

Qu'est-ce que l'alliage tungstène-nickel-cuivre

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

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Table des Matières

Chapitre 1 Présentation Générale de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

1.1 Définition et Classification de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

1.1.1 Gamme de Composition du Système Ternaire

1.1.2 Classification par Densité et Association avec les Applications

1.2 Histoire du Développement de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

1.2.1 Origine et Recherches Préliminaires

1.2.2 Période Motivée par les Applications Militaires

1.2.3 Application à Grande Échelle dans l'Industrie Électronique Moderne

Chapitre 2 Microstructure de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

2.1 Caractéristiques Microstructurales de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

2.1.1 Distribution des Particules de Tungstène

2.1.2 Distribution de la Phase Liante Ni-Cu

2.1.3 Mécanisme de Formation du Col de Frittage

2.2 Microstructure et Caractéristiques d'Interface de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

2.2.1 Résistance de Liaison à l'Interface Tungstène-Phase Liante

2.2.2 Effets des Éléments Traces sur l'Interface

2.3 Évolution Microstructurale de l'Alliage W-Ni-Cu

2.3.1 Loi de Croissance des Grains pendant le Frittage

2.3.2 Régulation de la Microstructure par Traitement Thermique

Chapitre 3 Propriétés Physiques et Chimiques de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

3.1 Propriétés Mécaniques de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

3.1.1 Résistance à la Traction à Température Ambiante

3.1.2 Allongement

3.1.3 Résistance à Haute Température

3.1.4 Ténacité aux Chocs

3.2 Propriétés Thermiques et Électriques de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

3.2.1 Conductivité Thermique

3.2.2 Conductivité Électrique

3.2.3 Coefficient de Dilatation Thermique

3.2.4 Performance de Dissipation de la Chaleur

3.3 Stabilité Chimique de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

3.3.1 Résistance à la Corrosion

3.3.2 Propriétés Antioxydantes

3.4 Fiche de Sécurité des Matières Dangereuses (MSDS) de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre de CTIA GROUP LTD

Chapitre 4 Essais de Performance et Normes de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

4.1 Méthode d'Analyse de la Composition de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

4.1.1 Technologie d'Analyse Spectrale

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 4.1.2 Détection des Éléments Impurs
- 4.2 Méthode d'Essai de Performance de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre
 - 4.2.1 Essai de Densité et de Compacité
 - 4.2.2 Essai de Résistance à la Traction et de Résistance au Dépassement de Limite d'Élasticité
 - 4.2.3 Essai de Ductilité
 - 4.2.4 Essai de Ténacité
 - 4.2.5 Essai de Performance Thermique
 - 4.2.6 Essai de Performance Électrique
 - 4.2.7 Essai de Performance Chimique
- 4.3 Système de Normes de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre
 - 4.3.1 Norme Nationale Chinoise pour l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre
 - 4.3.2 Normes Internationales pour les Alliages Tungstène-Nickel-Cuivre
 - 4.3.3 Normes des Alliages Tungstène-Nickel-Cuivre en Europe, Japon, Corée du Sud et Autres Pays du Monde

Chapitre 5 Technologie de Préparation de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

- 5.1 Prétraitement des Matériaux Bruts
 - 5.1.1 Sphéroidisation de la Poudre de Tungstène et Contrôle de la Taille des Particules
 - 5.1.2 Traitement de Surface de la Poudre de Nickel-Cuivre
- 5.2 Procédé de Métallurgie des Poudres
 - 5.2.1 Paramètres du Procédé de Mélange de Poudres
 - 5.2.2 Technologie de Pressage
 - 5.2.3 Procédé de Frittage en Phase Liquide
- 5.3 Technologie de Préparation Avancée
 - 5.3.1 Moulage par Injection Métallique
 - 5.3.2 Technologie de Pressage Isostatique à Chaud
- 5.4 Post-Traitement et Traitement
 - 5.4.1 Usinage de Précision
 - 5.4.2 Procédé de Traitement de Surface

Chapitre 6 Application de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre dans le Domaine de l'Information Électronique

- 6.1 Emballage de Puces et Dissipation de la Chaleur
 - 6.1.1 Substrat de Dissipation de la Chaleur pour Dispositifs à Haute Puissance
 - 6.1.2 Radiateur à Contrepoids pour Module RF 5G
- 6.2 Équipements à Micro-ondes et Radars
 - 6.2.3 Ensemble de Poids d'Antenne
 - 6.2.4 Composants de Blindage Radar
- 6.3 Systèmes Microélectromécaniques
 - 6.3.1 Contrepoids de Capteur Inertiel
 - 6.3.2 Composants de Micro-équilibrage

Chapitre 7 Application de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre dans le Domaine de l'Énergie et de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

I'Industrie

- 7.1 Domaine des Véhicules à Énergie Nouvelle
 - 7.1.1 Poids du Rotor du Moteur
 - 7.1.2 Substrat de Dissipation de la Chaleur pour Pack de Batteries
- 7.2 Solutions de Refroidissement Industriel
 - 7.2.1 Base de Refroidissement de Serveur
 - 7.2.2 Substrat d'Emballage de Semi-conducteurs de Puissance

Chapitre 8 Application de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre dans le Domaine de la Défense et de l'Industrie Militaire

- 8.1 Équipements de Contre-Mesures Électroniques
 - 8.1.1 Ensemble de Poids de Contre-Mesures
 - 8.1.2 Composants de Décoyage Radar
- 8.2 Système de Munitions
 - 8.2.1 Contrepoids de Tête de Projectile
 - 8.2.2 Composants d'Équilibrage de Tête de Missile
- 8.3 Blindage et Équipements de Protection
 - 8.3.1 Renforcements de Plaques de Blindage Léger
 - 8.3.2 Revêtements de Protection de Véhicules Blindés
- 8.4 Armes Spatiales
 - 8.4.1 Composants de Tuyère de Moteur à Fusée
 - 8.4.2 Contrepoids de Contrôle d'Attitude de Navette Spatiale

Chapitre 9 Application de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre dans le Domaine Médical

- 9.1 Équipements de Radiothérapie
 - 9.1.1 Ensemble de Blindage de Radiothérapie
 - 9.1.2 Composants de Collimateur de Rayonnement
- 9.2 Équipements d'Imagerie Diagnostique
 - 9.2.1 Pièces de Protection de Détecteur CT
 - 9.2.2 Contrepoids d'Équipements IRM
- 9.3 Instruments Chirurgicaux
 - 9.3.1 Composants de Positionnement de Navigation Chirurgicale à Haute Précision
 - 9.3.2 Composants Guide de Dispositifs d'Intervention Minimale Invasive
- 9.4 Dispositifs d'Assistance à la Réadaptation
 - 9.4.1 Composants de Poids d'Artificiales d'Articulation
 - 9.4.2 Pièces de Réglage d'Équilibrage pour Équipements de Réadaptation

Chapitre 10 Comparaison entre l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre et Autres Matériaux

- 10.1 Analyse des Matériaux Concurrents de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre
 - 10.1.1 Comparaison avec l'Alliage Tungstène-Nickel-Fer
 - 10.1.2 Comparaison avec l'Alliage Cuivre-Tungstène
- 10.2 Recherche et Développement de Technologies de Pointe pour l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre
 - 10.2.1 Alliages Nanostructurés

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.2.2 Matériaux Gradués Fonctionnels

10.3 Technologie de Fabrication Verte de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

10.3.1 Procédé de Préparation Écologique

10.3.2 Technologie de Recyclage des Déchets

Chapitre 11 Problèmes Courants et Solutions de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

11.1 Procédé de Préparation de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

11.1.1 Solutions aux Défauts de Frittage

11.1.2 Contrôle de l'Uniformité de la Composition

11.2 Analyse des Défaillances d'Application de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

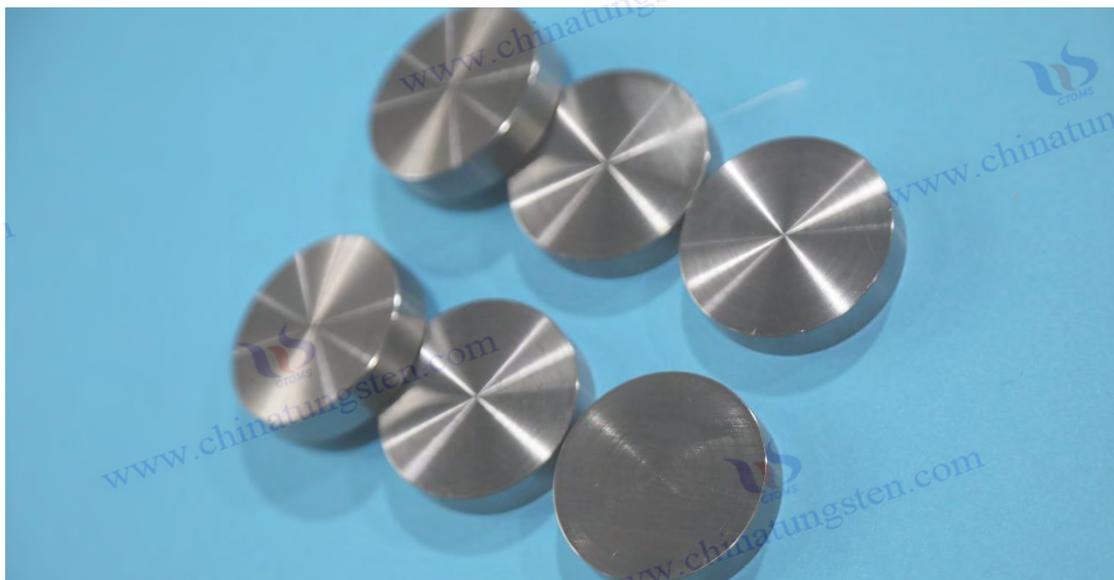
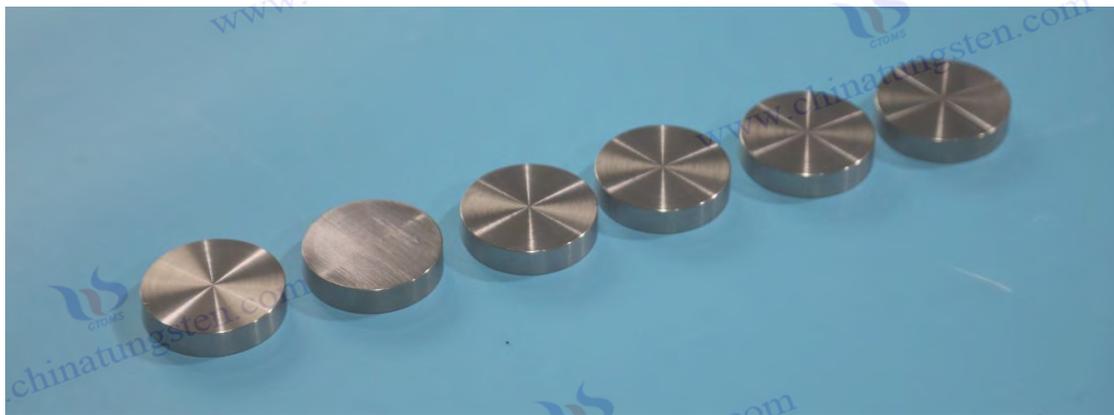
11.2.1 Solutions aux Défaillances par Cycles Thermiques

11.2.2 Protection contre la Corrosion Environnementale

Annexe :

Terminologie de l'Alliage Tungstène-Nickel-Cuivre

Références



CTIA GROUP LTD Alliage de tungstène nickel cuivre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

High Density: Typically 16.5 - 18.75 g/cm³

High Thermal Conductivity: Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

5. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten-alloy.com



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Chapitre 1 Présentation de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un alliage haute densité dont le tungstène est le composant principal et le nickel et le cuivre constituent la phase de liaison. Il est largement utilisé dans les secteurs aéronautique, médical, des instruments de précision et militaire grâce à sa densité élevée (16,5-18,5 g/cm³), ses excellentes propriétés mécaniques (résistance à la traction de 700 à 900 MPa, allongement de 5 à 15 %), son amagnétisme et sa bonne résistance à la corrosion. Comparé à l'alliage tungstène-nickel-fer, l'alliage tungstène-nickel-cuivre présente des propriétés amagnétiques grâce à l'ajout de cuivre, ce qui lui confère une excellente performance dans les environnements sensibles aux champs électromagnétiques tout en conservant une densité et une usinabilité élevées.

1.1 Définition et classification de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un alliage à base de tungstène haute densité, élaboré par métallurgie des poudres. Il est principalement composé de tungstène (généralement 85 à 97 % en masse), avec du nickel et du cuivre comme phases de liaison, ce qui lui confère une densité élevée, une résistance élevée et de bonnes propriétés de mise en œuvre. Ses principales caractéristiques sont son amagnétisme, une excellente conductivité thermique (120 à 150 W / m · K) et un faible coefficient de dilatation thermique (4,5 à 6,0 × 10⁻⁶ / °C), ce qui lui confère une excellente performance dans les applications nécessitant des contrepoids haute densité ou des protections contre les radiations. Les alliages tungstène-nickel-cuivre peuvent être classés en différents types selon leur teneur en tungstène, leur rapport nickel-cuivre et leurs exigences de performance. Ils sont généralement classés par densité ou par domaine d'application. Nous analysons ci-dessous en détail la composition de son système ternaire et la corrélation entre la classification par densité et son application.

1.1.1 Gamme de composition du système ternaire

L' alliage tungstène-nickel-cuivre est principalement composé de tungstène (W), de nickel (Ni) et de cuivre (Cu). Le rapport de ces trois éléments influence directement la densité, les propriétés mécaniques et les caractéristiques d'application de l'alliage. Le tungstène, élément de forte densité (19,25 g/cm³), est le principal composant de l'alliage, représentant généralement 85 à 97 % de la fraction massique. Le nickel et le cuivre, en tant que phases de liaison, comblent les espaces entre les particules de tungstène, améliorent la ténacité et les propriétés de mise en œuvre de l'alliage, et réduisent sa dureté (dureté Vickers 250-350 HV), le rendant plus facile à mettre en œuvre que le tungstène pur (dureté > 400 HV). La composition typique de l'alliage tungstène-nickel-cuivre est : 85 à 97 % de tungstène, 2 à 10 % de nickel et 1 à 8 % de cuivre. Le rapport spécifique est ajusté en fonction des exigences de l'application.

En production réelle, la teneur en tungstène détermine la densité et la résistance de l'alliage. Par exemple, le 90W-7Ni-3Cu (90 % tungstène, 7 % nickel, 3 % cuivre) est une formule courante avec une densité d'environ 17,0 g/cm³ et une résistance à la traction d'environ 750-850 MPa, ce qui convient aux contrepoids aéronautiques. En augmentant la teneur en tungstène à 95W-3,5Ni-1,5Cu, on atteint une densité de 18,0 g/cm³ et une résistance de 800-900 MPa, ce qui est idéal pour la protection contre les radiations médicales. Le nickel améliore la ténacité et la résistance à la corrosion, et sa résistance à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'oxydation (formant une couche protectrice de NiO) permet à l'alliage de bien fonctionner en environnements humides ou chimiques. L'ajout de cuivre améliore non seulement la ténacité, mais rend également l'alliage amagnétique (le cuivre est un matériau paramagnétique), ce qui le rend supérieur aux alliages tungstène-nickel-fer dans les environnements électromagnétiquement sensibles (comme les équipements d'IRM). La conductivité thermique du cuivre (environ 400 W/ m· K) améliore également la conductivité thermique de l'alliage, ce qui lui confère un avantage dans les situations où une dissipation rapide de la chaleur est requise (comme les blocs d'équilibrage des machines de photolithographie).

Le choix du ratio de composition doit concilier performance et coût. Plus la teneur en tungstène est élevée, plus la densité et la résistance sont élevées, mais la difficulté de mise en œuvre augmente et la raréfaction des ressources en tungstène entraîne une hausse des coûts. Le ratio nickel/cuivre doit être contrôlé avec précision. Une teneur trop élevée en nickel peut augmenter le risque de sensibilisation (les applications médicales doivent satisfaire aux tests de biocompatibilité ISO 10993), tandis qu'une teneur trop élevée en cuivre peut réduire la résistance. En production, l'alliage est préparé par métallurgie des poudres. Le nickel et le cuivre forment une phase liquide lors du frittage, ce qui favorise la liaison des particules de tungstène et permet d'atteindre une densité supérieure à 99,5 %. Le contrôle qualité utilise la spectroscopie de fluorescence X (XRF) ou la spectroscopie d'émission atomique à plasma inductif (ICP-AES) pour analyser la composition et garantir une précision de $\pm 0,5$ % pour le tungstène, $\pm 0,2$ % pour le nickel et $\pm 0,2$ % pour le cuivre. L'analyse de la microstructure (MEB-EDS) vérifie en outre la répartition uniforme des particules de tungstène et l'intégrité de la phase de liaison afin d'éviter la formation de pores ou d'inclusions susceptibles d'altérer les performances. L'ajustement de la composition (par exemple, en augmentant la teneur en nickel à 8 % pour améliorer la ténacité) peut répondre aux exigences spécifiques d'applications, telles que les contrepoids d'instruments de précision ou les pièces de blindage militaire.

1.1.2 Classification de la densité et association d'application

L'alliage tungstène-nickel-cuivre constitue une base importante pour sa classification et ses applications. Il est généralement divisé en différentes nuances selon sa teneur en tungstène, avec une densité comprise entre 16,5 g/cm³ et 18,5 g/cm³, correspondant à différents scénarios d'application. La classification par densité affecte directement l'effet de pondération, les performances de blindage et les propriétés mécaniques de l'alliage, et est étroitement liée aux besoins spécifiques des secteurs de l'aérospatiale, de la médecine, des instruments de précision et de l'armée. Les normes internationales telles que ASTM B777 et ISO 20886 classent les alliages à base de tungstène en plusieurs nuances selon leur densité. Les alliages tungstène-nickel-cuivre sont généralement divisés en classe 1 (16,5-17,0 g/cm³), classe 2 (17,0-17,5 g/cm³), classe 3 (17,5-18,0 g/cm³) et classe 4 (18,0-18,5 g/cm³), et chaque nuance correspond à des performances et des applications spécifiques.

Les nuances à faible densité (formule typique 90W-7Ni-3Cu) conviennent aux applications exigeant une densité modérée et une ténacité élevée, comme les contrepoids aéronautiques (ailerons d'avion ou rotors d'hélicoptère). Leur densité plus faible (par rapport aux alliages à haute teneur en tungstène) réduit les coûts de matériaux tout en maintenant une résistance à la traction de 750 à 850 MPa et un allongement de 10 à 15 %, ce qui les rend adaptées aux pièces soumises aux vibrations ou aux chocs. Lors de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

transformation, les alliages de classe 1 sont formés par frittage en phase liquide et usinage (CNC ou EDM) pour répondre aux exigences de haute précision de l'aéronautique.

Les nuances de densité moyenne (formule typique 93W-5Ni-2Cu ou 95W-3,5Ni-1,5Cu) sont largement utilisées dans les domaines médicaux et des instruments de précision. Dans les équipements médicaux de tomographie et d'IRM, les alliages de classe 2/3 sont utilisés pour le blindage des composants, absorbant efficacement les rayons X et gamma (le tungstène a un numéro atomique élevé $Z = 74$) afin de protéger le personnel et les équipements. Ses propriétés magnétiques garantissent qu'il n'interfère pas avec le champ magnétique de l'IRM, ce qui est supérieur à celui des alliages tungstène-nickel-fer. Sa résistance à la traction de 800 à 900 MPa et sa conductivité thermique (120 à 140 W/ m· K) le rendent adapté aux environnements à haute température ou dynamiques, tels que les collimateurs des équipements de radiothérapie. Le traitement utilise un pressage isostatique à chaud pour garantir une densité supérieure à 99,5 %, et les revêtements de surface (tels que le PVD TiN) améliorent la résistance à la corrosion et à l'usure.

Les nuances haute densité (formule typique 97W-2Ni-1Cu) sont utilisées dans les instruments militaires et de précision haut de gamme, tels que les noyaux de projectiles perforants ou les blocs d'équilibrage de plateformes photolithographiques. Leur haute densité offre une énergie cinétique ou un effet de contrepoids extrêmement élevés, et leur résistance à la traction de 850 à 900 MPa assure une résistance extrême aux contraintes. Leur usinage est plus complexe et nécessite des outils CBN ou un micro-usinage laser. Le contrôle qualité vérifie les écarts de densité et la porosité conformément à la norme ASTM B777 afin de garantir des performances constantes.

L'optimisation de la classification de la densité et de l'association des applications doit tenir compte de l'équilibre entre coût et performance. Les nuances à haute densité sont plus onéreuses (teneur élevée en tungstène), mais adaptées aux exigences de haute performance ; les nuances à faible densité sont plus économiques et adaptées à la production à grande échelle. La fabrication additive (comme la SLM) permet de réaliser des productions personnalisées de formes complexes et de réduire les coûts de traitement. À l'avenir, le développement de nouveaux ratios nickel-cuivre ou l'ajout d'oligo-éléments (comme le cobalt) permettront d'optimiser davantage la densité et la ténacité et d'élargir le champ d'application.

1.2 Historique du développement de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

L' alliage tungstène-nickel-cuivre est largement utilisé dans les secteurs aérospatial, militaire, médical et électronique grâce à ses excellentes propriétés physiques et chimiques. Son développement a connu plusieurs étapes, de la recherche fondamentale à l'application militaire, puis à son application à grande échelle dans l'industrie électronique moderne. Les avancées technologiques et la demande du marché à chaque étape ont favorisé l'optimisation des performances et le développement des applications de l'alliage tungstène-nickel-cuivre, ce qui en fait un matériau incontournable dans le domaine des hautes technologies. Cette section détaille l'origine et les premières recherches sur l'alliage tungstène-nickel-cuivre, la période de développement des applications militaires et le processus de développement des applications à grande échelle dans l'industrie électronique moderne, en s'appuyant sur une technologie et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

un historique fiables, évitant ainsi l'interférence de données peu fiables.

1.2.1 Origine et premières recherches

L'alliage tungstène-nickel-cuivre remonte au début du XXe siècle, avec l'essor des recherches sur les alliages haute densité à base de tungstène. Le tungstène est considéré comme un choix idéal pour la fabrication de matériaux hautes performances en raison de sa densité élevée ($19,25 \text{ g/cm}^3$) et de son point de fusion élevé ($3\,422 \text{ °C}$). Cependant, la fragilité et la difficulté de mise en œuvre du tungstène pur limitent son application. Les premières recherches se sont concentrées sur l'amélioration des propriétés mécaniques et de l'usinabilité du tungstène par l'ajout d'une phase liante. L'introduction du nickel et du cuivre comme phase liante découle de leur capacité à former une phase liquide à haute température, favorisant la liaison des particules de tungstène tout en réduisant la dureté de l'alliage et en améliorant sa ténacité.

Des années 1930 aux années 1950, les progrès de la métallurgie des poudres ont jeté les bases du développement des alliages tungstène-nickel-cuivre. Les chercheurs ont découvert que, grâce au frittage en phase liquide, le nickel et le cuivre peuvent former une phase de liaison uniforme entre les particules de tungstène, améliorant ainsi significativement la densité ($> 99,5 \%$) et les propriétés mécaniques de l'alliage. Les premières expériences ont principalement exploré les effets de différents rapports nickel-cuivre sur les propriétés de l'alliage. Par exemple, la formule $90\text{W}-7\text{Ni}-3\text{Cu}$ présente une densité d'environ $17,0 \text{ g/cm}^3$ et une résistance à la traction d'environ 750 MPa , ce qui convient aux applications de contrepoids et de blindage. Contrairement aux alliages tungstène-nickel-fer, l'ajout de cuivre confère à l'alliage des propriétés amagnétiques, ce qui le rend prometteur dans les environnements sensibles aux champs électromagnétiques. La recherche se concentre également sur la microstructure de l'alliage, en analysant la distribution des particules de tungstène et la structure de phase par microscopie métallographique et diffraction des rayons X (DRX) pour optimiser les paramètres du processus de frittage.

Durant cette période, le développement se concentrait principalement en laboratoire et sur des essais à petite échelle, avec des applications limitées, principalement destinées à la recherche scientifique fondamentale et aux expériences industrielles. Par exemple, l'alliage tungstène-nickel-cuivre a été testé pour les composants de contrepoids des premiers équipements aéronautiques en raison de sa densité élevée et de ses propriétés amagnétiques, supérieures à celles du plomb ou de l'acier. Le procédé de production repose sur de simples fours de pressage et de frittage de poudre, avec une faible précision d'usinage (tolérance $\pm 0,1 \text{ mm}$), ce qui limite la fabrication de pièces de formes complexes. Néanmoins, les premières recherches ont jeté les bases théoriques de l'optimisation des performances et des applications ultérieures des alliages tungstène-nickel-cuivre, et ont établi sa position dans le domaine des alliages à haute densité.

1.2.2 Période d'application militaire

Des années 1960 aux années 1990, le développement des alliages tungstène-nickel-cuivre a été fortement stimulé par la demande militaire. Avec l'intensification de la course aux armements pendant la Guerre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

froide, la demande de matériaux haute performance pour les systèmes d'armes a explosé, notamment de matériaux haute densité, amagnétiques et à haute résistance pour les munitions et les équipements de protection. Les alliages tungstène-nickel-cuivre sont devenus un choix idéal pour l'industrie militaire grâce à leurs excellentes propriétés, notamment pour les équipements électromagnétiques sensibles ou de haute précision.

