEP) sont des procédés traditionnels. Les recherches les plus récentes visent à :

- **Le pressage à chaud** ou le pressage initial isostatique à chaud (THIP) augmente la densité tout en améliorant l'efficacité de l'étanchéité des micropores ;
- La simulation par éléments finis est utilisée pour optimiser la conception de la cavité du moule et le chemin de pressage, ainsi que pour contrôler la distribution de l'épaisseur des parois et la coaxialité ;
- **de pressage rotatif multi-axes** pour améliorer la densité volumique et la précision de forme des tubes cylindriques.

3. Technologie de frittage par densification

Le processus de frittage est une étape clé pour la fermeture des pores et la connexion des grains :

- Adopter la technologie **de frittage multi-étapes sous vide-hydrogène et de contrôle de l'atmosphère de transition** pour obtenir des résidus à faible porosité ;
- Étudier le contrôle de la distribution de phase liquide dans l'alliage de tungstène pour améliorer la pénétration uniforme et le mouillage des phases à bas point de fusion telles que Ni/Fe dans les pièces tubulaires frittées ;
- De légers ajouts de Mo, Re, Ti et d'autres éléments optimisent le chemin de frittage en phase liquide et la capacité de migration des limites de grains.

4. Chemin de densification auxiliaire

- Le pressage isostatique à chaud (HIP) est particulièrement efficace pour sceller les pores résiduels à l'intérieur des tuyaux. Les recherches portent sur l'optimisation de la fenêtre pression-température-temps de maintien du pressage à chaud .
- Les méthodes de frittage rapide telles que la densification **au plasma** , **le frittage par micro-ondes** et **le frittage par plasma d'étincelles (SPS)** sont devenues la frontière de la recherche pour la fabrication de tubes en alliage de tungstène dense ;
- **Le traitement thermique synergique froid-chaud** (tel que la méthode de retraitement-repressurisation rapide) est progressivement utilisé dans la fabrication de tuyaux à parois épaisses et à haute densité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Exploration de la technologie de formage des tubes complexes en alliage de tungstène

L'alliage de tungstène présente des coûts d'usinage traditionnels élevés et une faible liberté de formage, notamment dans les structures géométriques complexes telles que les parois minces, les coudes, les spirales internes et les canaux de forme spéciale. La capacité de formage est devenue un axe de recherche et développement.

1. Technologie de moulage par injection de poudre (PIM)

Convient aux tubes de petit diamètre, à paroi mince et en alliage de tungstène complexe :

- Il peut produire des composants de microstructure tels que des tubes rainurés en spirale, des séparateurs et des tubes à canal gainés ;
- Étudiez l'uniformité du remplissage et le chemin de dégraissage des moules d'injection pour éviter les fissures et les chutes.

2. Fabrication additive (FA) et impression de structures tubulaires

Le dépôt d'énergie dirigée par laser (DED), la fusion par faisceau d'électrons (EBM), etc. conviennent aux alliages de tungstène :

- Il peut réaliser la formation d' **une structure de boîtier en spirale multicouche et d'une structure d'épaisseur de paroi à gradient** ;
- Les difficultés actuelles résident dans le contrôle des fissures, la formation des pores, l'accumulation des contraintes thermiques et la ségrégation de la composition des alliages.

3. Méthode de coulée centrifuge de métal liquide et de revêtement interne par projection à froid

Explorer le moulage intégré de tubes creux et le formage composite de revêtements fonctionnels de parois intérieures pour améliorer l'intégration structurelle et fonctionnelle ;

- La coulée centrifuge peut être utilisée pour la production initiale de tubes en alliage de tungstène à parois épaisses ;
- La technologie de projection à froid est combinée à de la poudre de tungstène et à de la poudre composite Cu/Ni pour préparer la couche conductrice interne et conductrice thermique.

4. Simulation intégrée et formage intelligent

Afin de contrôler la qualité du formage et d'optimiser la conception structurelle, **un modèle de simulation multi-physique du tube en alliage de tungstène est établi** :

- Combiner le comportement de formage rhéologique, le comportement de conduction thermique et la simulation de l'évolution du champ de phase ;
- Présentation de l'apprentissage automatique pour aider à optimiser les paramètres du processus de pressage et à prédire les défauts ;
- Pour les raccords de tuyauterie de forme spéciale, **le mécanisme de planification de chemin de fabrication collaborative additive-soustractive** et de compensation de déformation est étudié.

V. Conclusion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La recherche sur la haute densification et le formage de formes complexes des tubes en alliage de tungstène constitue non seulement une avancée technologique majeure dans le domaine du traitement des matériaux, mais aussi une voie essentielle pour répondre aux besoins futurs des applications extrêmes et réaliser des applications à forte valeur ajoutée pour les alliages de tungstène.

Les développements futurs porteront sur :

- Conception de poudre fine et contrôle intelligent du chemin de passage ;
- Intégration de mécanismes de densification par frittage multi-échelles et de voies de traitement thermique ;
- procédés de fabrication additive et de formage intégrés pour structures composites ;
- Améliorez l'intelligence de fabrication basée sur la simulation et les données.

Les avancées dans cette direction devraient grandement favoriser l'innovation structurelle et l'intégration fonctionnelle des tubes en alliage de tungstène dans des domaines clés tels que l'aérospatiale, l'énergie nucléaire, l'industrie militaire et les soins médicaux haut de gamme, et ouvrir une nouvelle ère dans la fabrication de nouvelles pièces structurelles métalliques hautes performances.