Dans les applications militaires, les alliages tungstène-nickel-cuivre sont largement utilisés pour la fabrication de noyaux de projectiles perforants et de composants de blindage. Comparés aux alliages tungstène-nickel-fer (faiblement ferromagnétiques), leur nature amagnétique les rend adaptés aux composants de radars ou de systèmes de navigation électromagnétique, évitant ainsi les interférences. Des formules classiques telles que 93W-5Ni-2Cu (densité 17,5 g/cm³) sont utilisées dans les noyaux de projectiles perforants à énergie cinétique (APFSDS), offrant une pénétration élevée tout en conservant une bonne ténacité pour résister aux impacts à grande vitesse. Cet alliage est également utilisé pour la fabrication de pièces de blindage pour missiles ou navires, afin d'absorber les ondes radar ou les radiations et de protéger les équipements électroniques. Les progrès des procédés de métallurgie des poudres, notamment l'introduction du pressage isostatique à chaud, ont considérablement amélioré la densité et les propriétés mécaniques de l'alliage, le rendant ainsi conforme aux normes militaires.

Français La technologie de production s'est considérablement améliorée au cours de cette période. Les fours de frittage avancés et le contrôle de l'atmosphère (argon de haute pureté) ont réduit la porosité et amélioré l'uniformité microstructurale. Les techniques d'usinage (telles que la CNC et l'EDM) ont atteint une grande précision, permettant la fabrication de pièces de formes complexes. Le contrôle qualité a utilisé la spectroscopie de fluorescence X (XRF) et la microscopie électronique à balayage (SEM-EDS) pour vérifier la composition (tungstène ± 0,5 %) et la structure afin de garantir la constance des performances. La poussée de la demande militaire a incité les alliages tungstène-nickel-cuivre à passer du laboratoire à la production industrielle, avec une production accrue et des coûts légèrement réduits, mais la rareté des ressources en tungstène limitait encore les applications à grande échelle.

1.2.3 Application à grande échelle dans l'industrie électronique moderne

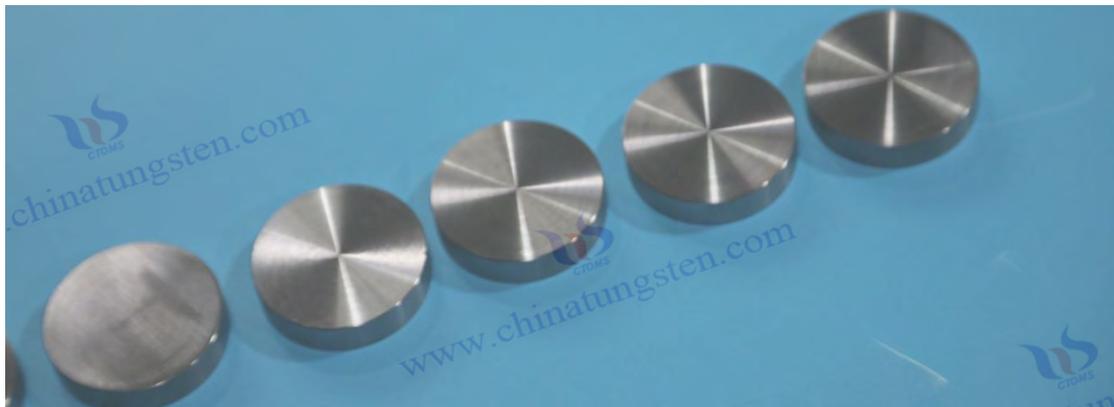
À l'aube du XXI^e siècle, l'application à grande échelle de l'alliage tungstène-nickel-cuivre dans l'industrie électronique est devenue un moteur de son développement. Avec le développement rapide des industries des semi-conducteurs, des instruments optiques et des équipements médicaux, la demande en matériaux haute densité, amagnétiques et à haute conductivité thermique a explosé. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est devenu un matériau clé dans l'industrie électronique grâce à sa nature amagnétique, sa conductivité thermique élevée et son faible coefficient de dilatation thermique, notamment dans les domaines des machines de lithographie, des équipements d'imagerie médicale et des instruments de précision.

Dans la fabrication de semi-conducteurs, les alliages tungstène-nickel-cuivre sont utilisés pour les blocs d'équilibrage et les composants d'amortissement des vibrations des plateformes de lithographie. Par exemple, en lithographie extrême ultraviolette (EUV), les blocs d'équilibrage en 95W-3,5Ni-1,5Cu (densité 18,0 g/cm³) optimisent la stabilité dynamique de la plateforme, suppriment les vibrations

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

subnanométriques et garantissent la précision de la gravure des motifs. Ses propriétés amagnétiques évitent les interférences avec les systèmes électromagnétiques de haute précision, et sa conductivité thermique disperse rapidement la chaleur générée par le laser. Dans le domaine médical, cet alliage est utilisé dans les composants de blindage des équipements de tomodensitométrie/IRM, absorbant efficacement les rayons X et gamma (numéro atomique du tungstène $Z = 74$) pour protéger le personnel et les équipements. Sa biocompatibilité (testée selon la norme ISO 10993) le rend adapté aux applications médicales, et les revêtements de surface améliorent encore la résistance à la corrosion et la sécurité.

En termes de technologie de production, l'introduction de la fabrication additive (SLM) a considérablement amélioré la capacité de fabrication de pièces complexes et réduit le gaspillage de matériaux. Les technologies de fabrication écologiques (telles que le frittage par micro-ondes et la récupération de chaleur résiduelle) réduisent la consommation d'énergie et répondent aux normes de protection de l'environnement ISO 14001. Les technologies de recyclage (telles que la dissolution chimique et la séparation électrochimique) augmentent le taux de réutilisation des alliages usagés et atténuent la pression liée à la rareté des ressources en tungstène. Le contrôle qualité vérifie la densité, la résistance et la porosité selon la norme ASTM B777, combinée à des essais de vibration et à des analyses spectrales pour garantir les performances des composants. La forte demande de l'industrie électronique a favorisé l'automatisation de la production et l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement des alliages tungstène-nickel-cuivre, réduisant ainsi les coûts et favorisant leur utilisation dans les secteurs de haute technologie.



CTIA GROUP LTD Alliage de tungstène nickel cuivre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 2 Microstructure de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un alliage haute densité dont le tungstène est le composant principal (généralement 85 à 97 % en masse) et le nickel et le cuivre constituent la phase de liaison. Sa microstructure détermine directement ses excellentes propriétés physiques et chimiques, telles qu'une densité élevée (16,5 à 18,5 g/cm³), une résistance à la traction (700 à 900 MPa), un allongement (5 à 15 %), une amagnétisme et une bonne conductivité thermique (120 à 150 W/ m·K). La microstructure est principalement composée de particules de tungstène et de phases de liaison nickel-cuivre. Une structure uniforme et dense est obtenue par des procédés de métallurgie des poudres tels que le frittage en phase liquide et le pressage isostatique à chaud. Les particules de tungstène assurent une densité et une résistance élevées, tandis que la phase de liaison nickel-cuivre améliore la ténacité et les propriétés de mise en œuvre, tout en conférant à l'alliage des propriétés amagnétiques.

2.1 Caractéristiques microstructurales de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

Les caractéristiques microstructurales des alliages tungstène-nickel-cuivre sont à la base de leurs propriétés, qui se manifestent dans la distribution et l'interaction des particules de tungstène et des phases liantes nickel-cuivre à l'échelle micrométrique. Les particules de tungstène (structure cubique centrée, BCC) en tant que phase principale occupent 80 à 95 % du volume de l'alliage, offrant une densité et une dureté élevées (dureté Vickers 250-350 HV). La phase liante nickel-cuivre (structure cubique à faces centrées, FCC) comble les espaces entre les particules de tungstène pour former une matrice continue, améliorant ainsi la ténacité et la résistance à la corrosion. La microstructure est caractérisée par microscopie électronique à balayage (MEB), spectroscopie dispersive en énergie (EDS) et diffraction des rayons X (DRX), montrant la distribution uniforme des particules de tungstène et la structure en réseau des phases nickel-cuivre. Le frittage en phase liquide permet au nickel et au cuivre de former une matrice liquide à haute température, favorisant ainsi le réarrangement et la liaison des particules de tungstène. La densité peut atteindre plus de 99,5 %. Le pressage isostatique à chaud élimine la microporosité et garantit l'homogénéité structurelle. Ces caractéristiques confèrent à cet alliage de bonnes performances dans les contreponds aérospatiaux, les pièces de blindage médical et les masselottes d'équilibrage de l'industrie électronique. La répartition des particules de tungstène et de la phase liante nickel-cuivre sera analysée en détail ci-dessous.

2.1.1 Distribution des particules de tungstène

de tungstène sont au cœur de la microstructure de l'alliage tungstène-nickel-cuivre, ce qui affecte directement la densité, la résistance et la stabilité thermique de l'alliage. Les particules de tungstène sont généralement polygonales ou presque sphériques, avec une granulométrie comprise entre 10 et 50 μm, dont la taille spécifique dépend de la granulométrie de la poudre brute et des paramètres du procédé de frittage. Dans une formule typique (telle que 90W-7Ni-3Cu ou 95W-3,5Ni-1,5Cu), les particules de tungstène représentent 80 à 95 % de la fraction volumique, formant une structure squelette haute densité, fournissant la masse principale (densité 16,5-18,5 g/cm³) et la dureté (dureté Vickers 250-350 HV) de l'alliage. L'observation au MEB révèle une répartition uniforme des particules de tungstène, sans agglomération ni pores apparents, et un contact étroit et des limites nettes. Cette distribution uniforme

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

est due à l'effet mouillant de la phase liquide nickel-cuivre lors du frittage en phase liquide, ce qui incite les particules de tungstène à se réorganiser et à former une structure dense.

de tungstène sont influencées par de nombreux facteurs. Premièrement, la qualité de la poudre brute est cruciale. La poudre de tungstène de haute pureté (pureté > 99,9 %) est préparée par atomisation ou réduction afin d'assurer une granulométrie uniforme après frittage. Une granulométrie trop importante peut entraîner une augmentation des espaces entre les particules et une diminution de la densité ; une granulométrie trop faible peut augmenter le retrait de frittage, provoquant des déformations ou des fissures. Deuxièmement, les paramètres du procédé de frittage ont un effet significatif sur la distribution des particules. Une température de frittage appropriée permet à la phase liquide nickel-cuivre de mouiller complètement les particules de tungstène et de favoriser leur réarrangement ; des températures excessivement élevées peuvent entraîner une croissance excessive des particules de tungstène et réduire leur ténacité. Le pressage isostatique à chaud (CIC) comprime davantage les particules grâce à une pression et une température élevées, élimine les micropores et améliore la résistance de contact entre les particules. L'analyse XRD montre que les particules de tungstène conservent une structure BCC, ne subissent pas de solution solide significative avec la phase nickel-cuivre et conservent une dureté et une stabilité thermique élevées.

tungstène est essentielle à la performance de l'alliage. Une répartition uniforme des particules assure une densité constante et un contrôle stable du centre de gravité dans les contrepoids aéronautiques. Une densité élevée améliore la résistance à la traction et convient aux noyaux perforants militaires pour supporter des charges d'impact élevées. L'analyse SEM-EDS permet de vérifier l'uniformité de la répartition des particules et de garantir l'absence d'inclusions ou de ségrégation. Le contrôle qualité est conforme à la norme ASTM B777, et des tests de densité et des analyses métallographiques permettent de confirmer que la répartition des particules est conforme aux exigences.

2.1.2 Répartition de la phase de liaison Ni-Cu

La phase de liaison nickel-cuivre joue un rôle essentiel dans l'alliage tungstène-nickel-cuivre : elle comble les espaces entre les particules de tungstène, forme une matrice continue et améliore significativement la ténacité, l'usinabilité et les propriétés amagnétiques de l'alliage. La phase nickel-cuivre présente une structure cubique à faces centrées (FCC), représentant généralement 5 à 20 % de la fraction volumique, et sa proportion spécifique dépend de la formule de l'alliage (par exemple, 10 % de fraction massique nickel-cuivre dans 90W-7Ni-3Cu). L'observation au MEB montre que la phase nickel-cuivre est distribuée en réseau, enveloppant les particules de tungstène pour former une matrice de liaison uniforme. L'analyse EDS montre que le nickel et le cuivre forment une solution solide (alliage Ni-Cu) dans la phase de liaison sans séparation de phases évidente, et que le rapport atomique nickel-cuivre est proche du rapport prévu (par exemple, 7:3 ou 3,5:1,5). Cette distribution uniforme est due aux caractéristiques de point de fusion bas du nickel (point de fusion 1455°C) et du cuivre (point de fusion 1085°C) pendant le processus de frittage en phase liquide, formant une phase liquide pour mouiller les particules de tungstène, combler les lacunes et favoriser la densification.

Les caractéristiques de distribution de la phase liante nickel-cuivre ont une influence importante sur les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

propriétés de l'alliage. Le nickel offre une excellente résistance à la corrosion (formant une couche protectrice de NiO), ce qui assure la stabilité de l'alliage dans les environnements humides ou chimiques (tels que les environnements de stérilisation des équipements médicaux). L'ajout de cuivre améliore la conductivité thermique, ce qui est idéal pour les blocs d'équilibrage ou les pièces de blindage nécessitant une dissipation thermique rapide dans l'industrie électronique. L'amagnétisme est le principal avantage de la phase nickel-cuivre. Le nickel et le cuivre étant tous deux des matériaux paramagnétiques, les interférences ferromagnétiques sont évitées, ce qui est idéal pour les applications sensibles aux champs électromagnétiques telles que les équipements d'IRM ou les machines de photolithographie. La ténacité de la phase nickel-cuivre compense la fragilité des particules de tungstène, rendant l'alliage moins sujet à la fissuration lors de l'usinage (tournage CNC, fraisage, etc.) ou des sollicitations dynamiques (vibrations aéronautiques, par exemple). L'optimisation du frittage est essentielle pour obtenir une distribution uniforme. Le frittage en phase liquide nécessite un contrôle de la température et de l'atmosphère (argon haute pureté) afin d'éviter un écoulement excessif de la phase liquide nickel-cuivre et de provoquer une ségrégation. Le pressage isostatique à chaud (HIP) compacte davantage la phase liante, élimine les micropores et assure la continuité de la matrice.

La distribution des phases nickel-cuivre présente également des difficultés. Une teneur excessive en nickel peut augmenter le risque de sensibilisation et nécessiter des tests de biocompatibilité ISO 10993 dans les applications médicales. Une teneur excessive en cuivre peut réduire la résistance, car la résistance de la solution solide Ni-Cu est inférieure à celle des particules de tungstène. Lors du traitement, la ductilité de la phase nickel-cuivre peut provoquer un collage ou des bavures de surface, et les paramètres de coupe doivent être optimisés (coupe à basse vitesse, outils CBN, etc.). Le contrôle qualité analyse la distribution et la composition de la phase nickel-cuivre par MEB-EDS et DRX afin de vérifier l'homogénéité de la solution solide. Les traitements de surface (tels que le revêtement PVD TiN ou DLC) peuvent améliorer la résistance à la corrosion et à l'usure, et prolonger la durée de vie des composants. À l'avenir, la fabrication additive permettra une distribution personnalisée des phases nickel-cuivre grâce à un contrôle précis des ratios de poudre et des paramètres d'impression (tels que la puissance laser), optimisant ainsi les performances de l'alliage dans les pièces de blindage médical ou les masselottes électroniques.

2.1.3 Mécanisme de formation du col de frittage

La formation du col de frittage est le mécanisme clé de la densification de l'alliage tungstène-nickel-cuivre lors du frittage en phase liquide. Ce processus affecte directement la microstructure, les propriétés mécaniques et la densité (> 99,5 %) de l'alliage. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est préparé par métallurgie des poudres, et le frittage en phase liquide est l'étape principale. Le nickel (point de fusion 1455 °C) et le cuivre forment une matrice liquide à haute température, mouillent les particules de tungstène (point de fusion 3422 °C, restant solides), favorisent la liaison entre elles et forment le col de frittage. Le col de frittage est la zone de connexion formée par le pontage en phase liquide entre les particules de tungstène, ce qui améliore l'intégrité structurelle et la résistance de l'alliage.

Au début du frittage, de la poudre de tungstène (granulométrie de 10 à 50 µm), de la poudre de nickel et de la poudre de cuivre sont mélangées et pressées pour former une ébauche. Le point de contact initial

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

est ponctuel et l'espace entre les particules est important. Lorsque la température atteint un certain niveau, le nickel et le cuivre fondent pour former une phase liquide Ni-Cu. Grâce à sa faible tension superficielle et à sa bonne mouillabilité au tungstène (angle de contact $< 30^\circ$), la phase liquide comble rapidement l'espace entre les particules de tungstène et mouille leur surface par capillarité. Le mouillage de la phase liquide favorise le réarrangement des particules, ce qui entraîne leur déplacement et leur rapprochement pour former une structure d'empilement plus compacte. À mesure que le temps de maintien augmente, la phase liquide agit davantage sur les particules de tungstène par diffusion et par des mécanismes de reprécipitation en solution. Une petite quantité d'atomes de tungstène se dissout dans la phase liquide et reprécipite au point de contact des particules pour former un col de frittage. La croissance du col de frittage améliore la force de liaison entre les particules et améliore considérablement la densité de l'alliage.

Lors de la dernière étape du frittage, la phase liquide continue de remplir les pores restants et élimine les pores minuscules par diffusion et transfert de masse. La compression isostatique à chaud compacte davantage la structure et élimine les pores résiduels, et la densité peut atteindre 99,5 %. L'observation au MEB montre que le col de frittage est une structure en forme d'arc ou de pont, reliant les particules de tungstène adjacentes pour former un réseau squelettique tridimensionnel. L'analyse DRX confirme que les particules de tungstène conservent une structure cubique centrée (BCC) sans solution solide significative, et que la solution solide Ni-Cu dans la phase liquide est une structure cubique à faces centrées (FCC). La formation du col de frittage est affectée par les paramètres du procédé : une température trop élevée peut provoquer un écoulement excessif de la phase liquide, entraînant une ségrégation nickel-cuivre ou une croissance excessive des particules de tungstène, réduisant ainsi la ténacité ; une température trop basse entraînera une phase liquide insuffisante, un col de frittage incomplet et une densité réduite. Le rapport nickel-cuivre (généralement 7:3 ou 3,5:1,5) affecte également la quantité de phase liquide. Une teneur élevée en nickel augmente la fluidité de la phase liquide et favorise la croissance du col de frittage, mais peut réduire la résistance ; une teneur élevée en cuivre abaisse le point de fusion de la phase liquide, ce qui est bénéfique pour le frittage, mais peut provoquer une ségrégation.

La formation des cols de frittage est essentielle aux performances. Des cols de frittage serrés améliorent la liaison interparticules, la résistance à la traction (700-900 MPa) et la ténacité, et conviennent aux contreponds aéropatiaux ou aux noyaux perforants militaires pour résister à des contraintes élevées. La distribution uniforme des cols de frittage garantit une densité constante et une absorption stable des radiations dans les pièces de blindage médical. Le contrôle qualité analyse la morphologie et la composition des cols de frittage par microscopie métallographique et MEB-EDS afin de vérifier la porosité et la distribution de la phase liquide. À l'avenir, l'utilisation de poudre de tungstène nanométrique ou de technologies de frittage rapide (comme le frittage par plasma d'étincelles, SPS) permettra d'optimiser la formation des cols de frittage, de réduire le temps de frittage, d'améliorer l'efficacité et de maintenir les performances.

2.2 Microstructure et caractéristiques d'interface de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

L' alliage tungstène-nickel-cuivre, et plus particulièrement la force de liaison interfaciale entre les particules de tungstène et la phase de liaison nickel-cuivre, joue un rôle déterminant dans ses propriétés

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mécaniques, sa stabilité thermique et sa durabilité. La force de liaison interfaciale détermine la fiabilité de l'alliage sous des charges dynamiques (telles que les vibrations ou les chocs) ou dans des environnements à haute température, et influence directement ses performances d'application dans les contreponds aérospatiaux, les pièces de blindage médical et les blocs d'équilibrage de l'industrie électronique. L'interface entre les particules de tungstène (structure BCC) et la phase de liaison nickel-cuivre (structure FCC) est étroitement liée par frittage en phase liquide et pressage isostatique à chaud, ce qui lui confère une excellente stabilité mécanique et chimique.

2.2.1 Résistance de la liaison de l'interface tungstène-phase liante

La force de liaison de l'interface tungstène-liant est une caractéristique clé de la microstructure de l'alliage tungstène-nickel-cuivre, qui détermine la résistance à la traction, la ténacité et la résistance à la fatigue de l'alliage. La liaison d'interface est formée par le mouillage et la diffusion de la phase liquide nickel-cuivre lors du frittage en phase liquide. La surface des particules de tungstène forme une interface semi-cohérente ou non cohérente avec la solution solide Ni-Cu. La force de liaison provient principalement de l'intercalation mécanique, de la liaison chimique et de la diffusion. L'observation au MEB montre que l'interface est une zone de transition continue et lisse, d'une épaisseur d'environ 0,1 à 1 μm , sans fissures ni pores apparents. L'analyse EDS montre une légère diffusion d'éléments à l'interface, et une faible quantité d'atomes de tungstène se dissout dans la phase nickel-cuivre pour former une couche de transition améliorant la force de liaison. La résistance de liaison de l'interface est évaluée par des essais de traction (ASTM E8) et une analyse fractographique, qui montrent généralement une résistance au cisaillement élevée et une bonne ténacité à la rupture.

Le frittage en phase liquide est un procédé essentiel à la formation de liaisons interfaciales. À 1 450-1 550 $^{\circ}\text{C}$, le nickel et le cuivre fondent pour former une phase liquide Ni-Cu, qui mouille les particules de tungstène (angle de mouillage $< 30^{\circ}$) et comble les espaces entre les particules par capillarité. La faible tension superficielle et le coefficient de diffusion élevé de la phase liquide favorisent la microdissolution de la surface du tungstène (solubilité $< 2\%$ en poids) pour former une liaison chimique. À l'étape ultérieure du frittage, la phase liquide se solidifie pour former une solution solide Ni-Cu à structure FCC, qui enveloppe les particules de tungstène, et l'emboîtement mécanique renforce encore la liaison interfaciale. La compression isostatique à chaud (CIC) comprime l'interface sous haute pression, élimine les micropores, augmente la surface de contact et améliore la résistance de la liaison. La qualité de la résistance de la liaison interfaciale affecte directement les performances de l'alliage. Dans les contreponds aérospatiaux, une force de liaison élevée garantit que les composants ne subissent pas de décollement interfacial sous l'effet de vibrations à haute fréquence ; dans les pièces de blindage médical, une interface stable garantit une utilisation à long terme sans dégradation des performances. La force de liaison interfaciale est affectée par de nombreux facteurs. La pureté ($> 99,9\%$) et l'état de surface (par exemple, une teneur en oxyde $< 0,1\%$) de la poudre de tungstène sont essentiels à la mouillabilité. Les oxydes peuvent provoquer des défauts interfaciaux et réduire la force de liaison. Le rapport nickel-cuivre (généralement 7:3) affecte la quantité de phase liquide et les propriétés de la solution solide. Une teneur en nickel trop élevée peut entraîner une phase liquide excessive à l'interface, provoquant une ségrégation ; une teneur en cuivre trop élevée ($> 8\%$) réduit la résistance de la solution solide. Les paramètres de frittage doivent être contrôlés avec précision. Une température trop élevée peut entraîner une dissolution

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

excessive des particules de tungstène, élargissant l'interface mais réduisant la résistance ; une température trop basse peut entraîner une phase liquide insuffisante et une liaison incomplète à l'interface. Le contrôle qualité utilise la microscopie électronique en transmission (MET) et la spectroscopie électronique à balayage (EBSD) pour analyser la microstructure de l'interface et vérifier la correspondance cristallographique et la répartition des défauts. L'analyse des fractures montre que le mode de fracture de l'interface forte est principalement ductile, avec des caractéristiques alvéolées.

L'optimisation de la résistance de l'interface nécessite des procédés améliorés. L'utilisation de poudre de tungstène nanométrique permet d'augmenter la surface de contact de l'interface et d'améliorer la résistance de l'interface (> 600 MPa). La technologie de frittage rapide (comme le SPS) réduit la diffusion excessive de l'interface due à des températures élevées à court terme et maintient la stabilité structurelle. Un traitement de surface (comme le revêtement PVD TiN) peut améliorer la résistance à la corrosion de l'interface et prolonger la durée de vie des composants médicaux ou électroniques.

2.2.2 Effets des oligo-éléments sur l'interface

La résistance de l'interface tungstène-liant des alliages tungstène-nickel-cuivre est un facteur clé pour déterminer leurs propriétés mécaniques et leur fiabilité. L'introduction d'oligo-éléments a un effet significatif sur les caractéristiques de l'interface. Les oligo-éléments (tels que le cobalt, le molybdène, le chrome, le carbone ou l'oxygène, généralement < 0,5 % en poids) peuvent provenir d'impuretés présentes dans la poudre brute ou être ajoutés intentionnellement pour optimiser la liaison de l'interface, les propriétés mécaniques ou la résistance à la corrosion. Ces éléments affectent la résistance de l'interface (résistance au cisaillement > 500 MPa) entre les particules de tungstène et la solution solide Ni-Cu (structure FCC) en modifiant la mouillabilité, le comportement de diffusion et la microstructure de l'interface de la phase liquide nickel-cuivre. Dans les contrepoids aérospatiaux, les pièces de blindage médical et les blocs d'équilibrage de l'industrie électronique, l'optimisation de la résistance de l'interface est directement liée à la stabilité à long terme et à la résistance à la fatigue des composants.