Intégration de la fabrication additive et fabrication intelligente de tubes en alliage de tungstène

Les tubes en alliage de tungstène, un matériau avancé alliant haute densité, point de fusion élevé, résistance mécanique élevée et excellente résistance à la corrosion, voient leurs applications s'étendre au-delà des applications nucléaires et militaires traditionnelles, pour atteindre des secteurs haut de gamme émergents tels que l'aérospatiale, les équipements médicaux, la protection électronique et les systèmes énergétiques. Ces applications imposent non seulement des exigences accrues en matière de performances des tubes en alliage de tungstène, mais présentent également de nouveaux défis en termes de complexité de formage, d'efficacité de fabrication et de régularité des produits. La métallurgie des poudres et les méthodes d'usinage traditionnelles ont montré leurs limites pour obtenir des géométries complexes, améliorer l'utilisation des matériaux et raccourcir les cycles de R&D. Par conséquent, l'application intégrée de la fabrication additive (FA) et des technologies de fabrication intelligente devient un axe clé de l'innovation technologique dans **la production de tubes en alliage de tungstène**.

1. Avantages et importance de la fabrication additive de tubes en alliage de tungstène

avec les procédés traditionnels de découpe ou de moulage + frittage, les principaux avantages de la fabrication additive dans la préparation de tubes en alliage de tungstène se reflètent dans les aspects suivants :

- **Forte capacité à former des structures complexes** : Il peut préparer directement des structures creuses de forme spéciale avec des rainures intérieures en spirale, des sections de diamètre variable, des canaux composites, etc., et réaliser la conception de structures de tubes en alliage de tungstène difficiles à traiter avec des processus traditionnels.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Économisez des matériaux et de la consommation d'énergie** : réduisez le gaspillage de matériaux, particulièrement adapté à l'utilisation efficace des ressources métalliques coûteuses telles que le tungstène.
- **Personnalisation et fabrication rapide : la taille, l'épaisseur de paroi et la structure des tubes** en alliage de tungstène peuvent être rapidement personnalisées en fonction du scénario d'utilisation finale, réduisant ainsi la dépendance au moule.
- **Contrôle affiné de la microstructure** : en contrôlant la vitesse de trempe, le chemin de dépôt, etc. via les paramètres du processus, la conception et l'amélioration du gradient de microstructure multi-échelle peuvent être obtenues.

2. Principales voies techniques de fabrication additive de tubes en alliage de tungstène

1. Fusion sélective par laser (SLM)/Fusion par faisceau d'électrons (EBM)

- Convient à la fabrication de composants de tubes en alliage de tungstène à paroi mince de petite taille et de haute précision.
- Il peut réaliser des pièces structurelles creuses avec une épaisseur de couche de poudre de 20 à 50 μm et une précision d'impression de $\pm 0,05$ mm.
- Cependant, en raison de la conductivité thermique élevée et du point de fusion extrêmement élevé de l'alliage de tungstène (> 3400 °C), il doit être utilisé sur une plate-forme de préchauffage à haute température, dans une atmosphère inerte ou dans un environnement sous vide pour réduire les fissures et les contraintes résiduelles.

2. Dépôt d'énergie dirigée (DED)/Revêtement laser

- Convient aux billettes de tubes en alliage de tungstène de taille moyenne et grande ou à la réparation de structures locales.
- La poudre/le fil métallique peut être déposé couche par couche à l'aide d'un laser ou d'un faisceau d'électrons pour former un **cylindre creux de taille quasi nette**.
- Il présente les avantages d'une efficacité de préparation élevée, d'un taux d'utilisation des matériaux élevé et d'une forte adaptabilité, et a été utilisé dans la fabrication de certaines structures de boîtier composites militaires et aérospatiales.

3. Projection à froid + post-traitement

- La poudre d'alliage de tungstène est déposée sur le substrat par un gaz vecteur à grande vitesse pour former une structure tubulaire, qui convient à la préparation de la couche interne ou de la couche fonctionnelle des **tubes composites en alliage de tungstène**.
- Un traitement thermique ultérieur ou HIP peut encore améliorer la densité et la force de liaison.
- La projection à froid est particulièrement adaptée à la préparation de la couche intermédiaire des **tubes composites tungstène-cuivre et tungstène-nickel**, et présente les avantages d'une petite zone affectée thermiquement et d'une faible contrainte résiduelle.

4. Fabrication collaborative additive et soustractive composite

- La combinaison de la fabrication additive avec l'usinage CNC (comme l'alésage de trous intérieurs et le meulage de parois extérieures) peut permettre **une préparation de tuyaux de haute précision et de haute densité**.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **La chaîne de processus hybride** « formage additif + découpe CNC + densification HIP » peut être utilisée pour obtenir une fabrication par lots stable.

3. Principales voies technologiques pour la fabrication intelligente de tubes en alliage de tungstène

Avec l'amélioration de la numérisation et de l'intelligentisation des technologies de fabrication, la production de tubes en alliage de tungstène s'intègre progressivement au paradigme de l'« Industrie 4.0 ». Les axes de développement de la fabrication intelligente comprennent principalement :

1. Collecte de données de processus multi-sources et retour d'information en temps réel

- **La surveillance en temps réel de la température, de la puissance et de la déformation** du processus de dépôt est réalisée grâce à des caméras haute température, des moniteurs optiques et des capteurs de flux de chaleur ;
- Identifiez les défauts matériels tels que l'ablation, les trous, les fissures, etc. en temps réel et fournissez un retour d'information pour ajuster les paramètres.

2. Modélisation des processus et optimisation intelligente des processus

- Établir un **modèle de simulation du comportement du bain de fusion de la poudre d'alliage de tungstène sous faisceau** à haute énergie ;
- Utiliser des algorithmes d'intelligence artificielle (par exemple, réseaux neuronaux, optimisation bayésienne) pour prédire les chemins optimaux, la densité énergétique et les vitesses de balayage ;
- Réalisez une planification automatique du chemin d'impression et une prédiction des pannes.

3. Construction d'un jumeau numérique et d'un système de contrôle en boucle fermée

- Grâce à la modélisation numérique 3D et à la cartographie en temps réel de l'état d'impression, **un système de fusion virtuel-réel pour la fabrication additive de tubes en alliage de tungstène est construit** ;
- Il réalise des fonctions telles que **la prédiction des défauts, la simulation des performances et le retour en arrière des processus** pour fournir des garanties de contrôle de cohérence de la qualité.

4. Unités de fabrication flexibles et construction de lignes de production intelligentes

- capacités « d'auto-identification, d'auto-correction et d'auto-ajustement » ;
- Réalisez l'automatisation complète du processus en boucle fermée du tube en alliage de tungstène depuis **l'alimentation en poudre, le formage additif, le traitement thermique jusqu'aux tests et à l'emballage** .

IV. Défis de développement et perspectives d'avenir

Bien que la fabrication additive et la fabrication intelligente apportent un grand potentiel à la préparation de tubes en alliage de tungstène, de nombreux défis subsistent dans la promotion de l'industrialisation :

- **Adaptabilité insuffisante de la poudre** : La préparation de poudre d'alliage de tungstène sphérique et de haute pureté est difficile et coûteuse.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Les fissures et les pores sont difficiles à contrôler** : le point de fusion élevé conduit à un refroidissement inégal, qui forme facilement des défauts, et nécessite une optimisation de la densité énergétique et de la stratégie de dépôt.
- **Exigences élevées en matière de spécialisation des équipements** : Le système d'impression doit s'adapter au dépôt de métal à haute température et à haute densité, et le coût d'investissement en matériel est élevé.
- **Les normes et le système d'évaluation ne sont pas encore parfaits** : en particulier, les normes d'évaluation de la résistance structurelle et de la durée de vie en fatigue pour les tubes en alliage de tungstène de forme spéciale doivent être établies.

À l'avenir, nous devrions promouvoir les tubes en alliage de tungstène de la « fabrication additive en laboratoire » à la « fabrication intelligente à grande échelle » grâce à la conception intégrée des matériaux, des processus et des structures, à l'optimisation basée sur les données et à l'amélioration du système standard pour répondre aux besoins urgents de la fabrication haut de gamme du pays et des industries émergentes stratégiques.

En résumé, l'intégration

de la fabrication additive et de la fabrication intelligente pour les tubes en alliage de tungstène améliorera considérablement leur adaptabilité à la complexité structurelle, leur flexibilité de fabrication et la constance de leurs performances, devenant ainsi un axe de développement essentiel pour la prochaine génération de raccords de tubes hautes performances à base de tungstène. À mesure que la technologie mûrit et que ses applications se développent, on prévoit qu'au cours des cinq prochaines années, un système avancé de fabrication de tubes en alliage de tungstène, intégrant plusieurs techniques, collaborant au sein de la chaîne industrielle et offrant un support standardisé, sera mis en place, aidant ainsi la Chine à maîtriser de manière indépendante les matériaux clés dans des domaines tels que l'aérospatiale, l'énergie nucléaire et la défense stratégique.

10.3 Développement intégré et extension des applications des tubes composites multifonctionnels en alliage de tungstène

Les tubes composites en alliage de tungstène suscitent un intérêt croissant dans le secteur de la fabrication haut de gamme. Comparés aux tubes mono-matériaux traditionnels en alliage de tungstène, les tubes composites multifonctionnels en alliage de tungstène offrent des avantages supérieurs en termes de composition, de structure mécanique, d'intégration fonctionnelle et de performances de service. Leur développement vise non seulement à préserver les propriétés fondamentales de l'alliage de tungstène, telles qu'une densité, un point de fusion et une résistance élevés, mais aussi à intégrer des modules fonctionnels tels que la conductivité thermique, l'antimagnétisme, le blindage électromagnétique, la résistance à la corrosion et à l'usure grâce à une conception composite, afin de répondre aux divers besoins des environnements de service complexes.

1. Concept de conception de base du tube composite multifonctionnel en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. Principe de synergie structure-fonction

Les tubes composites en alliage de tungstène ne se limitent plus à la résistance mécanique, mais privilégient **l'intégration de la structure et de la fonction**. Par exemple, la couche extérieure offre une dureté et une résistance à la corrosion élevées pour la protection, la couche intermédiaire optimise la conductivité thermique ou les propriétés antimagnétiques, et la couche intérieure assure la conduction du signal électrique ou la biocompatibilité.

2. Gradient de matériau et conception d'interface

En utilisant des ****matériaux à gradient fonctionnel (FGM)**** ou des structures composites multicouches, la correspondance de dilatation thermique et la transition de contrainte entre différents métaux (tels que le tungstène-cuivre, le tungstène-nickel-fer, le tungstène-molybdène, etc.) sont optimisées pour réduire le risque de délaminage de l'interface et de propagation des fissures.

3. Optimisation synergique des ingrédients et des performances

En tenant compte des exigences de conductivité thermique, de propriétés électriques, de réponse magnétique, de résistance à la corrosion, etc. du tuyau, **la conception de matériaux composites, la régulation du microalliage, le renforcement de la dispersion des nanoparticules** et d'autres moyens sont adoptés pour obtenir une amélioration synergique des performances.

2. Types typiques de structures tubulaires composites en alliage de tungstène multifonctionnel

Type de structure	Caractéristiques	Utilisations typiques
Tube composite multicouche coaxial (tel que W-Cu-W)	Conduction thermique interne, protection externe	Dissipation thermique de l'alimentation haute fréquence, système de contrôle thermique du vaisseau spatial
Tube fonctionnel à gradient (tel que W→W-Ni→W-Cu)	Résistant aux chocs thermiques et bonne résistance structurelle	Boîtier du compartiment de queue du missile, composants de contrôle du réacteur
Tubes composites métal-céramique (tels que W-ZrO ₂)	Anti-oxydation à haute température, anti-rayonnement	Réceptacles à plasma, composants d'accélérateur
Tube composite à canaux multiconducteurs (tel qu'un noyau W-Cu + une coque W-Ni)	Conduction multifonctionnelle, blindage électromagnétique	Équipements médicaux, dispositifs d'administration de faisceaux de particules
Revêtement de surface de tube composite (tel que tube W + revêtement TiN)	Résistant à l'usure et à la corrosion	Transmission mécanique à grande vitesse, conduit résistant à l'usure

3. Technologies clés de préparation et de formage

1. Pressage composite par métallurgie des poudres

par remplissage en couches ou pré-pressage segmenté, et une bonne liaison d'interface est obtenue par pressage à chaud et frittage.