Des traces de cobalt sont souvent utilisées comme additifs, car elles forment une solution solide FCC plus stable avec le nickel, améliorant ainsi la résistance et la ténacité de la phase de liaison. L'analyse SEM-EDS montre que le cobalt est uniformément réparti dans la phase nickel-cuivre, augmentant la mouillabilité de la phase liquide lors du frittage en phase liquide (l'angle de contact est réduit à < 25°), favorisant la croissance des collets de frittage et améliorant la résistance de la liaison interfaciale (pouvant être portée à 550-600 MPa). Le cobalt inhibe également la dissolution du tungstène à l'interface, réduit l'épaisseur de la couche de transition interfaciale, maintient l'interface transparente et réduit le risque de fissures. Cependant, une teneur excessive en cobalt peut provoquer une ségrégation interfaciale et réduire la ténacité. Des traces de molybdène, en raison de son point de fusion élevé (2 623 °C) et de sa structure cristalline similaire (BCC) à celle du tungstène, peuvent améliorer la liaison chimique à l'interface et la résistance aux températures élevées, ce qui le rend idéal pour les noyaux de projectiles perforants militaires ou les composants électroniques haute température. Le molybdène renforce la phase nickel-cuivre en solution solide et augmente la résistance au cisaillement de l'interface, mais des quantités excessives peuvent provoquer une fragilisation de l'interface. Des traces de carbone et d'oxygène sont généralement présentes sous forme d'impuretés, pouvant provenir des oxydes de poudre de tungstène ou

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de l'atmosphère de frittage (pureté insuffisante de l'argon). Le carbone forme des carbures (tels que des composés WC ou Ni-C) à l'interface, ce qui peut augmenter la dureté locale (la dureté Vickers atteint 400 HV), mais peut également provoquer une concentration de contraintes interfaciales et réduire la ténacité à la rupture. L'oxygène peut former des inclusions d'oxydes (tels que WO_3 ou NiO_3), affaiblissant la liaison interfaciale et provoquant la défaillance de composants de blindage médical ou aérospatiaux sous charges dynamiques. Le contrôle de la teneur en impuretés nécessite des matières premières de haute pureté et une atmosphère d'argon de haute pureté. Des traces de chrome peuvent améliorer la résistance à la corrosion de la phase nickel-cuivre (formant une couche protectrice Cr_2O_3), mais ont peu d'effet sur la liaison interfaciale en raison de sa solubilité limitée. La caractérisation des effets d'interface a été réalisée par microscopie électronique à transmission (MET) et analyse par diffraction d'électrons rétrodiffusés (EBSD) afin de vérifier la distribution des oligo-éléments et les caractéristiques cristallographiques de l'interface. Les essais de traction (ASTM E8) et l'analyse des fractures ont montré que l'interface avec les oligo-éléments optimisés présentait des caractéristiques de fracture ductile (fossettes), tandis que les impuretés excessives entraînaient une fracture fragile. L'optimisation du procédé nécessite un contrôle strict de la teneur en oligo-éléments (précision de détection ICP-AES $\pm 0,01\%$) et l'élimination des défauts d'interface par pressage isostatique à chaud.

2.3 Évolution microstructurale de l'alliage W-Ni-Cu

L'évolution microstructurale des alliages WNiCu se produit tout au long du processus de production, du pressage de la poudre au frittage et au traitement thermique, impliquant des modifications dynamiques de la croissance des grains, de la distribution des phases et de la structure de l'interface. Ces modifications affectent directement la densité, la résistance et la ténacité de l'alliage, qui déterminent ses performances dans les contrepoids aérospatiaux, les pièces de blindage médical et les blocs d'équilibrage de l'industrie électronique. Le frittage en phase liquide et le traitement thermique sont des procédés clés pour contrôler l'évolution de la microstructure. La microstructure idéale peut être obtenue en optimisant les paramètres du procédé tels que la température, le temps de maintien et l'atmosphère.

2.3.1 Loi de croissance des grains lors du frittage

La loi de croissance des grains lors du frittage est au cœur de l'évolution microstructurale des alliages tungstène-nickel-cuivre, qui affecte directement la taille des particules de tungstène, la formation du col de frittage et les propriétés de l'alliage. Le frittage en phase liquide est le processus principal, impliquant trois étapes : réarrangement des particules, dissolution-reprécipitation et diffusion à l'état solide, favorisant la croissance des particules de tungstène et la densification microstructurale. Au début du frittage, les poudres de tungstène, de nickel et de cuivre sont pressées en billettes. Lorsque la température atteint un certain niveau, le nickel et le cuivre fondent pour former une phase liquide Ni-Cu, qui mouille les particules de tungstène et favorise leur réarrangement par capillarité. À ce stade, la croissance des grains est limitée et les particules conservent leur taille initiale.

Au milieu du frittage (1 à 2 heures de maintien), la phase liquide favorise la croissance des grains par le mécanisme de dissolution-reprécipitation. Une petite quantité d'atomes de tungstène se dissout dans la phase liquide et reprécipite au point de contact des particules pour former un col de frittage. La croissance

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des grains suit la loi de maturation d'Ostwald. Les grosses particules grossissent en englobant les petites, et la distribution granulométrique s'élargit. La température et le temps de maintien du frittage sont des facteurs clés : une température trop élevée ou un temps de maintien trop long entraîne une croissance excessive et une ténacité réduite ; une température trop basse entraîne une phase liquide insuffisante, un ralentissement de la croissance des grains et une diminution de la densité. Le rapport nickel-cuivre affecte également la quantité de phase liquide. Une teneur élevée en nickel augmente la fluidité de la phase liquide et favorise la croissance des grains, mais peut provoquer une ségrégation ; une teneur élevée en cuivre réduit la viscosité de la phase liquide, accélère la croissance mais peut réduire la résistance.

Lors de la dernière étape du frittage, la diffusion à l'état solide densifie davantage la structure et réduit la porosité à moins de 1 %. Le pressage isostatique à chaud supprime la croissance excessive des grains en comprimant les particules sous haute pression. L'analyse au MEB montre que les grains sont polygonaux ou presque sphériques, et que les collets de frittage sont uniformément répartis ; la DRX confirme que le tungstène conserve une structure BCC sans changements de phase significatifs. Le contrôle de la loi de croissance des grains est crucial pour les performances : une granulométrie modérée assure une résistance et une ténacité élevées, adaptées aux collimateurs médicaux ; une granulométrie plus importante assure une densité élevée, adaptée aux noyaux de projectiles militaires.

2.3.2 Régulation de la microstructure par traitement thermique

Le traitement thermique est un moyen important de réguler la microstructure de l'alliage tungstène-nickel-cuivre. Il optimise les propriétés mécaniques, la résistance à la corrosion et la stabilité thermique en ajustant la granulométrie, la liaison à l'interface et les contraintes résiduelles. Le traitement thermique est généralement effectué après le frittage, notamment par recuit, vieillissement ou trempe-revenu. Le procédé spécifique est conçu en fonction des exigences de l'application. Le recuit est la méthode de traitement thermique la plus couramment utilisée. Il vise à éliminer les contraintes résiduelles lors du frittage et de l'usinage, à améliorer la ténacité et les performances d'usinage, tout en préservant la densité élevée et les propriétés amagnétiques de l'alliage.

Le processus de recuit régule la microstructure par diffusion et recristallisation. À haute température, les défauts cristallins (tels que les dislocations et les joints de grains) dans la phase de liaison nickel-cuivre (structure FCC) sont réparés par diffusion afin de réduire les contraintes internes. Les particules de tungstène (structure BCC) ne subissent pas de recristallisation significative en raison de leur point de fusion élevé (3 422 °C), mais des traces de tungstène dissous à l'interface lissent davantage l'interface et améliorent la résistance de la liaison (résistance au cisaillement > 550 MPa).

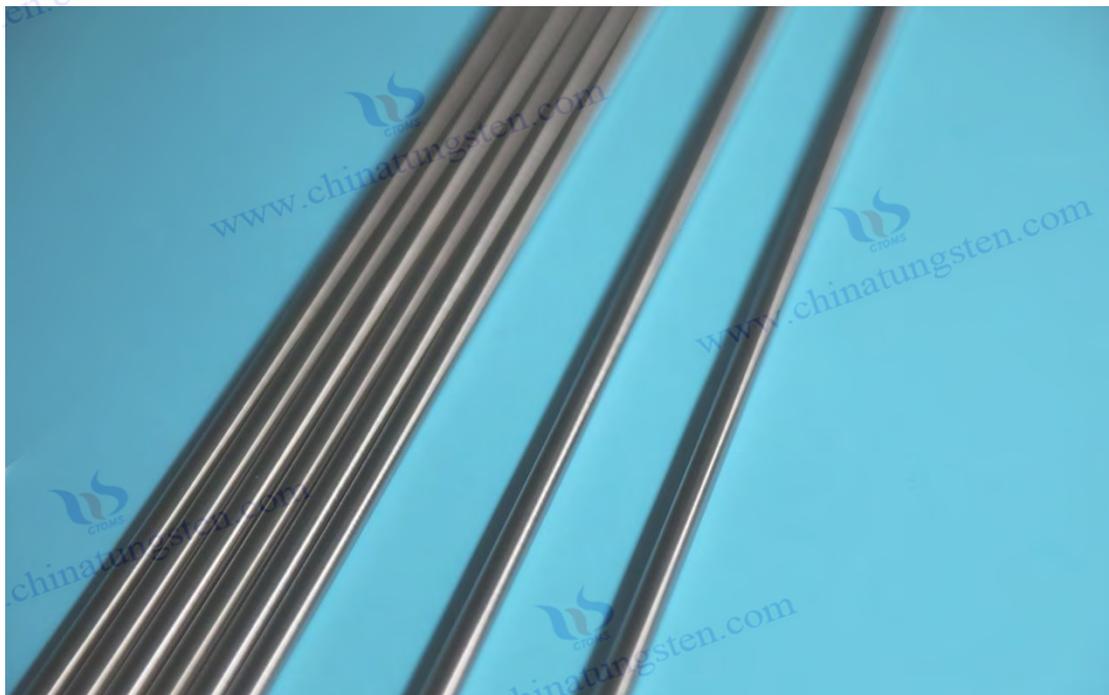
Des températures de recuit trop élevées peuvent induire une croissance des grains dans la phase nickel-cuivre et réduire la résistance ; des températures trop basses entraîneront une relaxation des contraintes insuffisante et une amélioration limitée de la ténacité. Un traitement de vieillissement peut améliorer la résistance de la phase de liaison en précipitant une trace d'une seconde phase (telle que Ni₃Cu) dans la solution solide Ni-Cu, mais une précipitation excessive doit être évitée pour éviter toute fragilisation.

Le traitement thermique permet également de réguler la résistance à la corrosion et la conductivité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

thermique. Après recuit, une couche protectrice dense de NiO se forme à la surface de la phase nickel-cuivre, ce qui améliore la résistance à la corrosion (résistance aux acides accrue de 20 à 30 %) et convient à une utilisation à long terme des équipements médicaux. L'optimisation de la distribution des joints de grains améliore légèrement la conductivité thermique (5 à 10 %), ce qui est bénéfique pour les composants de dissipation thermique dans l'industrie électronique.

Les analyses TEM et EBSD montrent qu'après traitement thermique, la couche de transition d'interface est plus uniforme, les défauts aux joints de grains sont réduits et la fracture présente des caractéristiques de ténacité (fossettes). Le contrôle qualité vérifie l'amélioration des performances par des essais de traction (ASTM E8) et de dureté (ASTM E92). Le traitement thermique doit être réalisé dans de l'argon de haute pureté pour éviter les inclusions d'oxydes.



CTIA GROUP LTD Alliage de tungstène nickel cuivre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 3 Propriétés physiques et chimiques de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau haute performance et haute densité, largement utilisé dans les domaines aérospatial, médical, électronique et militaire grâce à ses propriétés physiques et chimiques uniques. Principalement composé de tungstène, il est complété par du nickel et du cuivre comme phase de liaison, formant une structure amagnétique et hautement dense, dotée d'excellentes propriétés mécaniques. Sa densité élevée assure une répartition efficace de la masse dans un espace restreint. La phase de liaison nickel-cuivre confère à l'alliage une bonne ténacité et une bonne usinabilité. Enfin, ses propriétés amagnétiques lui permettent de bien fonctionner dans les environnements sensibles aux champs électromagnétiques.

3.1 Propriétés mécaniques de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

L'alliage tungstène-nickel-cuivre constitue son principal atout pour les applications hautes performances, notamment celles nécessitant une résistance aux contraintes mécaniques, aux vibrations et aux impacts, comme les contrepoids aérospatiaux, les collimateurs médicaux ou les noyaux perforants militaires. Ses principales propriétés mécaniques comprennent la résistance à la traction, l'allongement, la dureté et la résistance à la fatigue, résultant de l'effet synergique de la dureté élevée des particules de tungstène et de la ténacité de la phase de liaison nickel-cuivre. L'alliage est élaboré par métallurgie des poudres, et les procédés de frittage en phase liquide et de pressage isostatique à chaud garantissent une microstructure dense, lui permettant de maintenir son intégrité structurale dans un environnement dynamique. Comparée à la fragilité du tungstène pur, la phase de liaison nickel-cuivre améliore significativement la plasticité et l'usinabilité de l'alliage, lui permettant de répondre aux exigences de fabrication de formes complexes et de haute précision.

3.1.1 Résistance à la traction à température ambiante

L'alliage tungstène-nickel-cuivre est le principal indicateur de ses propriétés mécaniques, reflétant sa capacité à résister à la rupture sous des charges de traction. Cette propriété lui permet de supporter de fortes contraintes dans les contrepoids aérospatiaux, les noyaux de projectiles militaires et les blocs d'équilibrage de l'industrie électronique, garantissant ainsi la stabilité structurale et la fiabilité des composants. Ses excellentes performances en matière de résistance à la traction découlent de la dureté élevée des particules de tungstène et de l'effet de renforcement de la phase de liaison nickel-cuivre. Le tungstène, composant principal, offre une structure squelettique robuste, et sa structure cristalline cubique centrée confère à l'alliage une dureté et une résistance à la déformation extrêmement élevées. La phase de liaison nickel-cuivre forme une matrice continue par frittage en phase liquide, comblant les espaces entre les particules de tungstène, renforçant ainsi la force de liaison entre elles et permettant à l'alliage de disperser efficacement les contraintes lors de l'étirement et d'éviter les ruptures locales.

La résistance à la traction est influencée conjointement par la composition de l'alliage et les conditions de traitement. Les alliages à forte teneur en tungstène (par exemple, 95 % de tungstène) présentent généralement une résistance à la traction plus élevée, car la densité et la dureté des particules de tungstène constituent le support principal. Le rapport nickel/cuivre a également une influence importante sur la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance. Le nickel améliore la ténacité et la résistance à la corrosion de la phase de liaison, tandis que le cuivre améliore la conductivité thermique et les propriétés amagnétiques. Un rapport nickel/cuivre approprié (par exemple, 7:3 ou 3,5:1,5) assure une bonne liaison entre la phase de liaison et les particules de tungstène, formant une microstructure uniforme et évitant la concentration de contraintes. Le frittage en phase liquide forme une matrice liquide de nickel et de cuivre à haute température, mouille les particules de tungstène, favorise la formation de collets de frittage et renforce encore la force de liaison entre les particules.

Dans les applications, la résistance à la traction de l'alliage tungstène-nickel-cuivre lui permet de résister aux vibrations haute fréquence des composants aérospatiaux ou aux impacts à grande vitesse des noyaux de projectiles militaires. Par exemple, dans les contrepoids d'ailerons d'avions, l'alliage doit résister aux charges dynamiques en vol, et sa résistance à la traction élevée garantit que les composants ne se déformeront ni ne se briseront. Dans les équipements de radiothérapie médicale, le collimateur doit résister aux contraintes mécaniques et à la fatigue causées par une utilisation prolongée, et une résistance à la traction élevée garantit sa précision et sa durabilité. L'optimisation des procédés est essentielle pour améliorer la résistance à la traction, notamment en contrôlant la température et le temps de maintien du frittage, en évitant la croissance excessive de particules de tungstène ou la ségrégation des phases nickel-cuivre, et en garantissant l'uniformité de la microstructure.

3.1.2 Allongement

L'allongement est un indicateur important pour mesurer la plasticité et la ténacité des alliages tungstène-nickel-cuivre. Il reflète la capacité de l'alliage à subir une déformation plastique avant rupture par traction. Comparé à la fragilité du tungstène pur, l'allongement des alliages tungstène-nickel-cuivre est nettement amélioré, ce qui le rend moins sujet à la rupture fragile sous l'effet des chocs ou des vibrations. Il est ainsi adapté aux applications exigeant une certaine ténacité, comme les contrepoids de robots chirurgicaux ou les composants antivibratoires d'équipements électroniques. L'excellente performance en allongement est principalement due à la ténacité de la phase de liaison nickel-cuivre. Le nickel offre une bonne aptitude à la déformation plastique grâce à sa structure cristalline cubique à faces centrées, tandis que le cuivre améliore encore la ductilité de la phase de liaison, permettant à l'alliage d'absorber l'énergie par déformation plastique sous contrainte et d'éviter une rupture brutale. Cette propriété confère à l'alliage une bonne résistance à la fatigue en environnements dynamiques.

L'allongement dépend de la composition de l'alliage, de sa microstructure et du procédé de fabrication. Une teneur en nickel plus élevée augmente généralement l'allongement, car le nickel présente une meilleure ténacité que le tungstène, peut efficacement disperser les contraintes et prolonger le processus de déformation. Cependant, une teneur en nickel trop élevée peut réduire la résistance globale, et un équilibre doit être trouvé entre ténacité et résistance. L'ajout de cuivre améliore encore l'allongement, car sa ductilité élevée réduit la dureté de la phase de liaison, rendant l'alliage plus sensible à l'écoulement plastique lors de l'étirage. Le frittage en phase liquide forme une matrice nickel-cuivre uniforme à haute température, comblant les espaces entre les particules de tungstène pour former une structure en réseau continue facilitant le transfert de contraintes et la déformation plastique. Le pressage isostatique à chaud améliore encore la ténacité et l'allongement de l'alliage en éliminant les micropores et en optimisant la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

liaison à l'interface. Les traitements thermiques tels que le recuit peuvent également améliorer les performances plastiques de l'alliage en éliminant les contraintes résiduelles et en optimisant la structure des joints de grains.

Dans le cadre d'une application, l'allongement affecte directement l'applicabilité de l'alliage. Dans le secteur aérospatial, les contrepoids doivent résister aux vibrations et aux impacts à haute fréquence. Un allongement plus élevé garantit que les composants ne se fracturent pas sous l'effet de charges dynamiques et prolonge leur durée de vie. Dans l'industrie électronique, le bloc d'équilibrage de la plateforme de lithographie doit résister à de faibles vibrations, tandis qu'un allongement modéré assure la stabilité des composants en utilisation prolongée. Bien que les pièces de blindage dans le domaine médical reposent principalement sur une densité élevée, un allongement approprié les rend moins susceptibles de se fissurer lors du traitement et de l'installation. L'optimisation des procédés doit se concentrer sur les oligo-éléments et le contrôle des impuretés, notamment en évitant la formation de phases cassantes par des impuretés telles que l'oxygène ou le carbone et en réduisant l'allongement. Le traitement de surface (polissage ou revêtement) peut également réduire les défauts de surface et améliorer la capacité de déformation plastique. À l'avenir, en contrôlant précisément le rapport nickel-cuivre et en introduisant des technologies de fabrication avancées (telles que la fabrication additive), l'allongement pourra être encore optimisé pour améliorer les performances de l'alliage dans des scénarios avec des exigences de ténacité élevées.

3.1.3 Résistance aux hautes températures

L'alliage tungstène-nickel-cuivre possède une propriété mécanique importante dans les environnements à haute température, reflétant la conservation de la résistance et la stabilité structurelle de l'alliage sous contrainte thermique. Cette propriété lui confère une excellente résistance dans des domaines tels que l'aérospatiale, l'industrie militaire et l'électronique, qui doivent résister à des environnements à haute température, comme les composants de missiles, les contrepoids de turbocompresseurs ou les blocs d'équilibrage des équipements électroniques haute température. Son excellente résistance à haute température est due à l'effet synergique du point de fusion élevé du tungstène et de la stabilité thermique de la phase liante nickel-cuivre. Le tungstène, en tant que composant principal, possède un point de fusion extrêmement élevé et permet de maintenir l'intégrité de sa structure cristalline à haute température, tout en résistant à la déformation thermique et au ramollissement. La phase liante nickel-cuivre améliore encore les propriétés mécaniques et la résistance à l'oxydation de l'alliage à haute température en formant une solution solide stable, lui permettant de maintenir ses performances à long terme dans un environnement à haute température.

La résistance aux hautes températures est fortement influencée par la composition et la microstructure de l'alliage. Les alliages à forte teneur en tungstène présentent une meilleure résistance au ramollissement à haute température, car la structure cristalline cubique centrée du tungstène présente une stabilité thermique extrêmement élevée et peut résister au glissement des joints de grains ou aux mouvements de dislocation causés par les températures élevées. Le nickel assure une protection antioxydante dans la phase liante, et la couche d'oxyde formée à sa surface prévient efficacement l'érosion par l'oxygène et préserve l'intégrité structurelle de l'alliage. Bien que l'ajout de cuivre abaisse le point de fusion de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

phase liante, sa conductivité thermique élevée permet une dissipation rapide de la chaleur et réduit la dégradation des performances due à une surchauffe locale. Le frittage en phase liquide forme une microstructure uniforme à haute température, et les particules de tungstène sont étroitement liées à la phase liante nickel-cuivre par le col de frittage, ce qui améliore la résistance de la liaison interfaciale à haute température. Le pressage isostatique à chaud élimine également les micropores, réduisant ainsi le risque de défaillance de l'alliage due à la dilatation des pores à haute température. Les procédés de traitement thermique tels que le recuit améliorent encore la stabilité mécanique à haute température en éliminant les contraintes résiduelles et en optimisant la structure des joints de grains. Dans les applications pratiques, sa résistance aux hautes températures fait de l'alliage tungstène-nickel-cuivre un choix idéal pour les environnements à haute température. Par exemple, dans le secteur aérospatial, les turbocompresseurs ou les contrepoids de missiles doivent résister à la chaleur générée par les gaz à haute température ou le frottement. La résistance aux hautes températures de l'alliage garantit le maintien de la forme et de la résistance des pièces dans des conditions extrêmes. Dans l'industrie électronique, les équipements électroniques haute température (tels que les composants de gestion thermique des machines de lithographie) nécessitent des matériaux garantissant une stabilité dimensionnelle à haute température. La faible dilatation thermique de l'alliage, combinée à sa résistance aux hautes températures, répond à cette exigence. L'optimisation des procédés est essentielle pour améliorer la résistance aux hautes températures, par exemple en contrôlant la température et l'atmosphère de frittage, en évitant les inclusions d'oxydes ou la croissance excessive des grains, et en maintenant la stabilité de la microstructure. L'ajout d'oligo-éléments (comme le molybdène) peut améliorer la résistance à haute température, mais il convient d'éviter toute quantité excessive afin de prévenir la fragilisation de l'interface. Le contrôle qualité vérifie la stabilité des performances de l'alliage par des essais de traction à haute température et des essais de cyclage thermique afin de garantir sa fiabilité dans les environnements à haute température.

3.1.4 Résistance aux chocs

La ténacité aux chocs est la capacité d'un alliage tungstène-nickel-cuivre à résister à la rupture sous l'effet d'un impact soudain ou de charges dynamiques, témoignant de sa robustesse et de sa fiabilité dans des environnements soumis à de fortes contraintes. Cette propriété est particulièrement importante dans des applications telles que les contrepoids aérospatiaux, les noyaux perforants militaires et les collimateurs d'équipements médicaux, garantissant que les composants ne subissent pas de ruptures fragiles sous l'effet de vibrations, d'impacts ou de charges transitoires. Comparée à la fragilité du tungstène pur, la ténacité aux chocs de l'alliage tungstène-nickel-cuivre est nettement améliorée, principalement grâce à l'effet plastique de la phase de liaison nickel-cuivre. La ténacité du nickel lui permet d'absorber l'énergie lors de l'impact et de disperser les contraintes par déformation plastique, tandis que la grande ductilité du cuivre améliore encore la résistance à la fissuration de la phase de liaison, permettant à l'alliage de présenter un bon comportement à la rupture sous impact.

La ténacité aux chocs dépend de la composition, de la microstructure et du procédé de fabrication de l'alliage. Les particules de tungstène offrent une dureté et une résistance élevées, formant ainsi une ossature solide de l'alliage. Cependant, leur fragilité doit être compensée par la phase de liaison nickel-cuivre. Cette phase forme une matrice continue qui encapsule les particules de tungstène et transmet et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

disperse efficacement l'énergie d'impact grâce à la liaison interfaciale. Une teneur accrue en nickel améliore généralement la ténacité aux chocs, car sa structure cubique à faces centrées présente une excellente aptitude à la déformation plastique et peut former des creux sous l'impact pour absorber l'énergie. L'ajout de cuivre améliore encore la ténacité, et sa ductilité réduit la dureté de la phase de liaison, rendant l'alliage plus sensible à l'écoulement plastique qu'à la rupture fragile sous l'impact. Le frittage en phase liquide renforce la force de liaison entre les particules et évite le décollement interfacial sous l'impact en formant des collets de frittage uniformes et une microstructure dense (porosité < 1 %). Le procédé de pressage isostatique à chaud améliore encore la résistance aux chocs et réduit le point de départ des microfissures en compactant la structure.