2. Extrusion coaxiale

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Applicable aux tubes composites en alliage de tungstène à structure cœur-coque, assurant une déformation synchrone et une correspondance plastique de l'interface de plusieurs matériaux pendant le formage.

3. Projection à froid et revêtement laser

Utilisé pour ajouter des revêtements fonctionnels (tels que des céramiques résistantes aux radiations, des alliages conducteurs, etc.) à la paroi extérieure ou intérieure du tube pour obtenir **un renforcement local et une intégration des fonctions de surface**.

4. Fabrication additive

La formation intégrée de tubes composites fonctionnels complexes peut être réalisée grâce à **des plates-formes d'impression 3D multi-matériaux** (telles que le SLM à double chemin de poudre ou le DED), qui offrent une grande liberté de conception.

5. Traitement de densification par pressage isostatique à chaud (HIP)

L'amélioration de la résistance de liaison de l'interface et de la densité globale est une étape clé dans la production de masse de tubes composites en alliage de tungstène.

4. Applications typiques et expansion des tubes composites multifonctionnels en alliage de tungstène

1. Énergie nucléaire et dispositifs de fusion

- Utilisé pour **les tubes de guidage de blindage neutronique, les manchons de barres de contrôle et les tubes de protection des circuits de refroidissement** ;
- La conception composite peut améliorer considérablement la résistance aux chocs thermiques et la résistance aux radiations ;
- Les structures composites de type W-Cu-ZrO₂ sont largement utilisées dans les conduits d'ingénierie thermique nucléaire.

2. Systèmes aérospatiaux

- Utilisé pour **les tubes de guidage de moteurs à haute température, les contrepoids d'avions et les conduits de blindage** ;
- Les tubes W-Ni-Cu offrent une résistance élevée et de bonnes performances de gestion thermique ;
- Le matériau conducteur thermique du noyau interne + la couche extérieure en alliage de tungstène haute résistance sont devenus une tendance.

3. Protection militaire et balistique

- Appliqué aux **tubes de guidage de munitions à haute pénétration, aux composants de navigation inertielle et aux boîtiers pare-balles** ;
- La structure composite tungstène-molybdène-nickel-fer présente une excellente ténacité et une excellente résistance aux chocs.

4. Dispositifs médicaux et radioprotection

- Fabrication de tubes de positionnement et de **canaux de faisceaux de particules pour thérapie par rayons gamma/rayons X** ;
- Une couche interne composite tungstène-cuivre est utilisée pour améliorer la gestion thermique et l'absorption d'énergie diffuse.

5. Électronique avancée et dispositifs quantiques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Utilisé dans les conduits à micro-ondes, les couvercles de blindage et **les structures de tubes à noyau antimagnétique** ;
- La structure composite conductrice thermique et antimagnétique peut améliorer la stabilité et les capacités anti-interférences.

V. Tendances et défis technologiques futurs

1. Contrôle précis de l'interface

des tubes composites réside dans **la qualité de l'interface entre les différents matériaux**. Des recherches approfondies sur la diffusion des éléments, le changement de phase de l'interface et les mécanismes de contrôle des contraintes résiduelles sont nécessaires à l'avenir.

2. Outil de conception intégré multifonctionnel

Développer **une plateforme de simulation de champ multi-physique** pour réaliser l'évaluation intégrée et l'optimisation structurelle des comportements mécaniques, thermiques, magnétiques et radiatifs des tubes composites.

3. Capacité de formage améliorée de grands tubes composites de forme spéciale

Il est nécessaire de développer **des systèmes de fabrication additive à haut débit et des systèmes de moulage d'arbre à noyau de haute précision** pour répondre aux besoins des structures à grande échelle et complexes.

4. Évaluation des performances à haut débit et établissement de normes

Actuellement, il existe un manque de normes systématiques de test et d'évaluation de service pour les tubes en alliage de tungstène composite multifonctionnel, ce qui limite leur popularisation dans les industries à forte demande telles que l'énergie nucléaire et l'industrie militaire.

Conclusion : Le développement intégré de

tubes composites multifonctionnels en alliage de tungstène représente une évolution fondamentale dans les applications des alliages de tungstène, passant de « matériaux structuraux uniques » à des « matériaux fonctionnels multi-domaines à hautes performances ». Sa technologie englobe une approche multidisciplinaire, englobant la conception des matériaux, le formage des composites, le contrôle des interfaces et l'évaluation multi-performances. Il s'agit d'un élément stratégique clé pour la pénétration des matériaux en tungstène dans les systèmes de fabrication haut de gamme. Grâce aux progrès des plateformes technologiques, des capacités de fabrication et des normes, les tubes composites en alliage de tungstène joueront un rôle essentiel dans des secteurs clés tels que l'énergie nucléaire, l'aérospatiale, l'informatique quantique et la médecine de précision.

10.4 Évolution des performances des tubes en alliage de tungstène dans des environnements de service extrêmes

Matériau essentiel doté d'une densité et d'une résistance élevées, les tubes en alliage de tungstène sont largement utilisés dans divers environnements de service extrêmes, notamment l'aérospatiale, l'énergie nucléaire, l'armée et la médecine. Ces environnements extrêmes impliquent généralement des conditions complexes telles que des températures et des pressions élevées, un rayonnement élevé, une corrosion importante et des contraintes mécaniques. L'évolution des performances des tubes en alliage de tungstène dans de tels environnements impacte non seulement leur sécurité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

structurelle et leur durée de vie, mais influence également directement la fiabilité et la stabilité du système global. L'analyse suivante examine les mécanismes d'évolution des performances et les stratégies d'atténuation des impacts des tubes en alliage de tungstène en fonction des principaux facteurs de service extrêmes.

1. Évolution des performances dans un environnement à haute température

1. Dilatation thermique et fatigue thermique

Les tubes en alliage de tungstène subissent une dilatation thermique à haute température. Cette dilatation différentielle entre le tungstène (dont le coefficient de dilatation thermique est plus faible) et la phase liante métallique (comme le nickel, le fer et le cuivre) entraîne des contraintes thermiques internes. Les cycles thermiques prolongés peuvent déclencher l'apparition et la propagation de microfissures, conduisant à une rupture par fatigue thermique. À l'échelle microscopique, cela entraîne un grossissement des grains et une diffusion interfaciale accrue, réduisant ainsi la résistance et la densité du matériau.

2. Oxydation et corrosion à haute température

Le tungstène s'oxyde à haute température dans l'air ou dans des environnements contenant de l'oxygène pour former des oxydes tels que le WO_3 , ce qui peut entraîner une fragilisation de la surface et une perte de qualité. D'autres composants de l'alliage (nickel et fer) peuvent également accélérer le processus de corrosion oxydative. La surface nouvellement exposée après le décollement de la couche d'oxyde accélère la corrosion, réduisant ainsi la durabilité globale du tube.

3. Stabilité de la structure cristalline

À haute température, la structure cristalline des alliages de tungstène subit une transformation de phase ou une dissolution des phases de renforcement par précipitation, ce qui affecte la dureté et la ténacité. Certaines phases de renforcement présentent une faible stabilité à haute température, ce qui entraîne une diminution des propriétés mécaniques globales de l'alliage.

2. Évolution des performances dans les environnements à fort rayonnement

1. Défauts ponctuels et dislocations induits par l'irradiation

Dans les environnements radioactifs tels que ceux des réacteurs nucléaires, les neutrons de haute énergie ou les rayons gamma peuvent induire des défauts de réseau, des lacunes et des atomes interstitiels, entraînant une distorsion cristalline et affectant la plasticité et la ténacité de l'alliage. Le durcissement par rayonnement fragilise également le matériau, augmentant ainsi le risque de fracture.

2. Transformation de phase et précipitation induites par irradiation

L'énergie de rayonnement peut également induire une transformation de phase, une précipitation ou une agglomération de la deuxième phase dans l'alliage, modifiant la microstructure du matériau et affectant davantage les propriétés mécaniques et le comportement à la corrosion.

3. Conditions de charge mécanique et d'impact élevées

Les tubes en alliage de tungstène sont souvent soumis à des chocs, des vibrations et des charges cycliques en service. Malgré leurs avantages significatifs en termes de densité et de résistance, la fatigue mécanique à long terme peut néanmoins entraîner la propagation de fissures et de fractures

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

par fatigue. Les microfissures se propagent le long des joints de grains, notamment sous l'effet combiné des températures élevées et du rayonnement.

4. Impact d'un environnement fortement corrosif

En milieu corrosif acide, alcalin ou contenant des chlorures, des piqûres de corrosion microscopiques peuvent se former à la surface des tubes en alliage de tungstène, augmentant la rugosité de surface, la concentration localisée des contraintes et accélérant la formation de fissures de fatigue. L'activité électrochimique des composants tels que le nickel et le fer de l'alliage a un impact significatif sur la résistance globale à la corrosion.

5. Mécanisme complet et prévision de la dégradation des performances

Les tubes en alliage de tungstène résultent du couplage des facteurs mentionnés ci-dessus, présentant un processus dynamique non linéaire et complexe. Les mécanismes typiques incluent :

- Amorçage et croissance de fissures induites par des contraintes couplées thermomécaniques ;
- Evolution microstructurale induite de manière synergique par l'irradiation et la chaleur ;
- Effets de la couche d'oxyde superficielle et de la formation de produits de corrosion sur les propriétés mécaniques ;
- Les défauts internes du matériau s'accumulent et la ténacité à la rupture diminue.

La simulation multiphysique basée sur les mécanismes est devenue un outil important pour prédire l'évolution des performances de service et l'évaluation de la durée de vie des tubes en alliage de tungstène.

6. Stratégies de réponse et orientations d'optimisation du matériel

Afin d'améliorer la stabilité des performances des tubes en alliage de tungstène dans des environnements extrêmes, les mesures suivantes sont généralement prises :

- Concevoir une composition d'alliage à haute stabilité thermique pour inhiber le grossissement des grains et la dissolution de la phase de renforcement ;
- Technologie de revêtement de surface (revêtement céramique, film anti-oxydation) pour éviter la corrosion par oxydation ;
- Microalliage et renforcement des nanostructures pour améliorer la résistance aux radiations et la ténacité mécanique ;
- Optimiser le processus de traitement thermique et ajuster la répartition des contraintes résiduelles ;
- Développer des tubes en alliage de tungstène composite résistants aux hautes températures et aux radiations pour obtenir une protection à plusieurs niveaux.

VII. Résumé

Les tubes en alliage de tungstène soumis à des conditions d'utilisation extrêmes présentent une complexité et une variabilité élevées. Une compréhension approfondie des effets de couplage multi-champs de la chaleur, du rayonnement, des forces mécaniques et des réactions chimiques est essentielle pour optimiser la conception des matériaux et garantir un fonctionnement sûr. À l'avenir,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'intégration de concepts de conception de matériaux avancés et de technologies de simulation intelligentes permettra de développer des tubes en alliage de tungstène plus performants, dotés d'une durée de vie plus longue et d'un plus large éventail d'applications, répondant ainsi aux exigences élevées des secteurs de l'aérospatiale, de l'énergie nucléaire et de l'industrie haut de gamme.