Dans le cadre d'une application, la ténacité aux chocs détermine directement la fiabilité et la durabilité de l'alliage. Dans le domaine aérospatial, les contrepoids des avions ou des hélicoptères doivent résister aux vibrations et aux chocs causés par le décollage, l'atterrissage ou les turbulences. Une ténacité élevée garantit que les composants ne tomberont pas en panne sous l'effet de charges transitoires. Dans les noyaux de projectiles perforants militaires, les alliages doivent résister aux impacts à grande vitesse (vitesse initiale de 1 500 à 1 800 m/s), et une bonne ténacité garantit l'intégrité du noyau lors de la pénétration du blindage. Dans les équipements médicaux, les collimateurs ou les composants de robots chirurgicaux peuvent être accidentellement impactés, et la ténacité aux chocs garantit que leur précision et leur fonctionnement ne sont pas affectés. L'optimisation des procédés doit se concentrer sur le contrôle des impuretés traces (comme le carbone ou l'oxygène) afin d'éviter la formation de phases fragiles qui réduisent la ténacité. Un traitement de surface (comme le polissage ou le revêtement) peut réduire les défauts de surface et améliorer encore la résistance aux chocs.

3.2 Propriétés thermiques et électriques de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

Les propriétés thermiques et électriques des alliages tungstène-nickel-cuivre sont des atouts majeurs pour leur application dans les domaines de haute technologie, notamment dans les applications exigeant une gestion thermique efficace ou une compatibilité électromagnétique, comme les blocs d'équilibrage des machines de lithographie dans l'industrie électronique, les blindages des scanners médicaux et des IRM, et les composants haute température dans l'aérospatiale. Les propriétés thermiques comprennent principalement la conductivité thermique et la dilatation thermique, qui déterminent la capacité de dissipation thermique et la stabilité dimensionnelle de l'alliage dans les environnements à haute température. Les propriétés électriques se reflètent principalement dans la conductivité électrique et l'amagnétisme, garantissant que l'alliage ne provoque pas d'interférences dans les environnements sensibles aux interférences électromagnétiques. Ces propriétés découlent de la grande stabilité thermique du tungstène et de l'excellente conductivité thermique et électrique de la phase de liaison nickel-cuivre, obtenues en synergie grâce à l'optimisation des procédés de métallurgie des poudres. En termes de propriétés thermiques, les alliages tungstène-nickel-cuivre présentent une conductivité thermique élevée, ce qui permet une dissipation rapide de la chaleur et prévient les surchauffes locales. Cela est dû à la conductivité thermique élevée du cuivre et à la répartition uniforme de la solution solide nickel-cuivre. La grande stabilité thermique des particules de tungstène garantit l'intégrité structurelle de l'alliage à haute température. Son faible coefficient de dilatation thermique permet à l'alliage de conserver sa stabilité dimensionnelle face aux variations de température, évitant ainsi les déformations dues aux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contraintes thermiques. Il est particulièrement adapté aux applications exigeant une précision extrême, telles que les plateformes de machines de lithographie ou les équipements médicaux. Lors de la production, le frittage en phase liquide et le pressage isostatique à chaud garantissent la compacité de la microstructure et réduisent la résistance des joints de grains lors de la conduction thermique. Le traitement thermique améliore encore la conductivité thermique en optimisant la structure des joints de grains tout en maintenant une faible dilatation thermique.

En termes de propriétés électriques, la nature amagnétique de l'alliage tungstène-nickel-cuivre constitue son principal avantage. Grâce aux propriétés paramagnétiques du nickel et du cuivre, elle évite les interférences électromagnétiques et lui permet d'être performant dans des environnements sensibles aux champs électromagnétiques tels que les équipements d'IRM, les machines de lithographie et les systèmes radar. Bien que la conductivité électrique de l'alliage soit inférieure à celle du cuivre pur, elle est suffisante pour répondre aux besoins de la plupart des applications électroniques, notamment dans les scénarios où une densité élevée et une compatibilité électromagnétique doivent être prises en compte. La conductivité de la phase liante nickel-cuivre confère à l'alliage des propriétés électriques stables, tandis que la faible conductivité des particules de tungstène est compensée par l'optimisation de la microstructure. Le contrôle du procédé doit éviter les inclusions d'oxyde ou la ségrégation qui affectent la conductivité ou l'amagnétisme. Les revêtements de surface (tels que le PVD TiN) peuvent protéger davantage l'alliage de la corrosion environnementale et maintenir la stabilité des propriétés électriques.

3.2.1 Conductivité thermique

L'alliage tungstène-nickel-cuivre est le principal indicateur de sa performance thermique, reflétant sa capacité à conduire et à disperser rapidement la chaleur. Cette propriété lui confère un avantage significatif dans les applications nécessitant une gestion thermique efficace, telles que les blocs d'équilibrage des machines de lithographie dans l'industrie électronique, la protection contre les radiations des équipements médicaux et les composants aérospatiaux haute température. L'excellente conductivité thermique est principalement due à l'effet synergique de la conductivité thermique élevée du cuivre et de la phase de liaison nickel-cuivre. Le cuivre, métal hautement conducteur thermique, peut rapidement conduire la chaleur de la source de chaleur vers d'autres zones afin d'éviter toute surchauffe locale, tandis que l'ajout de nickel forme une solution solide stable et améliore la conductivité thermique de la phase de liaison. Bien que la conductivité thermique du tungstène soit inférieure à celle du cuivre, sa grande stabilité thermique garantit que l'alliage conserve son intégrité structurelle à haute température et évite toute déformation ou défaillance due aux contraintes thermiques.

La conductivité thermique est fortement influencée par la composition et la microstructure de l'alliage. Le rapport de phase de liaison nickel-cuivre détermine directement les performances de conductivité thermique. Les alliages à forte teneur en cuivre présentent généralement une meilleure conductivité thermique, car celle-ci est bien supérieure à celle du tungstène et du nickel. Cependant, une teneur excessive en cuivre peut réduire la résistance globale de l'alliage ; il est donc nécessaire de trouver un équilibre entre conductivité thermique et propriétés mécaniques. Le frittage en phase liquide forme une matrice nickel-cuivre uniforme à haute température, comble les espaces entre les particules de tungstène, réduit la résistance des joints de grains et des pores à la conduction thermique, améliorant ainsi la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conductivité thermique. Le pressage isostatique à chaud optimise encore la densité de la microstructure en éliminant les micropores, ce qui fluidifie le transfert thermique. Les traitements thermiques tels que le recuit peuvent également améliorer efficacement la conductivité thermique en réparant les défauts cristallins et en optimisant la structure des joints de grains, garantissant ainsi la stabilité des performances de l'alliage dans les environnements à haute température.

Dans les applications pratiques, le niveau de conductivité thermique influence directement les performances des alliages dans les domaines de haute technologie. Par exemple, dans une plateforme de lithographie, l'alliage doit disperser rapidement la chaleur générée par le laser ou le moteur pour maintenir une précision inférieure au nanomètre. Une excellente conductivité thermique assure la stabilité thermique de la plateforme. Dans les équipements de tomodensitométrie médicale, les pièces de blindage génèrent de la chaleur sous un rayonnement à haute énergie. Une conductivité thermique élevée permet de dissiper rapidement la chaleur et d'éviter la surchauffe ou la dégradation des performances de l'équipement. Dans le domaine aérospatial, les missiles ou les composants de turbines fonctionnent dans des environnements gazeux à haute température. La conductivité thermique de l'alliage garantit la gestion thermique des composants et prolonge leur durée de vie. L'optimisation des procédés doit tenir compte de la pureté des matières premières et des paramètres de frittage afin d'éviter les inclusions d'oxydes ou la ségrégation qui réduisent la conductivité thermique.

3.2.2 Conductivité

tungstène -nickel-cuivre est un indicateur important de ses propriétés électriques, reflétant sa capacité à conduire le courant. Bien que sa conductivité électrique soit inférieure à celle du cuivre pur, elle est suffisante pour répondre aux besoins de la plupart des applications électroniques et médicales, notamment dans les situations où une densité élevée et une compatibilité électromagnétique doivent être prises en compte. Cette performance modérée en matière de conductivité électrique résulte de l'équilibre entre la conductivité de la phase de liaison nickel-cuivre et la conductivité relativement faible des particules de tungstène. Le cuivre, métal hautement conducteur, constitue le principal chemin de conduction du courant pour l'alliage, tandis que l'ajout de nickel forme une solution solide Ni-Cu stable, maintenant une conductivité électrique modérée. Bien que les propriétés de haute résistance du tungstène réduisent sa conductivité globale, sa densité élevée et son amagnétisme lui confèrent des avantages uniques dans les environnements sensibles aux interférences électromagnétiques, évitant ainsi toute interférence magnétique.

La conductivité électrique est influencée par la composition, la microstructure et le procédé de fabrication de l'alliage. Les alliages à forte teneur en cuivre présentent généralement une conductivité électrique supérieure, celle du cuivre étant bien supérieure à celle du nickel et du tungstène. Cependant, une teneur en cuivre trop élevée peut entraîner une diminution de la résistance. Un équilibre entre conductivité électrique et propriétés mécaniques doit donc être atteint en optimisant le rapport nickel-cuivre (par exemple, 7:3 ou 3,5:1,5). Le frittage en phase liquide réduit la résistance aux joints de grains et favorise un transfert de courant fluide en formant une matrice nickel-cuivre continue. Le pressage isostatique à chaud améliore encore la densité de la microstructure et élimine les effets négatifs des pores et des inclusions sur la conductivité. La gestion des impuretés est essentielle. Par exemple, des impuretés telles

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que l'oxygène ou le carbone peuvent former des oxydes ou des carbures non conducteurs, réduisant ainsi la conductivité. Par conséquent, des matières premières de haute pureté (tungstène > 99,9 %) et une atmosphère d'argon de haute pureté sont nécessaires pour le frittage. Dans les applications, la conductivité modérée et l'absence de magnétisme confèrent à l'alliage tungstène-nickel-cuivre de bonnes performances dans l'industrie électronique et le domaine médical. Par exemple, dans les équipements d'IRM, les blindages de l'alliage doivent éviter les interférences du champ magnétique, et la conductivité modérée combinée à l'absence de magnétisme garantit une sensibilité et une précision élevées de l'équipement. Dans la machine de lithographie, la conductivité du bloc d'équilibrage assure son fonctionnement normal dans l'environnement électromagnétique et évite l'accumulation ou les interférences d'électricité statique. L'optimisation du procédé doit se concentrer sur l'uniformité de la microstructure afin d'éviter la ségrégation ou les défauts réduisant la conductivité.

3.2.3 Coefficient de dilatation thermique

L' alliage tungstène-nickel-cuivre se caractérise par ses performances thermiques exceptionnelles, reflétant sa stabilité dimensionnelle face aux variations de température. Son faible coefficient de dilatation thermique lui confère un avantage significatif dans les applications exigeant une précision et une stabilité thermique élevées, telles que les plateformes de lithographie, les collimateurs médicaux et les contrepoids aérospatiaux. Cette faible dilatation thermique est principalement due à la faible dilatation thermique inhérente au tungstène, combinée à la ductilité modérée de la phase de liaison nickel-cuivre, qui permet à l'alliage de conserver sa forme et sa stabilité dimensionnelle malgré les fluctuations de température, évitant ainsi les déformations et les fissures dues aux contraintes thermiques.

Le coefficient de dilatation thermique dépend à la fois de la composition et de la microstructure de l'alliage. Le point de fusion élevé du tungstène et sa structure cubique centrée lui confèrent un taux de dilatation thermique extrêmement faible, déterminant les caractéristiques globales de dilatation thermique de l'alliage. Le nickel et le cuivre présentent des coefficients de dilatation thermique plus élevés que le tungstène, mais grâce à une conception à rapport raisonnable, la contribution de la phase de liaison à la dilatation thermique est minimisée. Le frittage en phase liquide forme une microstructure uniforme et les particules de tungstène sont étroitement liées à la matrice nickel-cuivre par le col de frittage, réduisant ainsi le glissement des joints de grains et la concentration des contraintes thermiques. Le pressage isostatique à chaud améliore encore la densité et la stabilité thermique de la structure en éliminant la microporosité. Les traitements thermiques tels que le recuit améliorent la stabilité dimensionnelle de l'alliage pendant les cycles thermiques en optimisant la structure des joints de grains et en éliminant les contraintes résiduelles, évitant ainsi les microfissures dues aux variations de température.

Dans les applications pratiques, le faible coefficient de dilatation thermique fait de l'alliage tungstène-nickel-cuivre un choix idéal pour les équipements de haute précision. Par exemple, dans une machine de photolithographie, la plateforme doit maintenir une précision inférieure au nanomètre pendant les cycles de chauffage et de refroidissement du laser. Ce faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité de la plateforme et évite toute déformation thermique affectant la gravure des motifs. Dans le secteur aérospatial, les contrepoids fonctionnent dans des gaz à haute température ou des environnements à basse

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

température, et ce faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité du centre de gravité. Le collimateur des équipements médicaux doit conserver sa forme sous la chaleur générée par le rayonnement, et sa faible dilatation thermique garantit sa précision et sa fiabilité. L'optimisation des procédés doit éviter que des impuretés (comme l'oxygène ou le carbone) ne forment des phases à forte dilatation qui affectent les performances globales.

3.2.4 Performances de dissipation thermique

tungstène -nickel-cuivre offre une excellente performance thermique. Il combine une conductivité thermique élevée et un faible coefficient de dilatation thermique, permettant une dissipation rapide de la chaleur et une stabilité dimensionnelle optimale. Ces performances en font un excellent choix pour les applications nécessitant une gestion thermique efficace, telles que les composants de gestion thermique des machines de photolithographie dans l'industrie électronique, la protection contre les radiations des équipements médicaux et les composants haute température dans l'aérospatiale. Cette excellente dissipation thermique est due à la conductivité thermique élevée du cuivre et à la répartition uniforme de la matrice nickel-cuivre, qui permet un transfert rapide de la chaleur de la source vers l'extérieur et évite ainsi toute surchauffe locale. De plus, sa faible dilatation thermique garantit que les composants ne se déformeront ni ne tomberont en panne lors des cycles thermiques.

Les performances de dissipation thermique dépendent à la fois de la composition de l'alliage, de sa microstructure et du procédé de fabrication. L'augmentation de la teneur en cuivre améliore considérablement l'efficacité de la dissipation thermique, car le cuivre présente une conductivité thermique bien supérieure à celle du tungstène et du nickel, et peut transférer rapidement la chaleur. L'ajout de nickel forme une solution solide Ni-Cu stable, ce qui améliore la conductivité thermique de la phase de liaison et offre une protection antioxydante empêchant l'oxydation à haute température de réduire les performances de dissipation thermique. La grande stabilité thermique des particules de tungstène garantit l'intégrité structurelle de l'alliage à haute température, évitant ainsi le ramollissement thermique ou la dégradation des performances. Le frittage en phase liquide réduit les obstacles à la conduction thermique des joints de grains et des pores en formant une matrice nickel-cuivre continue. Le pressage isostatique à chaud améliore encore la densité de la microstructure et élimine la résistance des micropores à la conduction thermique. Un traitement de surface (tel qu'un revêtement à haute conductivité thermique ou un polissage à $R_a < 0,4 \mu\text{m}$) peut améliorer l'efficacité de la dissipation thermique de surface et accélérer le transfert de chaleur vers l'environnement.

Dans les applications pratiques, la performance de dissipation thermique détermine directement l'applicabilité de l'alliage dans les domaines de haute technologie. Dans les machines de photolithographie, le bloc d'équilibrage doit disperser rapidement la chaleur générée par le laser ou le moteur, et une excellente performance de dissipation thermique garantit la stabilité thermique et la précision de la plateforme. Dans les équipements de tomographie médicale, les pièces de blindage génèrent de la chaleur sous un rayonnement à haute énergie, et une dissipation thermique efficace évite la surchauffe de l'équipement et prolonge sa durée de vie. Dans le domaine aérospatial, les composants de turbines ou de missiles fonctionnent dans un environnement gazeux à haute température, et la performance de dissipation thermique garantit la fiabilité et la durabilité des composants. L'optimisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des procédés doit tenir compte de la pureté des matières premières et des paramètres de frittage afin d'éviter les inclusions d'oxydes ou la ségrégation qui réduisent l'efficacité de la dissipation thermique.

3.3 Stabilité chimique de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

L'alliage tungstène-nickel-cuivre est largement utilisé dans les domaines aérospatial, médical, électronique et militaire en raison de sa densité élevée, de ses excellentes propriétés mécaniques, de son amagnétisme et de ses remarquables propriétés thermiques et électriques. Préparé par métallurgie des poudres, cet alliage utilise du tungstène comme composant principal, complété par du nickel et du cuivre comme phases de liaison. Il forme une microstructure dense et présente une excellente stabilité chimique. Sa stabilité chimique se reflète principalement dans sa résistance à la corrosion et à l'oxydation, lui permettant de maintenir ses performances à long terme dans des environnements difficiles tels que l'humidité, l'acidité ou les températures élevées. Cette stabilité est due à l'inertie chimique du tungstène et à l'effet protecteur de la phase de liaison nickel-cuivre, répondant ainsi aux exigences des applications à haute fiabilité.

3.3.1 Résistance à la corrosion

tungstène -nickel-cuivre est un élément important de sa stabilité chimique, reflétant sa capacité à résister à l'érosion chimique dans des environnements corrosifs tels que l'humidité, l'acide ou le brouillard salin. Cette propriété lui permet d'être performant dans des applications exigeant un fonctionnement stable à long terme, comme les équipements médicaux, l'ingénierie navale et l'industrie électronique, comme le blindage des scanners médicaux, les contrepoids de navires ou les boîtiers d'équipements électroniques. Son excellente résistance à la corrosion est principalement due à l'effet synergique de l'inertie chimique du tungstène et de la résistance à la corrosion du nickel. En tant que composant principal, le tungstène présente une stabilité chimique extrêmement élevée et ne réagit pas facilement dans la plupart des environnements acides ou alcalins, ce qui constitue la base de la résistance à la corrosion de l'alliage. Le nickel forme une couche protectrice stable lors de la phase de liaison, ce qui permet de résister efficacement à l'érosion des produits chimiques externes et de prolonger la durée de vie de l'alliage.

La résistance à la corrosion dépend à la fois de la composition, de la microstructure et de l'état de surface de l'alliage. Le nickel joue un rôle majeur dans la phase de liaison nickel-cuivre. Sa structure cubique à faces centrées et ses propriétés antioxydantes lui permettent de former une couche protectrice d'oxyde dense en milieu humide ou acide, empêchant toute pénétration ultérieure du milieu corrosif. Bien que l'ajout de cuivre améliore la conductivité thermique et l'amagnétisme, sa résistance à la corrosion est légèrement inférieure à celle du nickel. Une légère corrosion peut se produire dans certains milieux acides (comme l'acide nitrique). Il est donc nécessaire d'optimiser la résistance globale à la corrosion grâce à un rapport nickel-cuivre raisonnable (par exemple, 7:3 ou 3,5:1,5). Le frittage en phase liquide forme une matrice nickel-cuivre uniforme à haute température, comble les espaces entre les particules de tungstène, réduit les micropores et l'exposition des joints de grains, et limite la pénétration des milieux corrosifs. Le pressage isostatique à chaud améliore encore la densité de la microstructure, lisse la surface de l'alliage et réduit le point de départ de la corrosion. Les processus de traitement de surface, tels que le polissage ou la passivation chimique, peuvent encore améliorer la résistance à la corrosion et former une couche

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

protectrice plus dense, particulièrement adaptée à l'utilisation à long terme des équipements médicaux dans un environnement stérilisé.

Dans les applications pratiques, la résistance à la corrosion détermine directement la fiabilité et la durabilité de l'alliage. Dans le domaine médical, les éléments de blindage des équipements de tomodensitométrie ou d'IRM doivent être exposés à des désinfectants ou à des environnements humides pendant une longue période. Une excellente résistance à la corrosion garantit l'intégrité de la surface et la stabilité fonctionnelle des pièces. En ingénierie navale, les contrepoids des navires peuvent être exposés à l'eau de mer ou au brouillard salin. La résistance à la corrosion de l'alliage évite la dégradation du matériau et prolonge sa durée de vie. Dans l'industrie électronique, le boîtier ou la masselotte d'équilibrage doit résister aux produits chimiques présents dans l'environnement de production. Cette résistance à la corrosion garantit le fonctionnement à long terme de l'équipement. L'optimisation des procédés exige un contrôle strict de la pureté des matières premières afin d'éviter la formation de phases corrosives par des impuretés telles que l'oxygène ou le soufre. Les revêtements de surface (tels que le PVD TiN ou le DLC) peuvent améliorer encore la résistance à la corrosion, notamment dans les environnements chimiques agressifs. Le contrôle qualité vérifie la résistance à la corrosion par des essais au brouillard salin et des expériences d'immersion afin de garantir la conformité de l'alliage aux normes industrielles (telles que la norme ISO 9227).

3.3.2 Propriétés antioxydantes

L'alliage tungstène-nickel-cuivre présente une autre caractéristique clé de sa stabilité chimique, qui reflète sa capacité à résister aux réactions d'oxydation à haute température ou en atmosphère oxydante. Cette propriété lui confère des avantages significatifs dans les composants aérospatiaux haute température, les composants de gestion thermique dans l'industrie électronique et les équipements militaires, tels que les contrepoids de turbine, les dissipateurs thermiques pour machines de photolithographie ou les boucliers antimissiles. Son excellente résistance à l'oxydation est principalement due à la résistance à l'oxydation du nickel et à la stabilité thermique du tungstène. À haute température, le nickel forme une couche protectrice d'oxyde dense qui empêche l'oxygène de corroder davantage la structure interne. Son point de fusion élevé et son inertie chimique lui permettent de maintenir son intégrité structurelle à haute température et d'éviter la dégradation des performances due à l'oxydation. Bien que le cuivre présente une résistance à l'oxydation plus faible, son impact négatif est minimisé sous la protection du nickel.

La résistance à l'oxydation est fortement influencée par la composition de l'alliage, sa microstructure et les conditions de traitement. Le nickel joue un rôle antioxydant majeur dans la phase liante nickel-cuivre. Sa couche d'oxyde (NiO) présente une faible vitesse de diffusion à haute température ($< 1000\text{ }^\circ\text{C}$), ce qui permet de bloquer efficacement la pénétration de l'oxygène et de protéger les particules de tungstène internes et la matrice nickel-cuivre. La grande stabilité thermique du tungstène renforce encore sa résistance à l'oxydation. Même à haute température, sa structure cubique centrée reste stable et résiste à la corrosion oxydative. Le cuivre peut former de l'oxyde de cuivre (CuO ou Cu_2O) en atmosphère oxydante, mais l'effet protecteur du nickel peut inhiber efficacement l'oxydation du cuivre grâce à un rapport nickel-cuivre raisonnable (par exemple, 7:3). Le frittage en phase liquide forme une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

microstructure dense à haute température, réduisant ainsi l'exposition des pores et des joints de grains, et limitant ainsi la pénétration de l'oxygène. Le pressage isostatique à chaud améliore encore la densité de la structure en éliminant les micropores, rendant la surface de l'alliage moins sensible à l'oxydation.

Dans les applications pratiques, la résistance à l'oxydation affecte directement la fiabilité et la durée de vie de l'alliage dans les environnements à haute température. Dans le domaine aérospatial, les composants de turbines ou de missiles fonctionnent dans des environnements gazeux à haute température. Une excellente résistance à l'oxydation garantit l'intégrité de surface des contreponds ou des pièces de blindage et évite les déformations ou les défaillances dues à l'oxydation. Dans l'industrie électronique, les composants de dissipation thermique des machines de photolithographie doivent résister à la chaleur générée par les lasers ou les moteurs, et la résistance à l'oxydation assure la stabilité en fonctionnement prolongé à haute température. Dans les équipements militaires, les pièces de blindage peuvent être exposées à des atmosphères oxydantes à haute température, et la résistance à l'oxydation de l'alliage maintient sa fonction de blindage électromagnétique. L'optimisation des procédés doit se concentrer sur le contrôle des impuretés afin d'éviter que des impuretés telles que le carbone ou le soufre ne forment des phases facilement oxydables. Un traitement de surface (comme la passivation chimique ou le revêtement antioxydant) peut améliorer encore la résistance à l'oxydation, en particulier dans les environnements cycliques à haute température. Le contrôle qualité vérifie la résistance à l'oxydation grâce à des tests d'oxydation à haute température et à une analyse thermogravimétrique (ATG) pour garantir que l'alliage répond aux normes de l'industrie aérospatiale ou électronique.