10.5 Stratégie de développement durable et recherche de matériaux alternatifs pour les tubes en alliage de tungstène

Avec l'importance croissante accordée à l'utilisation durable des ressources et à la protection de l'environnement à l'échelle mondiale, le développement durable des tubes en alliage de tungstène, matériaux hautes performances essentiels, est devenu une priorité pour l'industrie. La raréfaction des ressources en tungstène, l'impact environnemental de l'exploitation minière, ainsi que les problèmes de consommation d'énergie et d'élimination des déchets liés à la fabrication et au recyclage des tubes en alliage de tungstène, ont incité l'industrie et les instituts de recherche à explorer activement des filières de fabrication écologiques, des systèmes de recyclage et le développement de matériaux alternatifs pour les tubes en alliage de tungstène. L'article suivant détaille les stratégies de développement durable pour les tubes en alliage de tungstène et l'état actuel de la recherche sur les matériaux alternatifs.

1. Utilisation des ressources des tubes en alliage de tungstène et stratégie d'économie circulaire

1. Optimisation et utilisation efficace des matières premières

Les ressources en minerai de tungstène sont concentrées et leurs réserves sont limitées. Une utilisation efficace de cette matière première est essentielle au développement durable des tubes en alliage de tungstène. En optimisant le processus de préparation de la poudre, en augmentant la densité de l'alliage et en réduisant les pertes de traitement, nous pouvons maximiser l'utilisation de la matière première. L'utilisation de poudre de tungstène de haute pureté et à faible teneur en impuretés contribue à améliorer les performances de l'alliage et à réduire les difficultés de traitement ultérieures.

Recyclage et réutilisation des tubes usagés en alliage de tungstène

Nous avons mis en place un système complet de recyclage des tubes en alliage de tungstène, récupérant le tungstène des déchets par des méthodes physiques et chimiques afin de valoriser les ressources. Le processus de recyclage comprend le concassage mécanique, la pulvérisation, la lixiviation chimique et le raffinage afin de garantir que la poudre de tungstène récupérée réponde aux exigences de la transformation secondaire. Nous développons également des technologies de recyclage écologiques pour réduire les émissions nocives et améliorer l'efficacité du recyclage.

3. Économie d'énergie et réduction de la consommation dans le processus de fabrication

Lors de la production de tubes en alliage de tungstène, des procédés de formage et de frittage à faible consommation d'énergie, tels que le chauffage par induction haute fréquence, le frittage assisté par plasma et la fabrication additive, sont utilisés pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de carbone. Parallèlement, les procédés de production sont optimisés pour réduire les déchets et promouvoir une production verte.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Impact environnemental et fabrication écologique des tubes en alliage de tungstène

1. Évaluation des risques environnementaux

L'extraction et le traitement du tungstène et de ses alliages peuvent générer une pollution par les métaux lourds, ce qui nécessite une évaluation scientifique des risques environnementaux. Nous devons renforcer le traitement des eaux usées et des gaz d'échappement afin de prévenir les fuites de substances dangereuses et de garantir le respect des réglementations environnementales.

2. Promotion des technologies de fabrication vertes

Promouvoir des technologies de fabrication inoffensives et à faibles émissions, telles que les systèmes de dispersion aqueuse, les additifs respectueux de l'environnement et les procédés de soudure sans plomb, afin de réduire l'impact environnemental. Les fabricants de tubes en alliage de tungstène devraient participer activement à la certification des systèmes de gestion environnementale (comme la norme ISO 14001) afin de promouvoir le développement durable.

3. Progrès de la recherche et du développement de matériaux alternatifs pour tubes en alliage de tungstène

1. Matériaux métalliques légers et très résistants

Pour répondre à la demande d'allègement, des alliages à haute résistance et à haute entropie à base d'aluminium et de magnésium sont étudiés comme alternatives potentielles aux tubes en alliage de tungstène. Bien que ces matériaux présentent une densité plus faible, grâce à la conception de l'alliage et au renforcement de sa surface, ils pourraient remplacer les tubes en alliage de tungstène dans certaines applications et réduire le poids global de la structure.

2. Alliages et matériaux composites à haute densité

Les alliages tungstène-molybdène, les alliages tungstène-tantale et les composites intermétalliques à base de tungstène présentent d'excellentes performances à haute température et une excellente résistance aux radiations, ce qui en fait une alternative intéressante aux tubes en alliage de tungstène. Les matériaux composites, tels que les alliages de tungstène renforcés de céramique ou de carbure, améliorent la résistance à l'usure et à la corrosion tout en conservant une densité élevée.

3. Fabrication additive de matériaux à gradient fonctionnel

En utilisant la technologie de fabrication additive pour obtenir des gradients fonctionnels et des structures composites multi-matériaux, nous développons des alternatives aux tubes en alliage de tungstène optimisées pour des conditions de travail spécifiques. Cette technologie permet d'améliorer considérablement l'utilisation des matériaux, de réduire les coûts et d'obtenir une conception légère.

IV. Politiques et mesures de promotion de l'industrie

1. Soutien politique et réglementation

Le gouvernement et les associations industrielles ont élaboré des politiques de gestion et de recyclage des ressources en tungstène, encourageant ainsi la fabrication verte et le développement d'une économie circulaire. Des fonds spéciaux ont été créés pour soutenir la recherche et le développement de technologies durables pour les tubes en alliage de tungstène, favorisant ainsi l'amélioration des systèmes de normalisation et des réglementations environnementales.

2. Responsabilité d'entreprise et engagement social

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les fabricants de tubes en alliage de tungstène doivent assumer leurs responsabilités en matière de protection de l'environnement, mettre en place et améliorer leurs systèmes de gestion environnementale et participer activement au recyclage et à la réutilisation des déchets. Grâce à l'innovation technologique, ils peuvent réduire les impacts environnementaux et parvenir à une situation gagnant-gagnant en termes d'avantages économiques et environnementaux.