3.4 CTIA GROUP LTD Alliage tungstène-nickel-cuivre FDS

La fiche de données de sécurité (FDS) est un document important qui décrit les propriétés physiques et chimiques des alliages tungstène-nickel-cuivre, ainsi que les instructions d'utilisation en toute sécurité. Elle fournit des conseils aux utilisateurs et aux opérateurs sur la manipulation en toute sécurité et les mesures d'urgence. L'alliage tungstène-nickel-cuivre (W-Ni-Cu) produit par CTIA GROUP LTD est un alliage haute densité largement utilisé dans les secteurs aérospatial, médical, électronique et militaire. Il est très apprécié pour sa haute densité, ses excellentes propriétés mécaniques, son amagnétisme et sa bonne conductivité thermique.

1. Informations sur le produit

Nom du produit : Alliage de tungstène nickel cuivre (alliage W-Ni-Cu)

Alias : Alliage de tungstène haute densité, alliage lourd de tungstène

Application : Utilisé dans les contreponds aérospatiaux, les pièces de protection contre les radiations médicales, les dissipateurs thermiques et les blocs d'équilibrage de l'industrie électronique, etc.

2. Identification des dangers

L'alliage tungstène-nickel-cuivre n'est généralement pas considéré comme une substance dangereuse dans des conditions normales d'utilisation (sous forme solide, comme des plaques, des barres ou des pièces usinées) et n'est pas classé comme substance dangereuse selon le Système général harmonisé de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

classification et d'étiquetage des produits chimiques (SGH).

3. Informations sur la composition/les ingrédients

L'alliage tungstène nickel cuivre est un matériau composite dont les composants comprennent :

- **Tungstène (W)** : Le composant principal, représentant 90 à 97 %, offre une densité élevée et une dureté élevée.
- **Nickel (Ni)** : Phase liante, représentant 2 à 7 %, améliorant la ténacité et la résistance à la corrosion.
- **Cuivre (Cu)** : La phase de liaison, représentant 1 à 5 %, améliore la conductivité thermique et les propriétés non magnétiques.
- **Oligo -éléments** : peut contenir des traces de cobalt, de molybdène ou d'autres impuretés (< 0,5 %), selon le procédé de production.

5. Mesures de lutte contre l'incendie

L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau ininflammable sans risque d'explosion.

6. Traitement d'urgence des fuites

L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau solide sans risque de fuite.

7. Manipulation et stockage

- **Fonctionnement en toute sécurité** : Le traitement doit être effectué dans un environnement bien ventilé et les opérateurs doivent porter des lunettes et des gants de protection.
- **Conditions de stockage** : À conserver dans un endroit sec et frais, à l'abri de l'humidité et des températures élevées. L'emballage du produit doit être résistant aux chocs (boîtes en bois ou coussins, par exemple) afin d'éviter tout dommage pendant le transport et le stockage.

8. Propriétés physiques et chimiques

- **Aspect** : Solide métallique gris argenté à surface lisse ou transformé en formes spécifiques (telles que plaques, tiges, blocs).
- **Odeur** : Inodore.
- **Point de fusion** : Le tungstène a un point de fusion extrêmement élevé (environ 3422°C), et le point de fusion de la phase de liaison nickel-cuivre est d'environ 1300-1450°C.
- **Densité** : Haute densité, les valeurs typiques sont de 16,5 à 18,5 g/cm³.
- **Solubilité** : Insoluble dans l'eau, résistant à la corrosion acide et alcaline, certains environnements acides (comme l'acide nitrique) peuvent légèrement corroder le cuivre.
- **Stabilité chimique** : Stable à température ambiante. À haute température, le nickel forme une couche d'oxyde protectrice qui améliore la résistance à l'oxydation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9. Stabilité et réactivité

- **Stabilité** : Stable dans des conditions normales d'utilisation et de stockage, aucun risque de décomposition.
- **Réactivité** : Ne réagit pas violemment avec l'eau, l'air ou les produits chimiques courants.
- **Conditions à éviter** : Évitez les environnements oxydants à haute température ou le contact prolongé avec des acides forts (tels que l'acide nitrique concentré), qui peuvent légèrement corroder le cuivre.

10. Considérations relatives à l'élimination

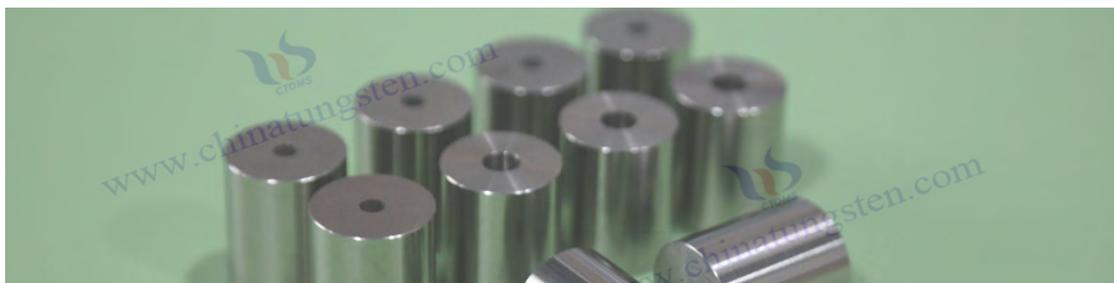
- **Traitement des déchets** : Classer et recycler conformément aux réglementations environnementales locales (telles que la norme chinoise GB 5085 ou les normes internationales relatives aux déchets dangereux) . Il est recommandé d'utiliser la dissolution chimique ou la séparation électrochimique pour recycler le tungstène, le nickel et le cuivre.
- **Élimination de l'emballage** : Les matériaux d'emballage (tels que les boîtes en bois ou en plastique) doivent être recyclés ou éliminés conformément à la réglementation locale.

11. Informations d'expédition

- **Classification de transport** : marchandise non dangereuse, pas d'exigences particulières de transport.
- **Exigences d'emballage** : Utilisez un emballage résistant aux chocs et à l'humidité (comme des boîtes en bois ou un rembourrage en mousse) pour garantir aucun dommage pendant le transport.

12. Informations réglementaires

- **Réglementations internationales** : Conforme à la norme OSHA sur la communication des renseignements sur les matières dangereuses (29CFR1910.1200) et aux exigences du SGH.
- **Réglementation chinoise** : Conforme à la réglementation sur la gestion de la sécurité des produits chimiques dangereux et à la norme GB/T 26038-2010 (norme sur les alliages de tungstène).
- **Autres** : Le nickel est soumis à la réglementation REACH et sa teneur doit être déclarée ; l'alliage dans son ensemble ne nécessite pas d'enregistrement chimique particulier.



CTIA GROUP LTD Alliage de tungstène nickel cuivre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 4 Essais de performance et normes de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

Matériau à haute densité, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est largement utilisé dans les domaines aérospatial, médical, électronique et militaire en raison de ses excellentes propriétés mécaniques (résistance à la traction de 700 à 900 MPa, allongement de 5 à 15 %), de ses propriétés amagnétiques, de son excellente conductivité thermique (120 à 150 W/ m·K) et de sa stabilité chimique. Afin de garantir que ses performances répondent aux exigences strictes des applications (telles que les contrepoids aérospatiaux ou les pièces de blindage médical), un contrôle qualité doit être effectué au moyen de méthodes d'essai précises et de normes internationales. L'analyse de la composition est au cœur des essais de performance et influence directement la densité, les propriétés mécaniques et les propriétés amagnétiques de l'alliage. Elle permet non seulement de vérifier la proportion des principaux éléments (tungstène, nickel, cuivre), mais aussi de détecter les traces d'impuretés afin de garantir la pureté et la constance des performances de l'alliage.

4.1 Méthode d'analyse de la composition de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

L'alliage tungstène-nickel-cuivre est la base du contrôle qualité. Il permet de vérifier que la proportion des principaux éléments (85 à 97 % de tungstène, 2 à 10 % de nickel, 1 à 8 % de cuivre) répond aux exigences de conception et garantit que les traces d'impuretés (telles que l'oxygène, le carbone et le soufre) n'affectent pas les performances. Les méthodes d'analyse de la composition comprennent principalement l'analyse spectrale, l'analyse chimique et l'analyse de surface, parmi lesquelles l'analyse spectrale est privilégiée en raison de sa grande précision, de sa rapidité et de son caractère non destructif. Les résultats d'analyse doivent être conformes aux normes internationales (telles que ASTM B777 ou GB/T 26038) afin de garantir la fiabilité de l'alliage dans les contrepoids aérospatiaux, les collimateurs médicaux ou les balances électroniques. Le processus de détection doit être réalisé dans un environnement propre et des échantillons d'étalonnage de haute pureté doivent être utilisés pour garantir l'exactitude des résultats.

4.1.1 Technologie d'analyse spectrale

L'analyse spectrale est la méthode principale pour analyser la composition des alliages tungstène-nickel-cuivre. Elle permet de déterminer le type d'éléments et leur teneur en mesurant le spectre émis ou absorbé par l'échantillon à une longueur d'onde spécifique. Cette méthode est largement utilisée dans la production d'alliages et le contrôle qualité en raison de sa grande sensibilité (limite de détection pouvant atteindre le ppm), de sa rapidité (analyse unique < 5 minutes) et de sa capacité à détecter plusieurs éléments simultanément. Les techniques d'analyse spectrale comprennent la spectroscopie de fluorescence X (XRF), la spectroscopie d'émission atomique par plasma à couplage inductif et la spectroscopie d'absorption atomique (AAS). Parmi les plus courantes, la XRF et l'ICP-AES permettent de vérifier la teneur en tungstène, nickel, cuivre et la distribution des oligo-éléments.

La spectroscopie de fluorescence X (XRF) est une technique d'analyse non destructive qui utilise les rayons X pour exciter les atomes à la surface de l'échantillon afin de produire une fluorescence caractéristique, et analyse sa longueur d'onde et son intensité pour déterminer la teneur en éléments. Adaptée aux échantillons d'alliages solides (tels que les plaques, les barres ou les pièces usinées), la XRF

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ne nécessite aucun prétraitement complexe et permet de détecter rapidement la proportion de tungstène, de nickel et de cuivre (précision de $\pm 0,2\%$). Son avantage réside dans sa simplicité d'utilisation et son adaptation au contrôle qualité en temps réel sur le site de production. Par exemple, pour la production de contreponds aérospatiaux, la XRF permet de vérifier rapidement si la composition de l'alliage est conforme à la norme ASTM B777 afin de garantir que la densité et les propriétés amagnétiques sont conformes. La XRF présente toutefois une faible sensibilité de détection des éléments légers (tels que le carbone et l'oxygène), ce qui nécessite son association à d'autres méthodes pour des analyses complémentaires.

La spectrométrie d'émission atomique à plasma inductif est une technique d'analyse de haute précision qui détermine la teneur en éléments par dissolution de l'échantillon, excitation par plasma et mesure du spectre d'émission. L'ICP-AES est adaptée à la détection des éléments majeurs et des traces d'éléments dans les alliages tungstène-nickel-cuivre, avec une limite de détection allant jusqu'au ppb. L'échantillon doit être prétraité par dissolution acide (comme l'acide nitrique ou l'eau régale) et dissous dans une solution pour analyse. L'ICP-AES permet de détecter plusieurs éléments simultanément et convient à l'analyse complète des composants en laboratoire. Par exemple, pour la production de pièces de blindage médical, l'ICP-AES permet de vérifier si la teneur en nickel est conforme aux exigences de biocompatibilité de la norme ISO 10993 et d'éviter les risques d'allergies dues à un excès de nickel. Son inconvénient réside dans la complexité du prétraitement de l'échantillon et son inadaptation à une détection rapide sur site.

Le choix de la technologie d'analyse spectrale doit être déterminé en fonction des exigences de l'application et des conditions de l'équipement. La fluorescence X (XRF) est adaptée aux tests rapides et non destructifs sur site, tandis que l'ICP-AES est plus adaptée aux analyses de laboratoire de haute précision. Des échantillons étalons de haute pureté ($> 99,99\%$) doivent être utilisés pour l'étalonnage pendant l'analyse afin d'éviter que les effets de matrice ou la dérive de l'instrument n'affectent les résultats. Le contrôle environnemental (comme des salles blanches ou une température et une humidité constantes) peut réduire les interférences dues à la poussière ou à l'humidité. Le contrôle qualité vérifie la fiabilité des résultats par des tests répétés et une analyse de l'écart type.

4.1.2 Détection des éléments impurs

La détection des impuretés est un élément important de l'analyse de la composition des alliages tungstène-nickel-cuivre. Elle vise à identifier et quantifier les traces d'impuretés (telles que l'oxygène, le carbone, le soufre, l'azote ou le fer, généralement $< 0,5\%$) afin de garantir qu'elles n'affectent pas les propriétés mécaniques, la conductivité thermique ou la stabilité chimique de l'alliage. Les impuretés peuvent provenir des poudres de matières premières (tungstène, nickel, cuivre), de l'atmosphère de frittage ou de l'environnement de traitement. Un dépassement de la teneur standard peut entraîner des défauts microstructuraux (tels que des inclusions d'oxydes ou de carbures), réduire la ténacité, la résistance à la corrosion ou les propriétés amagnétiques. Les méthodes de détection des impuretés comprennent l'analyse spectrale, l'analyse chimique et l'analyse par instruments spéciaux, qui doivent atteindre une sensibilité élevée (de l'ordre du ppb au ppm) pour répondre aux exigences des industries aérospatiale, médicale et électronique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'oxygène et le carbone sont les impuretés les plus courantes dans les alliages tungstène-nickel-cuivre et doivent être détectés par des techniques d'analyse spécifiques. L'analyse de l'oxygène utilise généralement la méthode de fusion sous gaz inerte (Inert Gas Fusion), où l'échantillon est chauffé à plus de 2 000 °C dans de l'hélium ou de l'argon de haute pureté, libérant de l'oxygène et réagissant avec le carbone pour former du CO ou du CO₂. La teneur en oxygène est mesurée par un détecteur infrarouge. Une teneur élevée en oxygène peut former des inclusions d'oxydes (comme WO₃ ou NiO₂), ce qui réduit la force de liaison interfaciale et affecte la résistance à la corrosion des pièces de blindage médical. L'analyse du carbone utilise la méthode de combustion (Combustion Analysis), où l'échantillon brûle dans l'oxygène pour générer du CO₂. La teneur en carbone est mesurée par un détecteur infrarouge. Une teneur élevée en carbone peut former des carbures (comme le WC), qui augmentent la dureté mais réduisent la ténacité, affectant ainsi la résistance aux chocs des contrepois aérospatiaux.

Les impuretés telles que le soufre et l'azote sont détectées par spectrométrie de masse à décharge lumineuse (GD-MS) ou ICP-AES. La GD-MS excite la surface de l'échantillon par décharge lumineuse et analyse le spectre de masse ionique. La limite de détection peut atteindre le ppb, ce qui est adapté à l'analyse des impuretés multi-éléments. Une teneur trop élevée en soufre peut entraîner la formation d'inclusions de sulfure, réduisant ainsi la résistance à la corrosion ; une teneur trop élevée en azote peut fragiliser les joints de grains et affecter la stabilité des masselottes d'équilibrage dans l'industrie électronique. Le fer, en tant qu'impureté potentielle (provenant des matières premières ou des outils de traitement), nécessite une attention particulière car il peut introduire un faible magnétisme, détruire les propriétés amagnétiques de l'alliage et affecter les performances des pièces de blindage des équipements d'IRM. L'ICP-AES permet de détecter avec précision la teneur en fer par dissolution acide de l'échantillon, puis par analyse.

Les tests d'impuretés nécessitent un contrôle strict de la préparation des échantillons et des conditions environnementales. La surface de l'échantillon doit être polie et nettoyée à l'éthanol pour éviter toute contamination. Les instruments d'analyse doivent être étalonnés régulièrement et des échantillons standards de haute pureté sont utilisés pour garantir la précision. L'optimisation du procédé de frittage permet de réduire l'introduction d'oxygène et d'azote ; le criblage des matières premières permet de contrôler les impuretés initiales. Le contrôle qualité vérifie l'uniformité de la distribution des impuretés par échantillonnage multipoint et analyse statistique. Les résultats des tests doivent être conformes aux normes ASTM B777 ou GB/T 26038 pour garantir la constance des performances de l'alliage.

4.2 Méthode d'essai de performance de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

Les alliages tungstène-nickel-cuivre sont conçus pour évaluer en profondeur leurs propriétés physiques et mécaniques afin de garantir leur performance dans l'application cible. Les méthodes d'essai comprennent des tests de densité et de compacité, des tests de propriétés mécaniques, des tests de propriétés thermiques et des analyses de microstructure, fournissant chacune des données précises sur des propriétés spécifiques. Les tests de densité et de compacité vérifient la distribution de masse et l'intégrité structurelle de l'alliage, tandis que les tests de propriétés mécaniques évaluent sa résistance et sa ténacité sous contrainte. Ces essais sont généralement réalisés en laboratoire ou sur un site de production à l'aide d'équipements et de procédés standardisés afin de garantir que les résultats répondent

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aux exigences strictes des industries aérospatiale, médicale ou électronique. La maîtrise de l'environnement d'essai est essentielle à la précision des résultats.

4.2.1 Essai de densité et de compacité

Les tests de densité et de compacité constituent la base des essais de performance des alliages tungstène-nickel-cuivre. Ils permettent d'évaluer la distribution de masse et la compacité de la microstructure de l'alliage, ce qui affecte directement ses performances dans les contrepoids aérospatiaux, les pièces de blindage médical et les blocs d'équilibrage de l'industrie électronique. La densité reflète la masse de l'alliage par unité de volume et constitue l'indicateur clé de ses caractéristiques de haute densité, garantissant une distribution de masse efficace des composants dans un espace limité. La densité mesure la porosité de l'alliage et reflète l'effet du procédé de fabrication (tel que le frittage en phase liquide ou le pressage isostatique à chaud). La microstructure dense peut améliorer la résistance, la ténacité et la résistance à la corrosion de l'alliage.

Les tests de densité utilisent généralement le principe d'Archimède pour calculer la masse volumique en mesurant la différence de masse de l'échantillon d'alliage dans l'air et dans un liquide (comme l'eau ou l'éthanol). Cette méthode, simple et efficace, convient aux échantillons solides (comme les barres, les plaques ou les pièces usinées) et permet de vérifier rapidement si l'alliage atteint la masse volumique prévue et répond aux exigences de densité élevée des contrepoids aérospatiaux ou des pièces de blindage médical. Lors de l'essai, la surface de l'échantillon doit être nettoyée et polie afin d'éliminer toute couche d'huile ou d'oxyde et de garantir la précision de la mesure. Le choix du liquide doit tenir compte de sa non-corrosivité pour l'alliage afin d'éviter que les réactions de surface n'affectent les résultats. Les résultats des tests de densité reflètent directement la teneur en tungstène. Les alliages à forte teneur en tungstène ont généralement une masse volumique plus élevée et conviennent aux applications nécessitant une distribution de masse extrêmement élevée, comme les noyaux perforants militaires.

Les tests de densité évaluent la porosité de l'alliage par une méthode plus complexe, combinant généralement mesure de la densité et analyse microstructurale. Une méthode courante consiste à comparer la densité mesurée à la densité théorique pour en déduire la porosité. Une autre méthode utilise un microscope pour observer la section transversale de l'échantillon et analyse la répartition des particules de tungstène et des phases liantes nickel-cuivre par microscopie métallographique ou électronique à balayage afin d'identifier la présence de micropores ou d'inclusions. Les alliages haute densité offrent de meilleures propriétés mécaniques et une meilleure stabilité chimique, et sont particulièrement adaptés à une utilisation à long terme dans des environnements dynamiques ou corrosifs. Le frittage en phase liquide forme une matrice nickel-cuivre uniforme à haute température pour combler les espaces entre les particules de tungstène, tandis que le pressage isostatique à chaud compacte davantage la structure, améliorant significativement la densité et réduisant l'impact négatif de la porosité sur les performances.

Dans les applications pratiques, les tests de densité et de compacité garantissent la fiabilité des alliages dans des scénarios de haute précision. Par exemple, dans le bloc d'équilibrage d'une machine de photolithographie, la haute densité assure la stabilité du centre de gravité, et la microstructure dense évite les microfissures causées par les vibrations. Dans les collimateurs médicaux, les alliages haute densité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

peuvent absorber efficacement les rayonnements tout en préservant leur intégrité structurelle pour une utilisation à long terme. L'optimisation des tests doit se concentrer sur l'uniformité de la préparation des échantillons afin d'éviter que des défauts de surface ou des inclusions internes n'affectent les résultats. Le contrôle environnemental et l'étalonnage de haute précision des instruments sont également essentiels.

4.2.2 Essai de résistance à la traction et de limite d'élasticité

Les essais de résistance à la traction et de limite d'élasticité sont les principales méthodes d'évaluation des propriétés mécaniques des alliages tungstène-nickel-cuivre. Ils permettent de mesurer leur capacité à résister à la rupture et à la déformation plastique sous charge de traction. Ces propriétés déterminent directement la fiabilité et la durabilité de l'alliage dans les contreponds aérospatiaux, les noyaux de projectiles militaires et les composants d'amortissement des vibrations de l'industrie électronique. La résistance à la traction reflète la résistance de l'alliage à la rupture sous contrainte de traction maximale et permet d'évaluer ses performances dans des environnements soumis à de fortes contraintes. La limite d'élasticité indique le niveau de contrainte auquel l'alliage commence à subir une déformation plastique irréversible, reflétant sa résistance à la déformation sous charge. Les excellentes propriétés mécaniques des alliages tungstène-nickel-cuivre résultent de l'effet synergique de la dureté élevée des particules de tungstène et de la ténacité de la phase de liaison nickel-cuivre, qui lui permet de maintenir son intégrité structurelle dans des environnements dynamiques ou soumis à des chocs.

Les essais de résistance à la traction sont généralement réalisés à l'aide d'une machine d'essai de traction. L'échantillon est transformé en une forme standard (par exemple, un échantillon en forme d'haltère) et une force de traction progressivement croissante est appliquée dans des conditions contrôlées jusqu'à la rupture de l'échantillon. Pendant l'essai, la courbe contrainte-déformation de l'échantillon est enregistrée afin d'analyser son comportement en traction. La résistance élevée à la traction de l'alliage tungstène-nickel-cuivre est due à la structure solide des particules de tungstène et à la répartition uniforme de la matrice nickel-cuivre. La phase nickel-cuivre relie étroitement les particules de tungstène à travers le col de frittage, dispersant efficacement les contraintes et évitant les fractures locales. L'essai doit être réalisé à température constante (généralement à température ambiante) afin d'éliminer l'influence de la température sur les propriétés mécaniques. La préparation de l'échantillon nécessite une surface lisse et exempte de défauts afin d'éviter toute concentration de contraintes susceptible d'entraîner des écarts dans les résultats. Les résultats de l'essai permettent de vérifier si l'alliage répond aux normes de l'industrie aérospatiale ou militaire et de garantir sa résistance aux fortes contraintes ou aux vibrations.

Les essais de limite d'élasticité sont réalisés simultanément aux essais de résistance à la traction. Le point auquel l'alliage commence à subir une déformation plastique est déterminé par l'analyse de la courbe contrainte-déformation. La ténacité de la phase liante nickel-cuivre permet à l'alliage de supporter une certaine déformation plastique avant de céder, d'absorber de l'énergie et d'éviter la rupture fragile. La performance de la limite d'élasticité est influencée par la composition et la microstructure de l'alliage. Les alliages à forte teneur en tungstène présentent généralement une limite d'élasticité plus élevée, car les particules de tungstène constituent la principale résistance à la déformation. L'optimisation du rapport nickel-cuivre (par exemple, 7:3 ou 3,5:1,5) assure un équilibre entre ténacité et résistance de la phase liante, évitant ainsi une teneur excessive en nickel (qui réduit la résistance) ou en cuivre (qui réduit la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dreté). Les procédés de frittage en phase liquide et de pressage isostatique à chaud réduisent la porosité et les défauts aux joints de grains, et augmentent la limite d'élasticité en formant une microstructure dense. Les procédés de traitement thermique, comme le recuit, optimisent encore le comportement plastique de l'alliage en éliminant les contraintes résiduelles.

Dans les applications pratiques, les résultats des essais de résistance à la traction et de limite d'élasticité influencent directement le choix et la conception des alliages. Par exemple, dans les contrepoids aérospatiaux, une résistance à la traction élevée garantit que les composants ne se rompent pas sous l'effet de vibrations ou d'impacts à haute fréquence, tandis que la limite d'élasticité assure leur stabilité dimensionnelle sous charge. Dans les noyaux de projectiles perforants militaires, les alliages nécessitent une résistance à la traction élevée pour résister aux impacts à grande vitesse, tandis que la limite d'élasticité garantit l'intégrité structurelle du noyau du projectile lors de la pénétration du blindage. L'optimisation des essais doit se concentrer sur la cohérence des échantillons, en utilisant des tailles d'éprouvettes et des procédures d'essai normalisées (telles que la norme ASTM E8). L'analyse des fractures permet de vérifier la fiabilité des résultats d'essai en observant les caractéristiques de rupture ductile ou fragile au microscope électronique à balayage (MEB).

4.2.3 Essai de ductilité

Les essais de ductilité constituent une méthode importante pour évaluer la capacité d'un alliage tungstène-nickel-cuivre à subir une déformation plastique sous traction. Ils reflètent sa capacité à éviter la rupture par fluage plastique sous contrainte. La ductilité est un indicateur clé de la ténacité et de l'usinabilité d'un alliage, particulièrement important pour les composants devant résister aux vibrations, aux chocs ou à des usinages complexes, tels que les contrepoids aérospatiaux, les collimateurs médicaux ou les composants antivibratoires de l'industrie électronique. Comparée à la fragilité du tungstène pur, la ductilité de l'alliage tungstène-nickel-cuivre est nettement améliorée, principalement grâce à l'effet plastique de la phase de liaison nickel-cuivre. La structure cubique à faces centrées du nickel offre une excellente ductilité et permet d'absorber l'énergie lors de l'étirement, tandis que l'ajout de cuivre améliore encore la ductilité et l'usinabilité de la phase de liaison, permettant à l'alliage de présenter une bonne aptitude à la déformation plastique sous contrainte.

Les essais de ductilité sont généralement réalisés par traction, à l'aide d'éprouvettes normalisées (par exemple, des éprouvettes en forme d'haltère) appliquant des forces de traction progressivement croissantes sur une machine d'essai de traction jusqu'à la rupture de l'échantillon. Pendant l'essai, l'allongement et le retrait transversal de l'échantillon sont enregistrés afin d'évaluer le degré de déformation plastique avant rupture. La ductilité des alliages tungstène-nickel-cuivre résulte de l'effet synergique des particules de tungstène et des phases de liaison nickel-cuivre. Les particules de tungstène offrent une dureté et une résistance élevées, tandis que la matrice nickel-cuivre forme un réseau continu à travers les cols de frittage pour disperser les contraintes et favoriser l'écoulement plastique. Les résultats de l'essai reflètent la capacité de l'alliage à absorber l'énergie sous tension et permettent de vérifier sa fiabilité en environnements dynamiques. L'essai doit être réalisé dans un environnement contrôlé (par exemple, à température ambiante et à humidité constante) afin d'éliminer toute interférence de facteurs externes. La préparation de l'échantillon nécessite une surface lisse et exempte de défauts afin d'éviter

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

toute concentration de contraintes susceptible de provoquer une rupture prématurée.

La ductilité est fortement influencée par la composition et la microstructure de l'alliage. Une augmentation de la teneur en nickel améliore généralement la ductilité, car sa ténacité lui permet de subir des déformations plastiques plus importantes sous tension. L'ajout de cuivre améliore encore la ductilité, et sa forte ductilité réduit la dureté de la phase liante, rendant l'alliage plus sensible à l'écoulement plastique sous contrainte. Cependant, le rapport nickel-cuivre doit être conçu de manière raisonnable, car une teneur trop élevée en nickel ou en cuivre peut réduire la résistance et affecter les performances globales. Le frittage en phase liquide forme une matrice nickel-cuivre uniforme à haute température, comble les espaces entre les particules de tungstène, renforce la force de liaison entre les particules et favorise la déformation plastique. Le pressage isostatique à chaud améliore encore la ductilité et réduit le risque de fracture en éliminant la microporosité et en optimisant la liaison à l'interface. Les traitements thermiques tels que le recuit permettent à l'alliage de présenter une déformation plus uniforme sous tension, en éliminant les contraintes résiduelles et en optimisant la structure des joints de grains.

Dans les applications pratiques, les résultats des essais de ductilité influencent directement l'applicabilité des alliages dans des scénarios exigeants. Par exemple, dans le secteur aérospatial, les contreponds doivent résister aux vibrations causées par le décollage, l'atterrissage ou les turbulences. Une ductilité plus élevée garantit que les composants ne subiront pas de ruptures fragiles sous charges dynamiques. Dans l'industrie électronique, les composants de réduction des vibrations de la plateforme de lithographie doivent résister à de faibles vibrations, et une bonne ductilité garantit la capacité de déformation et la stabilité à long terme des composants. Dans le domaine médical, les collimateurs ou les composants de robots chirurgicaux peuvent être soumis à des étirements lors du traitement ou de l'installation, et la ductilité les rend moins susceptibles de se fissurer. L'optimisation des essais doit se concentrer sur la cohérence des échantillons, en utilisant des tailles d'échantillons et des procédures d'essai normalisées (telles que la norme ASTM E8). L'analyse des fractures permet de vérifier plus précisément les performances de ductilité en observant les caractéristiques de rupture ductile (telles que les alvéoles).

4.2.4 Essai de ténacité

Les essais de ténacité constituent une méthode importante pour évaluer la capacité des alliages tungstène-nickel-cuivre à absorber l'énergie et à résister à la rupture sous impact ou sous charge rapide, reflétant ainsi la résistance à la fissuration et la fiabilité de l'alliage en environnements dynamiques. La ténacité est une propriété clé de l'alliage dans des applications telles que les contreponds aérospatiaux, les noyaux perforants militaires et les collimateurs d'équipements médicaux, garantissant l'intégrité structurelle des composants sous vibrations, impacts ou charges transitoires. La ténacité des alliages tungstène-nickel-cuivre est supérieure à celle du tungstène pur, principalement grâce à l'effet plastique de la phase de liaison nickel-cuivre. La structure cubique à faces centrées du nickel offre une bonne capacité d'absorption d'énergie et peut disperser l'énergie par déformation plastique lors de l'impact, tandis que la grande ductilité du cuivre améliore encore la résistance à la fissuration de la phase de liaison, conférant à l'alliage des caractéristiques de rupture ductile sous impact.

Les tests de ténacité sont généralement réalisés par impact. Les méthodes courantes incluent l'essai de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

choc Charpy et l'essai au marteau-pilon. L'essai de choc Charpy utilise un échantillon standard (généralement avec une entaille en V) pour tester sur une machine à impact pendulaire et enregistrer l'énergie absorbée par l'échantillon lors de sa rupture. L'essai au marteau-pilon utilise un objet lourd qui tombe librement d'une hauteur spécifique pour impacter l'échantillon et évaluer sa résistance à la rupture. La ténacité de l'alliage tungstène-nickel-cuivre résulte de l'effet synergique des particules de tungstène et de la phase de liaison nickel-cuivre. Les particules de tungstène offrent une dureté et une résistance élevées, et la matrice nickel-cuivre disperse l'énergie d'impact à travers un réseau continu de cols de frittage pour éviter la rupture fragile. L'essai doit être réalisé à une température contrôlée (par exemple, la température ambiante) pour garantir la répétabilité des résultats. L'échantillon doit être traité à une taille standard et sa surface doit être polie pour réduire l'impact des défauts.

La ténacité dépend de la composition, de la microstructure et du procédé de fabrication de l'alliage. Une augmentation de la teneur en nickel améliore significativement la ténacité, car sa plasticité lui permet d'absorber davantage d'énergie lors de l'impact, formant ainsi une fracture ductile. L'ajout de cuivre améliore encore la ténacité, et sa ductilité réduit la dureté de la phase de liaison, rendant l'alliage plus sensible à la déformation plastique plutôt qu'à la fracture fragile lors de l'impact. Le frittage en phase liquide améliore la liaison interfaciale entre les particules de tungstène et la matrice nickel-cuivre en formant une microstructure dense, réduisant ainsi la propagation des fissures sous l'impact. Le pressage isostatique à chaud améliore encore la ténacité en compactant la structure, éliminant les micropores et les défauts aux joints de grains. Les traitements thermiques tels que le recuit permettent à l'alliage d'obtenir une absorption d'énergie plus uniforme lors de l'impact en optimisant la structure des joints de grains et en éliminant les contraintes résiduelles.

Dans les applications pratiques, les résultats des essais de ténacité déterminent directement l'aptitude des alliages aux environnements dynamiques. Dans le domaine aérospatial, les rotors d'hélicoptères ou les contrepoids d'ailerons d'avions doivent résister aux vibrations et aux impacts à haute fréquence. Une ténacité élevée garantit que les composants ne se fractureront pas de manière fragile dans des conditions extrêmes. Dans le domaine militaire, les noyaux de projectiles perforants doivent absorber une énergie considérable lors de l'impact d'un blindage à grande vitesse. Une bonne ténacité garantit l'intégrité du noyau du projectile. Dans le domaine médical, les composants de robots chirurgicaux peuvent être soumis à des impacts accidentels. La ténacité leur permet de résister aux fissures et de conserver leur fonctionnalité. L'optimisation des essais doit se concentrer sur le contrôle des impuretés afin d'éviter que des impuretés telles que l'oxygène ou le carbone ne forment des phases fragiles qui réduisent la ténacité. Un traitement de surface (tel que le polissage ou le revêtement) peut réduire les défauts de surface et améliorer la résistance aux chocs. Le contrôle qualité vérifie la ténacité par l'analyse des fractures (observation des alvéoles au MEB) et des essais répétés.

4.2.5 Test de performance thermique

Les tests de performance thermique visent à évaluer la conductivité et la stabilité thermiques de l'alliage tungstène-nickel-cuivre. Ils permettent de vérifier ses performances dans des environnements à haute température ou soumis à des cycles thermiques. Ils sont particulièrement adaptés aux applications nécessitant une gestion thermique efficace ou une stabilité dimensionnelle, telles que les dissipateurs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

thermiques pour machines de photolithographie dans l'industrie électronique, la protection contre les radiations dans les équipements médicaux ou les composants haute température dans l'aérospatiale. Les propriétés thermiques comprennent principalement la conductivité thermique et la dilatation thermique, qui reflètent respectivement la capacité de l'alliage à dissiper rapidement la chaleur et sa stabilité dimensionnelle face aux variations de température. Ces propriétés découlent de la conductivité thermique élevée du cuivre et de la faible dilatation thermique du tungstène, combinées à l'effet synergique de la phase de liaison nickel-cuivre, qui permet à l'alliage de maintenir ses performances dans des environnements de haute précision et à haute température.

Les tests de conductivité thermique sont généralement réalisés par la méthode du flash laser ou du fluxmètre thermique. La méthode du flash laser évalue la conductivité thermique de l'alliage en appliquant une courte impulsion laser à la surface de l'échantillon et en mesurant le temps de propagation de la chaleur à travers l'échantillon. Cette méthode est adaptée aux tests rapides d'échantillons solides (tels que des plaques ou des blocs) et peut refléter avec précision la capacité de dissipation thermique de l'alliage dans des applications réelles. La méthode du fluxmètre thermique évalue la conductivité thermique en établissant un gradient de température stable de part et d'autre de l'échantillon et en mesurant la densité du flux thermique. Les deux méthodes doivent être réalisées dans un environnement contrôlé (par exemple, à température constante ou sous vide) afin d'éviter toute interférence due à la température extérieure ou au flux d'air. La préparation de l'échantillon nécessite une surface lisse et une épaisseur uniforme pour assurer un transfert thermique constant. Les résultats des tests confirment le rôle du cuivre dans la phase de liaison nickel-cuivre. Sa conductivité thermique élevée permet à l'alliage de disperser rapidement la chaleur, ce qui est adapté aux scénarios de forte charge thermique, tels que les machines de lithographie ou les dispositifs médicaux. Les procédés de frittage en phase liquide et de pressage isostatique à chaud améliorent encore la conductivité thermique en formant une microstructure dense, réduisant ainsi la résistance des pores et des joints de grains à la conduction thermique.

Les tests du coefficient de dilatation thermique sont généralement effectués à l'aide d'un dilatomètre ou d'une calorimétrie différentielle à balayage (DSC). Un dilatomètre évalue la stabilité dimensionnelle sous l'effet des variations de température en mesurant la variation de longueur d'un échantillon lors d'un chauffage contrôlé. L'échantillon est chauffé lentement jusqu'à une plage de température spécifique et sa déformation est enregistrée afin de vérifier la précision de l'alliage pendant les cycles thermiques. La méthode DSC déduit indirectement les caractéristiques de dilatation thermique en analysant les effets thermiques de l'échantillon pendant le chauffage. Ces tests doivent être réalisés dans un environnement contrôlé avec précision et la surface de l'échantillon doit être polie pour éliminer les effets des défauts. La faible dilatation thermique du tungstène permet à l'alliage de conserver des dimensions stables malgré les fluctuations de température, ce qui le rend idéal pour des applications de haute précision telles que les plateformes de photolithographie. La phase liante nickel-cuivre est uniformément répartie et associée à un col de frittage pour réduire la concentration des contraintes thermiques et améliorer la stabilité thermique. Les procédés de traitement thermique, tels que le recuit, améliorent encore les performances de l'alliage pendant les cycles thermiques en optimisant la structure des joints de grains.

Dans les applications pratiques, les tests de performance thermique garantissent la fiabilité des alliages dans des environnements à haute température ou de haute précision. Par exemple, dans les machines de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

photolithographie, le bloc d'équilibrage doit dissiper rapidement la chaleur et maintenir une stabilité dimensionnelle. Une excellente conductivité thermique et un faible coefficient de dilatation thermique garantissent une précision inférieure au nanomètre de la plateforme. Dans les équipements de tomographie médicale, le blindage fonctionne sous la chaleur générée par le rayonnement, et la performance thermique garantit sa stabilité et sa sécurité à long terme. L'optimisation des tests doit se concentrer sur la régularité de la préparation des échantillons et de l'étalonnage des instruments afin d'éviter les impuretés ou les micropores qui réduisent la conductivité thermique.

4.2.6 Test de performance électrique

Le test de performance électrique vise à évaluer la capacité de l'alliage tungstène-nickel-cuivre à conduire le courant et à assurer sa compatibilité électromagnétique. Il permet de vérifier ses performances dans les environnements sensibles aux ondes électromagnétiques. Il est particulièrement adapté à des applications telles que le blindage des IRM médicales, les composants antivibratoires des machines de lithographie ou les composants des systèmes radar. Les propriétés électriques comprennent principalement la conductivité et les propriétés amagnétiques, qui reflètent la capacité de l'alliage à conduire le courant et à éviter les interférences électromagnétiques. La nature amagnétique de l'alliage tungstène-nickel-cuivre constitue son principal avantage, grâce au paramagnétisme du nickel et du cuivre, ce qui lui confère d'excellentes performances dans les environnements sensibles aux ondes électromagnétiques. Bien que sa conductivité soit inférieure à celle du cuivre pur, elle est suffisante pour répondre aux besoins de la plupart des applications électroniques. Associé à une densité élevée et à un amagnétisme élevé, il convient aux équipements de haute précision.

Les tests de conductivité sont généralement réalisés à l'aide d'une sonde à quatre points ou d'une mesure de résistivité. Cette méthode applique un faible courant à la surface de l'échantillon, mesure la chute de tension et calcule la conductivité. Cette méthode est adaptée aux tests rapides d'échantillons solides (tels que des barres ou des plaques minces) et permet d'évaluer avec précision la conduction du courant des alliages dans les applications électroniques. La mesure de résistivité mesure la résistance de l'échantillon et en déduit la conductivité à partir de ses dimensions géométriques. Le test doit être réalisé dans un environnement à température et humidité constantes afin d'éviter toute influence de la température ou de l'humidité sur la résistance. La surface de l'échantillon doit être polie et nettoyée afin d'éliminer toute interférence de couche d'oxyde ou de saleté. Les résultats du test reflètent le rôle prépondérant du cuivre dans la phase de liaison nickel-cuivre, et sa conductivité élevée assure un chemin de conduction du courant stable pour l'alliage. L'ajout de nickel forme une solution solide Ni-Cu uniforme et maintient une conductivité modérée, tandis que la résistance élevée du tungstène est compensée par l'optimisation de la microstructure. Les procédés de frittage en phase liquide et de pressage isostatique à chaud réduisent l'influence de la résistance des joints de grains et de la porosité en formant une microstructure dense et en améliorant la conductivité.

Les tests non magnétiques sont généralement réalisés par mesure de l'intensité de magnétisation ou par test de perméabilité magnétique, à l'aide d'un magnétomètre ou d'un magnétomètre à échantillon vibrant (VSM) pour évaluer la réponse de l'alliage à un champ magnétique. La nature non magnétique de l'alliage tungstène-nickel-cuivre bénéficie des propriétés paramagnétiques du nickel et du cuivre, évitant ainsi les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

interférences ferromagnétiques. Il convient aux applications électromagnétiques sensibles telles que les équipements d'IRM ou les machines de photolithographie. Le test doit être réalisé dans un environnement protégé contre les interférences magnétiques externes. L'échantillon doit être soumis à un contrôle strict des impuretés afin d'éviter l'introduction d'un faible magnétisme par des éléments magnétiques tels que le fer (provenant des matières premières ou des outils de traitement). Le frittage utilise une atmosphère d'argon de haute pureté pour empêcher les inclusions d'oxyde d'affecter les propriétés non magnétiques. Un traitement de surface (tel qu'un revêtement conducteur PVD) peut renforcer la protection de l'alliage et maintenir la stabilité des propriétés électriques.

Dans les applications pratiques, les tests de performance électrique garantissent la fiabilité des alliages dans les environnements sensibles aux champs électromagnétiques. Par exemple, dans les équipements d'IRM, les pièces de blindage doivent être amagnétiques pour éviter toute interférence avec le champ magnétique, et une conductivité modérée assure un fonctionnement stable dans les environnements électromagnétiques. Dans les machines de lithographie, la conductivité et l'amagnétisme du bloc d'équilibrage assurent le fonctionnement normal de la plateforme dans les systèmes électromagnétiques de haute précision. L'optimisation des tests doit se concentrer sur la gestion des impuretés afin d'éviter que des impuretés telles que l'oxygène ou le soufre ne forment des phases non conductrices réduisant la conductivité. Le contrôle qualité vérifie la fiabilité des résultats par des tests et des étalonnages répétés avec des échantillons standard.

4.2.7 Test de performance chimique

Les tests de performance chimique constituent une méthode importante pour évaluer la stabilité des alliages tungstène-nickel-cuivre en milieu corrosif ou oxydant. Ils permettent de vérifier leur résistance à la corrosion et à l'oxydation, et de garantir leur fiabilité à long terme dans des conditions difficiles telles que l'humidité, l'acidité ou les températures élevées. Ces tests sont particulièrement importants pour des applications telles que le blindage des équipements médicaux, les contrepoids pour l'ingénierie marine et les dissipateurs thermiques pour l'industrie électronique, qui garantissent le maintien des performances des composants dans des environnements complexes. L'excellente performance chimique est due à l'inertie chimique du tungstène et à l'effet protecteur de la phase de liaison nickel-cuivre. Le nickel forme une couche protectrice d'oxyde dense qui empêche la pénétration des milieux corrosifs, tandis que la grande stabilité du tungstène renforce la résistance de l'alliage à l'érosion chimique. Les tests de performance chimique couvrent la résistance à la corrosion et à l'oxydation et doivent être réalisés dans un environnement contrôlé pour simuler les conditions d'application réelles.

Les tests de résistance à la corrosion sont généralement réalisés par immersion ou par brouillard salin. L'immersion consiste à placer l'échantillon d'alliage dans un milieu corrosif spécifique (tel qu'un acide dilué, une solution alcaline ou de l'eau salée) et à observer ses modifications de surface, sa perte de masse ou les produits de corrosion à température et durée contrôlées. Cet essai est conçu pour simuler les conditions d'utilisation à long terme de dispositifs médicaux en environnement stérilisé ou de composants marins en eau de mer afin d'évaluer la résistance à la corrosion de l'alliage. L'échantillon doit être poli et nettoyé pour éliminer la couche d'oxyde ou la saleté superficielle et garantir que les résultats du test reflètent la performance du matériau lui-même. La résistance à la corrosion du nickel dans la phase de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

liaison nickel-cuivre confère à l'alliage de bonnes performances en environnements humides ou acides, notamment dans les applications médicales, où la résistance à la corrosion garantit la biocompatibilité et la durabilité des composants. L'essai au brouillard salin simule les environnements marins ou industriels en exposant l'échantillon à un brouillard salin (tel qu'un brouillard salin neutre ou acide) afin d'observer les points de corrosion ou la détérioration de la surface. Les procédés de frittage en phase liquide et de pressage isostatique à chaud réduisent l'exposition des pores et des joints de grains en formant une microstructure dense, réduisant ainsi le chemin de pénétration des milieux corrosifs et améliorant la résistance à la corrosion.

Les tests de résistance à l'oxydation sont généralement réalisés par des essais d'oxydation à haute température ou par analyse thermogravimétrique. Ces essais placent les échantillons dans un environnement d'air ou d'oxygène à haute température afin d'observer la formation de couches d'oxyde en surface, le gain de masse ou les variations de performances, simulant ainsi les conditions de fonctionnement à haute température des composants aérospatiaux ou des dissipateurs thermiques électroniques. La résistance à l'oxydation du nickel forme une couche d'oxyde protectrice à haute température pour prévenir toute érosion supplémentaire par l'oxygène, tandis que la grande stabilité thermique du tungstène garantit l'intégrité structurelle de l'alliage. L'analyse thermogravimétrique évalue la vitesse et l'ampleur des réactions d'oxydation en mesurant avec précision la variation de masse de l'échantillon pendant le chauffage, ce qui est adapté aux tests de laboratoire de haute précision. L'essai doit être réalisé dans un four à température contrôlée avec précision, et la surface de l'échantillon doit être lisse afin de réduire l'impact des défauts initiaux. Le procédé de frittage utilise une atmosphère d'argon de haute pureté pour éviter les inclusions d'oxyde affectant la résistance à l'oxydation. Un traitement de surface (comme une passivation chimique ou un revêtement antioxydant) peut améliorer encore la résistance à l'oxydation et prolonger la durée de vie des composants.

Dans les applications pratiques, les tests de propriétés chimiques garantissent la fiabilité des alliages dans des environnements difficiles. Par exemple, dans le blindage des scanners médicaux, la résistance à la corrosion assure la stabilité à long terme des composants en environnements stérilisés ; dans les contrepoids de turbines aérospatiales, la résistance à l'oxydation assure le maintien des performances dans des environnements gazeux à haute température. L'optimisation des tests doit se concentrer sur la cohérence de la préparation des échantillons et l'authenticité de la simulation environnementale afin d'éviter que des impuretés (comme l'oxygène ou le soufre) ou des défauts de surface n'affectent les résultats. Le contrôle qualité vérifie la fiabilité des résultats par des tests et des étalonnages répétés avec des échantillons standard.

4.3 Système standard d'alliage tungstène-nickel-cuivre

L'alliage tungstène-nickel-cuivre constitue un cadre essentiel pour garantir sa qualité, ses performances et la cohérence de ses applications. Il couvre les exigences de composition, les indicateurs de performance, les méthodes d'essai et les processus de contrôle qualité. Ces normes sont formulées par des organisations internationales, nationales ou sectorielles afin de réglementer les processus de production, d'essai et d'application, garantissant ainsi la conformité et la compétitivité de l'alliage sur le marché mondial. Ce système de normes comprend des normes internationales (telles que ASTM B777 et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 20886), nationales (telles que la série GB/T chinoise) et industrielles (telles que MIL-T-21014D), offrant ainsi une référence de qualité unifiée aux secteurs de l'aérospatiale, de la médecine et de l'électronique. Les normes nationales chinoises jouent un rôle essentiel dans la production et l'application des alliages tungstène-nickel-cuivre, reflétant les caractéristiques de la technologie nationale et la demande du marché.

4.3.1 Norme nationale chinoise pour les alliages tungstène-nickel-cuivre

Les normes nationales chinoises (série GB/T) constituent les principales spécifications pour la production, les essais et l'application des alliages tungstène-nickel-cuivre. Élaborées par l'Administration nationale de normalisation, elles sont largement utilisées dans les secteurs aérospatial, médical, électronique et militaire. Ces normes précisent la composition, les exigences de performance, les méthodes d'essai et les processus de contrôle qualité des alliages afin de garantir que les produits répondent aux exigences d'applications hautement fiables telles que les contrepoids d'avions, les collimateurs médicaux ou les blocs d'équilibrage de machines de photolithographie. En tant que principal pays producteur mondial de tungstène (avec des réserves d'environ 3,5 millions de tonnes) et centre de production d'alliages de tungstène, la Chine a élaboré plusieurs normes pour les alliages de tungstène haute densité. Représentant des alliages non magnétiques haute densité, les alliages tungstène-nickel-cuivre bénéficient d'une attention particulière.

L'une des normes nationales chinoises les plus pertinentes est la norme GB/T 26036-2010 « Alliages de tungstène lourds ». Elle s'applique aux alliages à base de tungstène haute densité, notamment les alliages tungstène-nickel-cuivre. Elle spécifie la plage de composition (par exemple, 85 % à 97 % de tungstène, de nickel et de cuivre comme phases liantes), les exigences de densité, les propriétés mécaniques et les méthodes d'essai. La norme exige que l'alliage présente une densité élevée pour répondre aux besoins de contrepoids et de blindage, tout en mettant l'accent sur les propriétés amagnétiques, adaptées aux environnements sensibles aux champs électromagnétiques tels que les appareils d'IRM. L'analyse de la composition nécessite l'utilisation de techniques de spectroscopie (telles que la fluorescence X ou l'ICP-AES) pour vérifier le ratio tungstène-nickel-cuivre. La teneur en impuretés (telles que l'oxygène et le carbone) doit être strictement contrôlée pour éviter toute dégradation des performances. Les essais de propriétés mécaniques comprennent la résistance à la traction et la ductilité, et des essais de traction sont nécessaires pour vérifier la fiabilité de l'alliage sous forte contrainte. Les tests de propriétés chimiques nécessitent l'évaluation de la résistance à la corrosion et à l'oxydation pour garantir la stabilité de l'alliage dans des environnements humides ou à haute température.