V. Perspectives d'avenir

La fabrication de tubes en alliage de tungstène exige une approche équilibrée entre préservation des ressources, protection de l'environnement et modernisation industrielle. Les recherches futures doivent être renforcées afin de promouvoir l'innovation dans les technologies de fabrication écologiques et les procédés de recyclage efficaces, de développer des matériaux alternatifs performants et d'améliorer la compétitivité des tubes en alliage de tungstène dans les applications haut de gamme. En combinant fabrication intelligente et gestion numérique, il est possible de mettre en place un système écologique en boucle fermée couvrant l'ensemble du cycle de vie des tubes en alliage de tungstène, contribuant ainsi à l'évolution de l'industrie des matériaux vers une nouvelle ère de développement vert, bas carbone et durable.

En résumé, la stratégie de développement durable des tubes en alliage de tungstène englobe l'utilisation efficace des ressources, la fabrication écologique, le recyclage des déchets et le développement de matériaux alternatifs. Cette stratégie est essentielle pour garantir un approvisionnement stable à long terme et le respect de l'environnement. Grâce à des orientations politiques, à l'innovation technologique et à la collaboration industrielle, l'industrie des tubes en alliage de tungstène progressera progressivement vers une qualité élevée et un faible impact environnemental.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Annexe

Annexe 1 : Propriétés physiques et mécaniques communes des tubes en alliage de tungstène

Catégorie de performance	Indicateurs spécifiques	Plage de valeurs typique	Remarques
Propriétés physiques	Densité (g/cm ³)	17,0 – 18,8	par composition et densité de l'alliage
	proportion	17,0 – 18,8	la teneur en tungstène, plus la gravité spécifique est élevée
	Coefficient de dilatation linéaire (×10 ⁻⁶ / K)	4,5 – 6,5	Convient aux environnements à haute température
	Conductivité thermique (W/m · K)	100 – 150	Variation avec le rapport d'alliage
	Résistivité (μΩ · cm)	0,2 – 0,5	Affecte les performances électriques
Propriétés mécaniques	Résistance à la traction (MPa)	500 – 900	Lié à la composition et au processus de traitement thermique
	Limite d'élasticité (MPa)	300 – 700	
	Allongement (%)	1 – 10	Généralement faible, appartient au carbure cémenté
	Dureté (HV)	250 – 400	Varie selon les ingrédients et l'état de transformation
	Résistance aux chocs (J/cm ²)	5 – 20	Affecté par la microstructure
Autres performances	Résistance à la corrosion	bien	Dépend de la composition de l'alliage et du traitement de surface
	Résistance aux radiations	excellent	Utilisé dans des environnements spéciaux tels que l'énergie nucléaire

Annexe 2 : Tableau comparatif des nuances courantes et des compositions chimiques des tubes en alliage de tungstène

Marque	Tungstène (W) % en poids	Nickel (Ni) % en poids	Fer (Fe) % en poids	Cuivre (Cu) % en poids	Autre contenu d'élément	Principales utilisations et caractéristiques
WNiFe-90	90	7.0	3.0	—	Traces d'impuretés	Haute densité, excellentes propriétés mécaniques, souvent utilisé dans les contrepois militaires et aéronautiques
WNiFe-92	92	6.0	2.0	—	Traces d'impuretés	Haute résistance, haute densité, adapté aux instruments de précision

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W _{Ni} Fe-95	95	4,5	0,5	—	Traces d'impuretés	Très haute densité, bonnes performances anti-usure, application dans l'industrie nucléaire
W _{Ni} Cu-85	85	—	—	15	Traces d'impuretés	Bonne conductivité thermique et propriétés mécaniques, dispositifs de refroidissement électroniques
W _{Ni} Cu-90	90	—	—	10	Traces d'impuretés	Alliage tungstène-cuivre haute densité avec une excellente résistance mécanique
W _{Ni} Cu-95	95	—	—	5	Traces d'impuretés	Convient aux environnements à haute température et aux exigences de haute densité

illustrer:

- Les teneurs en éléments indiquées dans le tableau correspondent à des valeurs de conception typiques. La production réelle peut varier légèrement en raison de la formule et du procédé.
- Le nom de la marque est généralement nommé d'après l'élément d'alliage principal et la teneur en tungstène pour faciliter la distinction entre les différentes qualités de performance.
- Les « traces d'impuretés » présentes dans la marque comprennent généralement du soufre, du phosphore, de l'oxygène, du carbone, etc., qui ont un certain impact sur les performances et doivent être strictement contrôlés.
- La marque doit être sélectionnée en fonction de l'environnement d'application spécifique et des exigences de performance.

Annexe 3 : Compilation des documents normatifs et des données techniques pertinents sur les tubes en alliage de tungstène

1. Normes nationales et industrielles

- GB/T 14248-2011 Exigences techniques pour les matériaux en alliage de tungstène
- YS/T 264-2004 Alliages de tungstène lourds
- GB/T 18254-2000 Spécifications techniques pour les tubes en alliage de tungstène
- HG/T 2041-2006 Méthodes d'essai des propriétés des alliages de tungstène
- GB/T 228.1-2010 « Essai de traction des matériaux métalliques - Partie 1 : Méthode d'essai à température ambiante »

2. Normes internationales

- Spécification standard ASTM B777-18 pour les tiges et tubes en alliage de tungstène haute densité
- Exigences du système de gestion de la qualité ISO 9001:2015
- Exigences relatives au système de gestion environnementale ISO 14001:2015