Français De plus, la norme GB/T 228.1-2010 Essai de traction des matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai à température ambiante fournit des spécifications pour les essais de propriétés mécaniques des alliages tungstène-nickel-cuivre, guidant la mesure de la résistance à la traction et de la limite d'élasticité afin de garantir que les résultats répondent aux exigences aérospatiales ou militaires. La norme GB/T 231.1-2018 Essai de dureté Brinell des matériaux métalliques Partie 1 : Méthode d'essai spécifie le processus d'essai de dureté pour évaluer la dureté de surface et les propriétés de traitement des alliages. La norme GB/T 1423-2012 Méthode de détermination de la densité des métaux précieux et de leurs alliages fournit une méthode normalisée pour les essais de densité afin de garantir que les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

caractéristiques de haute densité de l'alliage répondent aux exigences de conception. Ensemble, ces normes forment un cadre d'essai complet pour les alliages tungstène-nickel-cuivre.

L'application des normes nationales chinoises a favorisé l'amélioration de la qualité et la compétitivité des alliages tungstène-nickel-cuivre nationaux. Par exemple, dans le domaine médical, ces normes garantissent que les propriétés magnétiques et anticorrosion des pièces de blindage répondent aux exigences de biocompatibilité ISO ; dans l'industrie électronique, elles guident les tests de densité et de conductivité thermique des blocs d'équilibrage des machines de photolithographie afin de garantir des performances de haute précision. La mise en œuvre de ces normes doit s'accompagner d'une optimisation des processus de production, notamment par le frittage en phase liquide et le pressage isostatique à chaud pour améliorer la densité, et d'un contrôle strict des matières premières et de l'atmosphère afin de réduire les impuretés. Le contrôle qualité est assuré par des tests multipoints normalisés et des certifications par des organismes tiers (tels que les laboratoires CNAS).

4.3.2 Normes internationales pour les alliages tungstène-nickel-cuivre

Les normes internationales sont des spécifications mondiales pour le contrôle qualité et l'application commerciale des alliages tungstène-nickel-cuivre. Élaborées par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et d'autres organismes faisant autorité, elles sont largement utilisées dans les secteurs de l'aérospatiale, de la médecine et de l'électronique. Ces normes fournissent des orientations unifiées pour la composition, les performances, les méthodes d'essai et la certification qualité des alliages, garantissant ainsi la cohérence et la fiabilité des produits dans différents pays et secteurs. En tant que matériau magnétique à haute densité, les normes internationales relatives aux alliages tungstène-nickel-cuivre se concentrent principalement sur la composition, la densité, les propriétés mécaniques et les propriétés magnétiques, et conviennent aux applications de haute précision et sensibles aux champs électromagnétiques.

La norme ISO 20886:2004, Spécification technique pour les alliages de tungstène haute densité, élaborée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO), est l'une des principales normes internationales relatives aux alliages tungstène-nickel-cuivre, applicable aux alliages haute densité à base de tungstène (notamment W-Ni-Cu et W-Ni-Fe). Elle spécifie la composition de l'alliage (teneur en tungstène de 85 à 97 %, nickel et cuivre comme phases de liaison) et exige la vérification de sa densité, de ses propriétés mécaniques (résistance à la traction et ductilité, par exemple) et de ses propriétés magnétiques. Elle met l'accent sur la détection du rapport des éléments principaux par analyse spectrale (par exemple, XRF ou ICP-AES), l'évaluation des propriétés mécaniques par des essais de traction et d'impact, et la confirmation des propriétés magnétiques par des essais de force de magnétisation, répondant ainsi aux besoins du blindage IRM médical ou des masselottes d'équilibrage de l'industrie électronique. La norme ISO 20886 exige également que le processus de production (tel que le frittage en phase liquide ou le pressage isostatique à chaud) garantisse la compacité de la microstructure et réduise l'impact des pores et des impuretés sur les performances.

Une autre norme internationale pertinente est la série ISO 10993 « Évaluation biologique des dispositifs médicaux », applicable à l'application des alliages tungstène-nickel-cuivre dans le domaine médical (tels

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que les écrans de protection ou les collimateurs pour scanners). Cette norme exige la vérification de la biocompatibilité de l'alliage, notamment le contrôle de la teneur en nickel afin d'éviter les réactions allergiques. Les tests de résistance à la corrosion et à l'oxydation doivent répondre aux exigences de la norme afin de garantir la stabilité à long terme de l'alliage en environnement stérile ou humide. La norme internationale fait également référence à la norme ISO 6892-1 « Essais de traction des matériaux métalliques » afin de réglementer les essais de propriétés mécaniques, de guider la mesure de la résistance à la traction et de la limite d'élasticité, et de garantir la fiabilité de l'alliage dans des environnements à fortes contraintes. Ensemble, ces normes fournissent un support technique pour l'application mondiale des alliages tungstène-nickel-cuivre.

La mise en œuvre de normes internationales a favorisé la diffusion des alliages tungstène-nickel-cuivre sur le marché mondial. Par exemple, dans le secteur aérospatial, ces normes garantissent que la haute densité et les propriétés magnétiques des contreponds répondent aux exigences de conception ; dans le secteur médical, elles garantissent la biocompatibilité et la durabilité des pièces de blindage. Leur mise en œuvre nécessite l'utilisation combinée d'équipements de test de haute précision (tels que le MEB ou le VSM) et de processus de contrôle qualité rigoureux (tels que la certification par un tiers) pour garantir la conformité aux exigences normatives.

4.3.3 Normes relatives aux alliages tungstène-nickel-cuivre en Europe, en Amérique, au Japon, en Corée du Sud et dans d'autres pays du monde

S'appuyant sur les normes internationales, les normes relatives aux alliages tungstène-nickel-cuivre en Europe, aux États-Unis, au Japon, en Corée du Sud et dans d'autres pays ont formulé des spécifications plus spécifiques et détaillées, tenant compte des technologies locales et de la demande du marché. Ces normes présentent des différences en termes de contrôle de la composition, d'exigences de performance et de méthodes d'essai, reflétant les domaines d'application de chaque pays dans les secteurs de l'aérospatiale, de la médecine et de l'électronique. Les normes pertinentes des États-Unis, de l'Europe, du Japon et de la Corée du Sud sont présentées ci-dessous, en soulignant leurs caractéristiques et leurs applications.

Norme américaine : Les États-Unis adoptent la norme ASTM B777-15 relative aux alliages de tungstène haute densité comme norme principale pour les alliages tungstène-nickel-cuivre, applicable aux alliages W-Ni-Cu et W-Ni-Fe. Cette norme divise les alliages de tungstène en quatre catégories (classes 1 à 4), définit les exigences de performance en fonction de la teneur en tungstène (90 % à 97 %) et du rapport de phase liante, et couvre la densité, les propriétés mécaniques (telles que la résistance à la traction et la dureté) et les essais magnétiques. La norme ASTM B777 exige que la résistance soit vérifiée par des essais de traction (référence ASTM E8) et que les propriétés magnétiques soient confirmées par des essais de force de magnétisation, ce qui est adapté aux pièces de blindage pour IRM médicales et aux masselottes d'équilibrage de l'industrie électronique. La norme exige également que les procédés de production (tels que la métallurgie des poudres) garantissent la densité de la microstructure et la réduction de la porosité. La norme militaire américaine MIL-T-21014D relative aux alliages haute densité à base de tungstène affine les exigences des applications militaires, spécifie les indicateurs de performance des noyaux perforants ou des contreponds aérospatiaux, et met l'accent sur la résistance aux chocs et la stabilité à haute température. Ces normes sont largement utilisées dans les secteurs de l'aérospatiale et de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la défense américains pour garantir que les alliages répondent à des exigences de fiabilité élevées.

Normes européennes : L'Europe se réfère principalement à la norme EN 1982 « Lingots et pièces moulées en cuivre et alliages de cuivre » et à d'autres normes relatives aux alliages haute densité. Bien qu'elles concernent principalement les alliages à base de cuivre, certaines spécifications s'appliquent à la coulée et à la transformation des alliages tungstène-nickel-cuivre. Les normes EN mettent l'accent sur le contrôle de la composition (comme le rapport nickel/ cuivre) et les essais de résistance à la corrosion, adaptés aux applications en ingénierie navale et aux équipements médicaux. L'Europe utilise également la norme EN ISO 6892-1 « Essai de traction des matériaux métalliques » pour normaliser les essais de propriétés mécaniques, exigeant la vérification des performances des alliages dans des environnements soumis à de fortes contraintes. Les normes européennes se concentrent sur la protection de l'environnement et la biocompatibilité, notamment dans les applications médicales, exigeant le respect de la norme d'évaluation biologique EN ISO 10993 pour contrôler la teneur en nickel et éviter les risques allergiques. Les alliages tungstène-nickel-cuivre européens sont principalement utilisés pour les contrepoids de navires et les pièces de blindage médical, mettant l'accent sur la résistance à la corrosion par l'eau de mer et les propriétés amagnétiques.

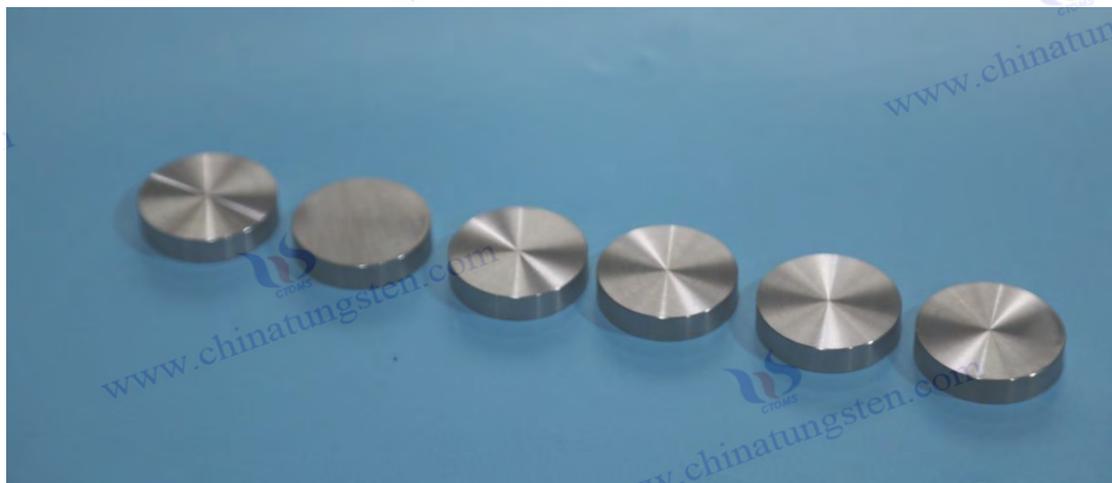
Norme japonaise : Le Japon adopte la norme JIS H7202 Alliage de tungstène haute densité comme norme principale pour les alliages tungstène-nickel-cuivre, adaptés aux secteurs de l'aérospatiale, de l'électronique et de la médecine. Cette norme spécifie la teneur en tungstène (90 à 95 %) et la composition de la phase de liaison. Elle exige la vérification de la composition par analyse spectrale et l'évaluation des propriétés mécaniques par des essais de traction et de choc. La norme japonaise accorde une importance particulière aux essais de conductivité amagnétique et thermique, adaptés aux applications de haute précision des balances de lithographie et des pièces de blindage pour IRM. La norme JIS Z2241 Méthode d'essai de traction pour les matériaux métalliques fournit des recommandations pour les essais de propriétés mécaniques afin de garantir la cohérence des résultats. En termes de technologie de production, le Japon privilégie les matières premières de haute pureté et le frittage sous vide afin de réduire l'impact des impuretés (telles que l'oxygène ou le fer) sur les propriétés amagnétiques et la résistance à la corrosion. L'application des normes japonaises dans l'industrie électronique est particulièrement importante, favorisant la popularisation des alliages dans les équipements semi-conducteurs.

Norme coréenne : La Corée adopte la norme KS D 5201 « Tungstène et alliages de tungstène » pour réglementer la production et les essais des alliages tungstène-nickel-cuivre, adaptés aux secteurs aérospatial, électronique et militaire. Cette norme exige la vérification de la densité, des propriétés mécaniques et des propriétés amagnétiques de l'alliage, et garantit que sa composition et ses performances répondent aux exigences grâce à des analyses spectrales et des essais de force de magnétisation. Les normes coréennes se concentrent sur les essais de performance thermique (tels que la conductivité thermique et le coefficient de dilatation thermique) afin de répondre aux besoins des dissipateurs thermiques et des blocs d'équilibrage de l'industrie électronique. La production d'alliages tungstène-nickel-cuivre en Corée utilise principalement des procédés de frittage en phase liquide et de pressage isostatique à chaud pour garantir la densité de la microstructure. La norme se réfère également à la norme KS D ISO 6892 « Essai de traction des matériaux métalliques » pour les essais de propriétés

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mécaniques, soulignant la fiabilité de l'alliage dans des environnements soumis à de fortes contraintes. Le développement rapide de la Corée dans les domaines de l'électronique et des semi-conducteurs a favorisé la mise en œuvre de ces normes pour garantir que les alliages répondent aux exigences des équipements de haute précision.

Les différences entre les normes nationales se reflètent principalement dans les domaines d'application et les détails des tests. La norme américaine se concentre sur les exigences de résistance élevée des secteurs militaire et aérospatial, l'Europe sur la résistance à la corrosion dans les applications marines et médicales, le Japon sur l'amagnétisme et la haute précision dans l'industrie électronique, et la Corée du Sud sur les applications électroniques et de gestion thermique. La mise en œuvre de ces normes nécessite l'utilisation d'équipements de test de haute précision et un contrôle strict des impuretés (par exemple, une teneur en oxygène inférieure à 0,05 %) afin de garantir la constance des performances des alliages. La certification qualité est généralement vérifiée par un organisme tiers afin de promouvoir le commerce international.



CTIA GROUP LTD Alliage de tungstène nickel cuivre
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 5 Technologie de préparation de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau haute densité, amagnétique et hautes performances. Il est largement utilisé dans les domaines aérospatial, médical, électronique et militaire grâce à ses excellentes propriétés mécaniques, sa conductivité thermique et sa stabilité chimique. Son procédé de préparation repose principalement sur la métallurgie des poudres. Une microstructure très dense et uniforme est obtenue grâce à des étapes telles que le prétraitement de la matière première, le mélange de la poudre, le pressage, le frittage en phase liquide et le post-traitement. Le prétraitement de la matière première constitue le point de départ du procédé de préparation. Il affecte directement la fluidité, l'uniformité du mélange et les propriétés de frittage de la poudre, déterminant ainsi la qualité et les performances de l'alliage. La sphéroïdisation et le contrôle granulométrique de la poudre de tungstène, ainsi que le traitement de surface de la poudre de nickel-cuivre, sont deux étapes clés du prétraitement de la matière première pour garantir une grande pureté, une granulométrie et une activité de surface appropriées.

5.1 Prétraitement des matières premières

La préparation de l'alliage tungstène-nickel-cuivre utilise des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre de haute pureté comme matières premières, formant ainsi une structure d'alliage dense grâce à la métallurgie des poudres. Le prétraitement des matières premières vise à optimiser les propriétés physiques et chimiques de la poudre, notamment la granulométrie, la morphologie, la pureté et l'état de surface, afin d'améliorer sa fluidité, son homogénéité de mélange et son activité de frittage. En tant que composant principal, la poudre de tungstène doit présenter une grande pureté et une granulométrie adaptée pour garantir la densité et les propriétés mécaniques élevées de l'alliage. Les poudres de nickel et de cuivre, en tant que phases liantes, doivent présenter une bonne activité de surface et une bonne mouillabilité pour favoriser la combinaison avec les particules de tungstène lors du frittage en phase liquide. Le prétraitement des matières premières comprend des étapes telles que la préparation de la poudre, le criblage, le nettoyage et la modification de surface, qui doivent être réalisées dans un environnement propre afin d'éviter toute contamination par des impuretés (telles que l'oxygène et le carbone). Ce qui suit discutera en détail du processus et de l'application de la sphéroïdisation de la poudre de tungstène et du contrôle de la taille des particules et du traitement de surface de la poudre de nickel-cuivre.

5.1.1 Sphéroïdisation de la poudre de tungstène et contrôle de la taille des particules

La sphéroïdisation et le contrôle granulométrique de la poudre de tungstène sont au cœur du prétraitement des matières premières. Ils visent à optimiser la morphologie et la granulométrie de la poudre, à améliorer sa fluidité, sa masse volumique apparente et ses performances de frittage, et à influencer directement la densité et l'uniformité microstructurale de l'alliage tungstène-nickel-cuivre. La poudre de tungstène est généralement préparée par réduction à l'hydrogène ou par plasma. Sa morphologie initiale est généralement polygonale ou angulaire irrégulière, avec une large gamme de granulométries. Le traitement de sphéroïdisation donne aux particules de tungstène une forme sphérique, réduit les arêtes et les angles, améliore la fluidité (temps d'écoulement réduit) et la masse volumique apparente, et facilite

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

le mélange et le pressage de la poudre. Le contrôle granulométrique garantit une granulométrie appropriée, favorise le réarrangement et la densification des particules lors du frittage et évite la formation de pores ou de ségrégation affectant les propriétés de l'alliage. Le traitement de sphéroïdisation utilise souvent la technologie de sphéroïdisation plasma ou l'atomisation à haute température. La sphéroïdisation plasma consiste à introduire de la poudre de tungstène dans une flamme plasma haute température. Sous l'effet de la tension superficielle, les particules fondent instantanément et forment des gouttelettes sphériques. Ces gouttelettes sont ensuite rapidement refroidies et solidifiées. Cette méthode permet d'améliorer considérablement la sphéricité de la poudre de tungstène, de réduire les défauts de surface et d'améliorer sa fluidité, la rendant ainsi adaptée aux applications de haute précision telles que les blocs d'équilibrage des machines de photolithographie. L'atomisation à haute température fait fondre le tungstène et le pulvérise en fines gouttelettes, qui sont ensuite refroidies sous gaz inerte (tel que l'argon) pour former des particules sphériques, adaptées à la production à grande échelle. La poudre de tungstène sphéroïdisée présente une masse volumique apparente plus élevée, ce qui favorise l'uniformité de l'ébauche pressée et réduit le risque de retrait irrégulier au frittage.

Le contrôle granulométrique est généralement réalisé par criblage, classification par flux d'air ou dispersion ultrasonique. La méthode de criblage utilise un tamis standard pour séparer les poudres de tungstène de différentes granulométries. Simple et efficace, elle présente toutefois une faible précision. La classification par flux d'air sépare les particules par le flux d'air et contrôle précisément la distribution granulométrique, ce qui est adapté aux applications exigeantes. La dispersion ultrasonique utilise des ondes ultrasoniques pour fragmenter les particules agglomérées et optimiser l'uniformité granulométrique. Une plage granulométrique appropriée permet d'équilibrer l'activité de frittage et la stabilité structurale. Les particules plus fines améliorent l'effet de dissolution-reprécipitation pendant le frittage et favorisent la densification ; les particules plus grossières assurent une structure squelettique stable, adaptée aux exigences de résistance élevées des noyaux de projectiles perforants militaires. Le contrôle granulométrique doit être associé à la gestion de la pureté des matières premières afin d'éviter que les impuretés d'oxygène ou de carbone n'affectent les performances de la poudre.

En production, la sphéroïdisation de la poudre de tungstène et le contrôle granulométrique garantissent la haute densité et les propriétés mécaniques de l'alliage. Par exemple, dans les contrepois aéronautiques, la sphéroïdisation de la poudre de tungstène améliore la densité de l'ébauche et assure la stabilité du centre de gravité ; dans les pièces de blindage médical, la répartition granulométrique uniforme réduit la porosité et améliore l'efficacité d'absorption des radiations. L'optimisation des procédés doit se concentrer sur la haute précision des équipements (comme le contrôle de la température du plasma) et la propreté de l'environnement (fonctionnement en salle blanche) afin d'éviter la contamination par la poussière. Le contrôle qualité vérifie la granulométrie et la morphologie des particules grâce à un granulomètre laser et à l'observation au microscope électronique à balayage (MEB).

5.1.2 Traitement de surface de la poudre de nickel-cuivre

Le traitement de surface de la poudre de nickel-cuivre est une autre étape clé du prétraitement des matières premières. Il vise à optimiser l'état chimique de surface, la propreté et l'activité des poudres de nickel et de cuivre, ainsi qu'à améliorer leur mouillabilité et leur capacité de liaison avec les particules

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de tungstène lors du frittage en phase liquide. Le nickel et le cuivre, en tant que phases de liaison, forment une phase liquide lors du frittage, combinent les espaces entre les particules de tungstène et améliorent la ténacité, l'amagnétisme et la conductivité thermique de l'alliage. La poudre de nickel-cuivre non traitée peut présenter une couche d'oxyde (comme NiO ou CuO), des polluants organiques ou des gaz adsorbés en surface, ce qui réduit sa mouillabilité et son activité de frittage, entraînant une mauvaise liaison interfaciale ou une porosité accrue. Le traitement de surface améliore les propriétés de la poudre par nettoyage, modification chimique ou revêtement afin de garantir la compacité et l'uniformité de l'alliage. Le nettoyage de surface utilise généralement un nettoyage chimique ou un nettoyage par ultrasons. Le nettoyage chimique utilise un acide dilué (tel que l'acide chlorhydrique ou l'acide nitrique) ou une solution alcaline pour éliminer la couche d'oxyde et les impuretés à la surface de la poudre de nickel-cuivre. Il est suivi d'un rinçage à l'eau déionisée et d'un séchage sous vide ou sous gaz inerte (tel que l'argon) pour éviter une oxydation secondaire. Le nettoyage par ultrasons utilise des ondes ultrasonores à haute fréquence pour produire de minuscules bulles dans le liquide de nettoyage (tel que l'éthanol) afin de faire éclater et d'éliminer les polluants de surface, ce qui est adapté aux applications de haute précision. Le processus de nettoyage nécessite un contrôle de la concentration de la solution et de la durée afin d'éviter une corrosion excessive et d'endommager la morphologie de la poudre. La propreté de la surface de la poudre de nickel-cuivre après nettoyage est améliorée, ainsi que sa mouillabilité par la phase liquide, ce qui favorise la formation de collets de frittage.

La modification chimique améliore encore les performances de frittage de la poudre de nickel-cuivre en introduisant un agent actif ou un agent réducteur à sa surface. Par exemple, une trace d'agent réducteur (comme l'hydrogène ou l'acide formique) est utilisée pour traiter la surface de la poudre afin de réduire les oxydes et de former une surface métallique active, ce qui améliore la liaison chimique avec les particules de tungstène. La technologie de revêtement de surface (comme le dépôt chimique en phase vapeur, CVD) permet de déposer une fine couche de carbone ou de métal (comme le Ni ou le Cu) à la surface de la poudre de nickel ou de cuivre afin d'améliorer la résistance à l'oxydation et la mouillabilité, ce qui est adapté au frittage à haute température. La poudre modifiée forme une distribution de phase liquide plus uniforme lors du frittage en phase liquide, réduit la ségrégation et favorise le réarrangement et la liaison des particules de tungstène. En production, le traitement de surface de la poudre de nickel-cuivre optimise la microstructure et les propriétés de l'alliage. Par exemple, dans les dissipateurs thermiques destinés à l'industrie électronique, la poudre de nickel-cuivre traitée en surface améliore la conductivité thermique et la résistance de la liaison interfaciale ; Dans les collimateurs médicaux, une mouillabilité accrue réduit la porosité et améliore l'efficacité de la protection contre les radiations. L'optimisation du procédé doit se concentrer sur le respect de l'environnement de la solution de nettoyage et la propreté de l'environnement de traitement afin d'éviter toute contamination secondaire. Le contrôle qualité vérifie l'état chimique de surface par analyse XPS ou EDS, combinée au MEB pour observer la morphologie de la poudre.

5.2 Procédé de métallurgie des poudres

La métallurgie des poudres est la principale méthode de préparation des alliages tungstène-nickel-cuivre. Elle forme une structure d'alliage haute densité par mélange de poudres de tungstène, de nickel et de cuivre, puis pressage et frittage. Ce procédé permet de contrôler avec précision la proportion des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

composants, d'optimiser la microstructure et de répondre aux exigences de performance élevées des contreponds aérospatiaux, des pièces de blindage médical et des blocs d'équilibrage de l'industrie électronique. Le procédé de métallurgie des poudres comprend des étapes telles que le mélange des poudres, le pressage, le frittage en phase liquide et le post-traitement (comme le pressage isostatique à chaud ou le traitement thermique). Le mélange des poudres et le pressage sont essentiels à l'obtention d'une billette uniforme, ce qui influence directement le réarrangement des particules, la distribution de la phase liquide et la densité pendant le frittage. Ce procédé doit être réalisé dans un environnement propre, avec des matières premières de haute pureté et des équipements de précision afin de garantir la constance et la fiabilité des performances de l'alliage.

5.2.1 Paramètres du processus de mélange de poudre

Le processus de mélange des poudres est l'étape initiale de la métallurgie des poudres. Il vise à mélanger uniformément les poudres de tungstène, de nickel et de cuivre selon les proportions prévues afin d'obtenir un mélange homogène, préparant ainsi le terrain pour le pressage et le frittage ultérieurs. Un mélange homogène des poudres garantit l'homogénéité de la microstructure de l'alliage, évite la ségrégation des composants ou une porosité excessive, et améliore ainsi la densité, les propriétés mécaniques et les propriétés amagnétiques. La poudre de tungstène, composant principal, confère une densité et une dureté élevées ; les poudres de nickel et de cuivre, en tant que phases liantes, améliorent la ténacité et la conductivité thermique. La réussite du processus de mélange des poudres dépend de l'optimisation de la granulométrie, de la morphologie, de l'équipement de mélange et des conditions de traitement afin de garantir un contact parfait et une répartition homogène des particules.