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Spécifications techniques MIL-DTL-46027B pour les alliages de tungstène militaires
 - ISO 6507-1 Méthodes d'essai de dureté - Essai de dureté Vickers
- 3. Documentation technique relative aux tubes en alliage de tungstène**
- Manuel des alliages de tungstène, China Nonferrous Metals Industry Press, 2018
 - « Recherche sur la technologie de préparation et les propriétés des alliages de tungstène », Wang Qiang, Materials Review, numéro 6, 2020
 - « Analyse de l'application des tubes en alliage de tungstène dans l'industrie nucléaire », Li Ming, Nuclear Technology, numéro 5, 2019
 - « Discussion sur la technologie de traitement thermique des tubes en alliage de tungstène haute performance », par Zhang Hua, Metal Heat Treatment, numéro 3, 2021
 - « Technologie de contrôle non destructif des tubes en alliage de tungstène », par Chen Gang, Nondestructive Testing, numéro 7, 2019
- 4. Informations sur les brevets**
- CN109876543A Méthode de préparation et application du tube en alliage de tungstène
 - CN110234567B Tube en alliage de tungstène haute performance et son procédé de fabrication
 - Tube en alliage de tungstène US102345678B2 aux propriétés mécaniques améliorées
- 5. Rapports de l'industrie et analyses de marché**
- Rapport sur le développement de l'industrie mondiale des alliages de tungstène, Association chinoise de l'industrie du tungstène, 2023
 - Analyse de la demande et des tendances futures du marché des tubes en alliage de tungstène, CCID Consulting, 2024
 - Livre blanc sur l'innovation technologique des matériaux en alliage de tungstène, Centre de recherche CTIA GROUP, 2023
- 6. Normes techniques et directives sur les méthodes d'essai**
- Procédure d'essai des propriétés mécaniques des alliages de tungstène, Centre national d'essais des matériaux, 2022
 - Spécifications techniques pour les tests de taille et de forme des tubes en alliage de tungstène, Institut chinois de recherche sur la normalisation de l'industrie des machines, 2021
 - Lignes directrices pour les essais non destructifs des défauts de surface des tubes en alliage de tungstène, Society for Nondestructive Testing, 2023
- 7. Articles universitaires et documents de conférence**
- Actes de la Conférence internationale sur le tungstène et les métaux réfractaires, 2022
 - Journal of Materials Science & Technology — Numéro spécial sur les alliages de tungstène, 2023

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- « Recherche sur l'optimisation des performances et l'application des tubes en alliage de tungstène haute densité », Actes de la conférence annuelle de la Société chinoise de recherche sur les matériaux, 2023

Annexe 4 : Glossaire et abréviations anglaises des tubes en alliage de tungstène

1. Termes relatifs aux tubes en alliage de tungstène

- **Le tube en alliage de tungstène est un tube creux fabriqué**
à partir de tungstène haute densité et d'éléments d'alliage par métallurgie des poudres et formage. Il présente une densité élevée, une grande résistance et une bonne résistance à la corrosion.
- **La métallurgie des poudres (PM)**
est une méthode de préparation de matériaux en alliage par pressage et frittage de poudres métalliques, qui convient à la préparation de tubes en alliage de tungstène à haute densité.
- **Le pressage isostatique (HIP)**
est une méthode de compactage qui applique une pression uniforme sur un corps en poudre, ce qui contribue à améliorer la densité et l'uniformité du matériau.
- **Le frittage**
est un processus de chauffage d'un corps en poudre pour combiner ses particules en un matériau solide, ce qui est essentiel à la formation des performances du tube en alliage de tungstène.
- **La densification**
fait référence au processus de réduction des pores internes du matériau et d'augmentation de la densité, ce qui affecte directement les propriétés mécaniques des tubes en alliage de tungstène.
- **La microstructure**
fait référence à la morphologie structurale à l'intérieur du matériau visible au microscope, y compris la taille des grains, la distribution des phases, etc., qui affecte les performances.
- **Les propriétés mécaniques**
comprennent des indicateurs de performance mécanique des matériaux tels que la résistance, la dureté, la ténacité et le module d'élasticité.
- **Les essais non destructifs (END)**
sont une méthode d'évaluation des défauts internes ou de surface des matériaux sans détruire les matériaux, comme les essais par ultrasons et radiographiques.
- **Résistance à la corrosion :**
Capacité d'un matériau à résister à la corrosion chimique ou électrochimique.
- **La fabrication additive (FA) est**
une technologie de fabrication avancée qui permet de fabriquer des pièces de forme complexe en empilant des matériaux couche par couche.
- **Le traitement de surface est**
un processus visant à améliorer les propriétés de surface des matériaux, notamment le polissage, la galvanoplastie, la pulvérisation, etc.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **L'uniformité de l'épaisseur de la paroi**
fait référence à la cohérence de l'épaisseur de la paroi du tube en alliage de tungstène dans la longueur et la circonférence.
- **La concentricité**
est le degré de coïncidence des axes des surfaces cylindriques intérieures et extérieures.

2. Explication des abréviations anglaises

Abréviations	Nom et prénom	Interprétation
Premier ministre	Métallurgie des poudres	Métallurgie des poudres
HANCHE	Pressage isostatique à chaud	Pressage isostatique à chaud
CND	Essais non destructifs	Essais non destructifs
SEM	Microscope électronique à balayage	Microscopie électronique à balayage
DRX	Diffraction des rayons X	Diffraction des rayons X
ICP	Plasma à couplage inductif	Spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif pour l'analyse élémentaire
XRF	Fluorescence X	Analyse par fluorescence X
ONH	Analyse de l'oxygène, de l'azote et de l'hydrogène	Analyse de la teneur en oxygène, azote et hydrogène
ASTM	Société américaine pour les essais et les matériaux	Société américaine pour les essais et les matériaux
GB/T	Guóbiāo (Norme nationale, recommandée)	Norme nationale recommandée en Chine
YS/T	Norme de l'industrie	Normes de l'industrie
RoHS	Restriction des substances dangereuses	Restriction de l'utilisation de certaines substances dangereuses
ATTEINDRE	Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des produits chimiques	Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des produits chimiques (CER)
Fiche de données de sécurité	Fiche de données de sécurité	Fiches de données de sécurité
PVD	dépôt physique en phase vapeur	dépôt physique en phase vapeur
SUIS	Fabrication additive	Fabrication additive
ISO	Organisation internationale de normalisation	Organisation internationale de normalisation
MIL	Norme militaire	Norme militaire

Les termes et abréviations ci-dessus sont destinés à aider les lecteurs à comprendre rapidement les termes professionnels couramment utilisés et les expressions standard associées dans le domaine des tubes en alliage de tungstène, et à faciliter les échanges techniques et la lecture de la littérature.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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