Le mélange de poudres est généralement réalisé par mélange mécanique ou par broyage à boulets. Ce procédé utilise un mélangeur en V ou un mélangeur tridimensionnel pour mélanger les particules de poudre dans le récipient par rotation ou vibration, ce qui est adapté à la production à grande échelle. Le mélangeur doit être doté d'un contrôle de vitesse très précis afin d'éviter un mélange excessif susceptible d'endommager la morphologie des particules ou de provoquer une légère agglomération. Le broyage à boulets utilise des éléments de broyage (tels que des billes de zircone) et utilise les collisions et les frottements pour obtenir une dispersion uniforme de la poudre, ce qui est adapté à la production de petites quantités de haute précision. Le rapport billes/matière et le temps de broyage doivent être contrôlés pendant le processus de broyage afin d'éviter un broyage excessif susceptible de provoquer la rupture des particules ou l'introduction d'impuretés (telles que l'oxygène ou le fer). Le mélange doit être effectué sous gaz inerte de haute pureté (tel que l'argon) ou sous vide afin d'éviter l'oxydation de la poudre et de maintenir l'activité de surface de la poudre de nickel-cuivre.

Le processus de mélange des poudres vise à optimiser l'homogénéité granulométrique et l'uniformité du mélange. La poudre de tungstène présente généralement des particules plus grosses, tandis que celles de nickel et de cuivre sont plus fines. Une granulométrie judicieusement adaptée peut augmenter la densité du mélange et favoriser la densification lors du pressage et du frittage. La morphologie de la poudre est également cruciale. La poudre de tungstène sphéroïdisée présente une fluidité élevée, propice à un mélange uniforme ; le traitement de surface des poudres de nickel et de cuivre (comme le nettoyage chimique) élimine la couche d'oxyde, améliore le contact entre les particules et la mouillabilité du frittage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en phase liquide. L'optimisation des conditions du procédé comprend le temps de mélange, la vitesse de rotation et le contrôle environnemental. Un temps de mélange approprié garantit l'uniformité, tandis qu'un temps de mélange trop long peut entraîner l'agglomération des particules ou endommager la surface. L'ajout d'une petite quantité de lubrifiant peut améliorer la fluidité de la poudre, mais il doit être éliminé avant le frittage pour éviter les résidus de carbone.

En production réelle, l'uniformité du processus de mélange des poudres affecte directement les performances de l'alliage. Par exemple, dans les pièces de blindage médical, une répartition uniforme des composants garantit l'efficacité de l'absorption des radiations et l'absence de magnétisme ; dans les contrepoids aérospatiaux, un mélange uniforme des poudres améliore la consistance de la densité et assure la stabilité du centre de gravité. Le contrôle qualité vérifie le ratio des composants par analyse d'échantillons (XRF ou ICP-AES) et observe l'uniformité du mélange et la morphologie des particules grâce à un granulomètre laser et un MEB. L'optimisation du processus doit se concentrer sur la propreté des équipements et la pureté de la poudre (> 99,9 %) afin d'éviter toute contamination par des impuretés.

5.2.2 Technologie de pressage

La technologie de pressage est une étape clé du procédé de métallurgie des poudres. Elle permet de presser des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre mélangées uniformément pour obtenir une ébauche présentant une forme et une résistance spécifiques, servant de base au frittage ultérieur. La qualité du pressage influence directement la densité, la précision de forme et les performances de frittage de l'ébauche, qui déterminent à leur tour les propriétés finales de l'alliage, telles que sa densité élevée, sa résistance et sa ténacité. Le pressage exige de garantir une densité de particules de poudre serrée et une porosité réduite (la porosité initiale est d'environ 20 à 30 %), tout en préservant l'intégrité structurelle de l'ébauche. Elle est adaptée aux contrepoids de forme complexe pour l'aéronautique, aux collimateurs médicaux ou aux dissipateurs thermiques pour l'industrie électronique. La technologie de pressage doit optimiser les paramètres du procédé en fonction des propriétés de la poudre et des applications cibles afin de garantir que l'ébauche réponde aux exigences de frittage.

Le moulage par pressage utilise généralement la technologie du pressage à froid ou du pressage isostatique. Le pressage à froid utilise une presse hydraulique ou mécanique pour charger la poudre dans un moule et la comprimer sous haute pression pour obtenir une ébauche de forme spécifique. Ce procédé est adapté à la production de pièces de formes simples (comme des barres ou des plaques). La conception du moule doit tenir compte de la fluidité et du taux de compression de la poudre afin d'assurer une densité uniforme à l'intérieur de l'ébauche et d'éviter les fissures ou le délaminage. Le pressage isostatique (pressage isostatique à froid, CIP) forme une ébauche haute densité en chargeant la poudre dans un moule flexible (comme un sac en caoutchouc) et en appliquant une pression uniforme dans toutes les directions dans un milieu liquide. Il est adapté aux formes complexes ou aux pièces de haute précision. Le pressage isostatique permet de réduire considérablement la concentration de contraintes et la porosité à l'intérieur de l'ébauche et convient à la fabrication de pièces de blindage médical ou de blocs d'équilibrage pour machines de photolithographie.

La réussite du moulage sous pression dépend de l'optimisation des propriétés de la poudre et des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conditions de procédé. La poudre de tungstène sphéroïdisée et la poudre de nickel-cuivre traitée en surface présentent une fluidité élevée, ce qui permet de former une structure d'empilement plus compacte pendant le pressage et d'augmenter la densité initiale de l'ébauche. La granulométrie de la poudre doit être bien adaptée, et les particules fines doivent combler les espaces entre les grosses particules afin de réduire la porosité. L'ajout d'une petite quantité de liant (tel que l'alcool polyvinylique) peut améliorer la résistance à l'état vert de l'ébauche, mais il doit être éliminé par dégraissage avant le frittage. La pression de pressage doit être ajustée en fonction du type de poudre et de la densité cible. Une pression trop élevée peut entraîner l'usure du moule ou la fissuration de l'ébauche, tandis qu'une pression trop faible entraînera une densité insuffisante. Le contrôle environnemental (comme le fonctionnement en salle blanche) évite la contamination par la poussière ou les impuretés et préserve la pureté de l'ébauche. Le dégraissage est effectué après le pressage, et le liant et le lubrifiant sont éliminés par chauffage à basse température afin d'éviter que les résidus de carbone n'affectent la qualité du frittage.

En production réelle, la technologie de pressage influence directement les performances et l'application de l'alliage. Par exemple, dans le cœur des projectiles perforants militaires, la billette haute densité assure la densité et la résistance élevées de l'alliage après frittage ; dans les dissipateurs thermiques de l'industrie électronique, la structure uniforme de la billette améliore la conductivité thermique et la précision dimensionnelle. Le contrôle qualité vérifie l'uniformité et la porosité de la billette par mesure de la densité (méthode d'Archimède) et observation microscopique. L'optimisation du procédé doit se concentrer sur la résistance à l'usure du moule et le contrôle précis de la pression, à l'aide d'équipements hydrauliques de haute précision ou d'un système de pressage isostatique automatisé.

5.2.3 Procédé de frittage en phase liquide

Le frittage en phase liquide est une étape clé dans la préparation de l'alliage tungstène-nickel-cuivre. Il mouille les particules de tungstène en formant une phase liquide avec le nickel et le cuivre à haute température, favorisant ainsi le réarrangement et la densification des particules, et formant une microstructure uniforme et de haute densité. Ce procédé exploite le point de fusion élevé du tungstène (environ 3 422 °C) et le point de fusion bas du nickel et du cuivre (environ 1 300-1 450 °C) pour obtenir une liaison étroite des particules de tungstène sous l'action de la phase liquide et améliorer les propriétés mécaniques (résistance à la traction, ténacité), la conductivité thermique et les propriétés amagnétiques de l'alliage. Le frittage en phase liquide est idéal pour les applications hautes performances telles que les contrepoids aérospatiaux, les pièces de blindage médical et les dissipateurs thermiques de l'industrie électronique, car il permet de produire des alliages proches de la densité théorique et de répondre à des exigences de qualité strictes.

Le frittage en phase liquide est généralement réalisé sous vide ou sous atmosphère de gaz inerte de haute pureté (comme l'argon) afin d'éviter l'oxydation et l'introduction d'impuretés. Il comprend trois étapes : chauffage, isolation et refroidissement. Lors de l'étape de chauffage, les billettes de tungstène, de nickel et de cuivre, uniformément mélangées, sont chauffées au-dessus du point de fusion du nickel et du cuivre. Le nickel et le cuivre fondent pour former une phase liquide qui mouille la surface des particules de tungstène. Grâce à la faible tension superficielle et à la bonne mouillabilité de la phase liquide, le nickel et le cuivre liquides combleront rapidement les espaces entre les particules de tungstène, favorisent le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

réarrangement des particules par capillarité et réduisent significativement la porosité de la billette. L'étape d'isolation est au cœur de la densification. La phase liquide agit sur les particules de tungstène par un mécanisme de dissolution-reprécipitation. Une petite quantité d'atomes de tungstène se dissolvent et reprécipitent aux points de contact des particules pour former un col de frittage, ce qui renforce la force de liaison entre elles. La vitesse de refroidissement doit être contrôlée au cours de l'étape de refroidissement pour éviter les fissures causées par les contraintes thermiques, tout en garantissant que la phase liquide nickel-cuivre se solidifie pour former une structure cubique à faces centrées stable, formant une liaison d'interface solide avec les particules de tungstène.

La réussite du frittage en phase liquide dépend de l'optimisation des conditions du procédé. Le rapport nickel-cuivre (généralement 7:3 ou 3,5:1,5) affecte la quantité et la fluidité de la phase liquide. Une teneur en nickel plus élevée peut améliorer la mouillabilité, mais peut provoquer une ségrégation ; une teneur en cuivre plus élevée abaisse le point de fusion de la phase liquide, ce qui est bénéfique pour le frittage, mais doit éviter une perte de résistance. Un contrôle précis de la température de frittage et du temps de maintien est crucial. Une température trop élevée peut entraîner une croissance excessive des particules de tungstène ou une perte de phase liquide, tandis qu'une température trop basse entraînera une phase liquide insuffisante et une diminution de la densité. Le contrôle de l'atmosphère utilise de l'argon haute pureté ou un environnement sous vide pour empêcher la formation d'oxydes (tels que WO_3 ou NiO_3) qui affectent les propriétés amagnétiques ou la résistance à la corrosion. La densité initiale de la billette (optimisée par pressage) influence également l'effet du frittage. Les billettes haute densité peuvent réduire la porosité et augmenter la densité finale.

En production réelle, le frittage en phase liquide garantit les hautes performances de l'alliage. Par exemple, dans les collimateurs médicaux, la densité élevée et la microstructure uniforme offrent une excellente protection contre les radiations ; dans les contrepoids aérospatiaux, la forte force de liaison du col de frittage assure une résistance élevée aux vibrations et à la corrosion. Le contrôle qualité vérifie l'effet du procédé par mesure de la densité, observation au MEB de la morphologie du col de frittage et analyse DRX de la structure des phases. L'optimisation du procédé nécessite une attention particulière au contrôle précis des courbes de température et de la pureté de l'atmosphère, ainsi que l'utilisation de fours de frittage de haute précision et de systèmes de surveillance en ligne.

5.3 Technologie de préparation avancée

Face à la demande croissante de pièces de formes complexes et de haute précision dans les secteurs de l'aérospatiale, de la médecine et de l'électronique, les procédés traditionnels de métallurgie des poudres se heurtent à des limites dans la fabrication de géométries complexes. Les technologies de préparation avancées, telles que le moulage par injection de métal (MIM), la fabrication additive (FA) et le frittage par plasma d'étincelles (SPS), offrent de nouvelles options pour la préparation des alliages tungstène-nickel-cuivre. Ces technologies répondent aux besoins des applications haute performance en augmentant la liberté de forme, en raccourcissant les cycles de production et en optimisant les microstructures. Le moulage par injection de métal est devenu une technologie importante pour la préparation des alliages tungstène-nickel-cuivre grâce à ses avantages pour la production de petites pièces de formes complexes. Il est largement utilisé dans les dispositifs médicaux, les équipements

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

électroniques et les composants militaires.

5.3.1 Moulage par injection de métal

Le moulage par injection de métal (MIM) est une technologie de fabrication avancée qui combine la métallurgie des poudres et le moulage par injection plastique. Il forme une barbotine fluide en mélangeant des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre avec un liant. Après moulage par injection, la barbotine est dégraissée et frittée pour former des pièces en alliage haute densité. Le MIM est particulièrement adapté à la fabrication de petites pièces de forme complexe et de haute précision, telles que des instruments médico-chirurgicaux, des connecteurs pour l'industrie électronique ou de petits contrepois pour l'aéronautique. Ses avantages résident dans une grande liberté de forme, une utilisation optimale des matériaux et une productivité élevée. Comparé au moulage par presse traditionnel, le MIM permet de réaliser des structures géométriques complexes (parois fines ou canaux internes, par exemple), de réduire l'usinage ultérieur et de diminuer les coûts.

Le procédé MIM comprend quatre étapes principales : le mélange, le moulage par injection, le déliantage et le frittage. Lors de cette étape, les poudres de tungstène, de nickel et de cuivre (ratio : 85 %-97 % de tungstène, 2 %-10 % de nickel, 1 %-8 % de cuivre) sont mélangées à un liant (comme du polypropylène ou un liant à base de cire) pour former une barbotine uniforme. La poudre de tungstène doit être sphéroïdisée pour améliorer sa fluidité, et les poudres de nickel et de cuivre doivent être nettoyées en surface pour améliorer l'adhérence. Le mélange doit être effectué dans un agitateur haute température afin de garantir une dispersion complète de la poudre et du liant. Lors de l'étape de moulage par injection, la barbotine est injectée dans un moule de précision. La conception du moule doit tenir compte du retrait et de la précision de la forme afin de former un corps vert à la géométrie souhaitée. Lors de l'étape de déliantage, le liant est éliminé par déliantage thermique ou par solvant, généralement par chauffage lent à basse température afin d'éviter toute fissuration ou déformation de l'ébauche. Le frittage en phase liquide est utilisé à cette étape. Le nickel et le cuivre forment une phase liquide à haute température pour mouiller les particules de tungstène, favoriser la densification et former une structure d'alliage proche de la densité théorique.

Le succès du MIM dépend de l'optimisation des paramètres du procédé. La granulométrie de la poudre doit être fine et uniformément répartie pour améliorer la fluidité de la barbotine et la densité de l'ébauche ; le choix et la proportion du liant influencent la régularité du moulage par injection et l'efficacité du déliantage. Enfin, la fluidité et la résistance à l'état vert doivent être équilibrées. Le frittage exige un contrôle précis de la température et de l'atmosphère, et l'utilisation d'argon haute pureté ou d'un environnement sous vide permet de prévenir l'oxydation et de garantir des propriétés amagnétiques. Les performances finales des pièces MIM sont optimisées par des post-traitements (comme le pressage isostatique à chaud ou le recuit) afin d'éliminer la porosité et les contraintes résiduelles et d'améliorer la résistance et la ténacité. Le contrôle qualité vérifie les performances des pièces par observation de la microstructure au MEB, mesure de la densité et tests de propriétés mécaniques, conformément aux normes ASTM B777 ou GB/T 26036.

En production réelle, la technologie MIM a considérablement amélioré la flexibilité de fabrication des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

alliages tungstène-nickel-cuivre. Par exemple, dans le domaine médical, les collimateurs de formes complexes produits par MIM offrent une grande précision et une excellente protection contre les radiations ; dans l'industrie électronique, les micro-dissipateurs thermiques ou les connecteurs fabriqués par MIM présentent à la fois une conductivité thermique élevée et des propriétés amagnétiques. L'optimisation des procédés doit se concentrer sur la haute précision de la conception des moules et le respect de l'environnement du liant, et utiliser des liants dégradables ou non toxiques pour réduire l'impact environnemental. À l'avenir, l'association du MIM à la fabrication additive (comme l'impression 3D de moules) permettra de produire rapidement des formes plus complexes et d'accroître le potentiel d'application des alliages tungstène-nickel-cuivre dans les secteurs de haute technologie.

5.3.2 Technologie de pressage isostatique à chaud

Le pressage isostatique à chaud (HIP) est un procédé avancé de post-traitement de métallurgie des poudres. Il applique une pression isotrope aux billettes d'alliage tungstène-nickel-cuivre dans un environnement de gaz inerte à haute température et pression afin d'éliminer les micropores, d'augmenter la densité et d'améliorer l'uniformité microstructurale. Cette technologie est particulièrement adaptée à la production de composants hautes performances tels que les contrepoids pour l'aéronautique, les pièces de blindage médical et les dissipateurs thermiques pour l'industrie électronique. Elle permet d'améliorer significativement la densité, les propriétés mécaniques (résistance à la traction, ténacité) et la résistance à la corrosion de l'alliage. Le pressage isostatique à chaud compacte davantage la structure après le frittage en phase liquide afin de compenser les minuscules défauts éventuellement laissés par le frittage conventionnel, de sorte que l'alliage soit proche de sa densité théorique et répond aux exigences des applications à haute fiabilité.

Le procédé de pressage isostatique à chaud est généralement réalisé dans un équipement dédié, utilisant de l'argon de haute pureté comme fluide de pression. Il comprend trois étapes principales : chauffage, isolation et refroidissement. Lors de l'étape de chauffage, la billette d'alliage tungstène-nickel-cuivre frittée est placée dans une cavité fermée et chauffée à une température proche du point de fusion de la phase de liaison nickel-cuivre (environ 1 200-1 400 °C) pour rendre le matériau plastique. Lors de l'étape d'isolation, une pression isostatique élevée est appliquée (généralement sous argon) pour comprimer les micropores de la billette avec une pression uniforme dans toutes les directions, favorisant ainsi la liaison étroite des particules de tungstène et de la phase de liaison nickel-cuivre. La phase nickel-cuivre présente une certaine fluidité à haute température, remplissant les pores et améliorant la force de liaison de l'interface ; les particules de tungstène conservent leur structure cubique centrée et forment un squelette stable. L'étape de refroidissement doit être effectuée lentement pour éviter les fissures causées par les contraintes thermiques et assurer la stabilité de la structure de l'alliage et l'uniformité des performances.

Le succès du pressage isostatique à chaud dépend de l'optimisation des conditions de procédé. Un contrôle précis de la température et de la pression est essentiel. La température doit assurer une fluidité suffisante de la phase nickel-cuivre tout en évitant une dissolution excessive des particules de tungstène. La pression doit être suffisante pour éliminer la porosité, mais pas trop élevée pour éviter de surcharger l'équipement. Une pureté élevée de l'argon est essentielle pour prévenir la formation d'oxydes (tels que WO_3 ou NiO_2) qui affectent la résistance amagnétique ou à la corrosion de l'alliage. La densité initiale

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la billette (optimisée par le mélange de poudre et le pressage) influence l'effet HIP. Les billettes présentant une porosité initiale plus faible peuvent atteindre plus efficacement un état proche de la densité théorique. Le pressage isostatique à chaud peut également être combiné au frittage en phase liquide en une seule étape, passant directement des billettes pressées par poudre aux pièces finales denses, ce qui raccourcit le cycle de production. En production réelle, le pressage isostatique à chaud améliore considérablement les performances des alliages tungstène-nickel-cuivre. Par exemple, dans le domaine aérospatial, les contrepoids traités HIP présentent une densité et une résistance aux vibrations supérieures, garantissant la stabilité du centre de gravité et une fiabilité à long terme. Dans les collimateurs médicaux, des structures proches de la densité théorique améliorent l'efficacité de la protection contre les radiations et la résistance à la corrosion. Le contrôle qualité vérifie l'effet HIP par mesure de la densité (méthode d'Archimède), observation de la microstructure au MEB et tests de propriétés mécaniques. L'optimisation des procédés doit se concentrer sur l'étanchéité haute pression et l'uniformité de la température des équipements, et utiliser des systèmes de contrôle automatisés pour améliorer la précision.

5.4 Post-traitement et traitement

Le post-traitement et l'usinage constituent les étapes finales de la préparation des alliages tungstène-nickel-cuivre. Ils visent à optimiser la précision dimensionnelle, la qualité de surface et les performances des pièces après frittage ou pressage isostatique à chaud, afin de répondre aux exigences strictes des industries aéronautique, médicale et électronique. Les procédés de post-traitement comprennent le traitement thermique, le traitement de surface et l'usinage pour éliminer les contraintes résiduelles, améliorer l'état de surface et obtenir des géométries complexes. La dureté et la ténacité élevées des alliages tungstène-nickel-cuivre rendent leur usinage complexe, mais des procédés optimisés permettent d'obtenir des pièces finales de haute précision et de haute qualité. Le post-traitement et l'usinage améliorent non seulement la fonctionnalité des pièces, mais aussi leur durabilité et leur fiabilité dans des environnements difficiles.

Le traitement thermique est une étape importante du post-traitement, comprenant généralement un recuit ou un vieillissement. Il vise à éliminer les contraintes résiduelles générées lors du frittage ou du CIC, à optimiser la microstructure et à améliorer la ténacité et la résistance à la corrosion. Le recuit corrige les défauts cristallins (tels que les dislocations ou les contraintes aux joints de grains) dans la phase de liaison nickel-cuivre par diffusion à travers l'isolant à basse température (environ 800-1000 °C), tout en préservant la stabilité des particules de tungstène. Le vieillissement favorise la formation de traces de précipitation dans la phase nickel-cuivre et renforce la résistance de la phase de liaison grâce à une isolation longue durée à basse température. Le traitement thermique doit être effectué dans un environnement d'argon de haute pureté ou sous vide afin d'éviter l'oxydation et de garantir la stabilité magnétique et chimique de l'alliage. Les pièces traitées thermiquement présentent des propriétés mécaniques plus uniformes et une meilleure résistance à la fatigue, ce qui les rend adaptées aux contrepoids aérospatiaux ou aux instruments médico-chirurgicaux.

Le traitement de surface améliore la qualité et les performances des composants grâce au polissage, à la passivation chimique ou aux technologies de revêtement. Le polissage mécanique ou électrochimique lisse la surface, réduit les défauts de surface (rayures ou microfissures), améliore la résistance à la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corrosion et l'esthétique, et est particulièrement adapté au blindage médical ou aux dissipateurs thermiques électroniques. La passivation chimique forme une couche d'oxyde protectrice par traitement en solution acide, améliore la résistance à la corrosion et convient aux applications en milieu marin ou stérilisé. Les technologies de revêtement (comme le revêtement PVD TiN ou DLC) peuvent améliorer encore la dureté de surface, la résistance à l'usure et à l'oxydation, et prolonger la durée de vie des composants. Le traitement de surface doit être choisi en fonction des exigences de l'application afin d'éviter les revêtements trop épais qui affectent la conductivité thermique ou l'amagnétisme.

L'usinage comprend le tournage, le fraisage, la rectification ou l'électroérosion (EDM), qui permet d'obtenir des formes complexes et des dimensions de haute précision. La dureté élevée des alliages tungstène-nickel-cuivre nécessite l'utilisation d'outils en carbure ou en diamant. De faibles vitesses de coupe et un arrosage suffisant sont nécessaires pendant l'usinage afin de réduire les contraintes thermiques et l'usure des outils. L'EDM est adapté aux géométries complexes (telles que les canaux internes ou les structures à parois minces) et enlève de la matière par impulsions électriques pour maintenir une haute précision. Les pièces usinées doivent être nettoyées et inspectées afin de garantir l'absence de contraintes résiduelles et de dommages de surface. Le contrôle qualité vérifie la précision de l'usinage et la qualité de surface par mesure dimensionnelle (MMT), contrôle de rugosité de surface et observation au MEB.

En production réelle, le post-traitement et la transformation ont considérablement amélioré l'applicabilité des alliages tungstène-nickel-cuivre. Par exemple, dans le bloc d'équilibrage de la machine de photolithographie, l'usinage de précision garantit une précision subnanométrique, et le polissage de surface améliore la conductivité thermique et la résistance à la corrosion ; dans le cœur des projectiles perforants militaires, le traitement thermique améliore la ténacité, et l'usinage permet d'obtenir des formes complexes. L'optimisation des procédés doit se concentrer sur la résistance à l'usure des outils et la propreté de l'environnement de traitement, et utiliser des équipements de traitement automatisés pour améliorer l'efficacité. Le contrôle qualité vérifie l'intégrité des composants par des tests non destructifs (tels que les ultrasons ou les rayons X).

5.4.1 Usinage de précision

L'usinage de précision est un procédé clé pour le post-traitement des alliages tungstène-nickel-cuivre. Il permet de transformer des ébauches frittées ou pressées isostatiquement à chaud en composants finaux aux dimensions de haute précision et aux géométries complexes, répondant ainsi aux exigences strictes des industries aérospatiale, médicale et électronique. La dureté et la ténacité élevées des alliages tungstène-nickel-cuivre rendent leur usinage complexe. Cependant, l'optimisation des outils et des procédés permet d'atteindre une précision submillimétrique, voire submicronique, idéale pour les composants antivibratoires des machines de lithographie, les collimateurs médicaux ou les noyaux perforants militaires. L'usinage de précision garantit non seulement la précision de forme et de dimension des composants, mais améliore également l'état de surface, améliorant ainsi les performances et la fiabilité.

L'usinage de précision fait généralement appel à des technologies telles que le tournage, le fraisage, la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rectification et l'usinage par électroérosion (EDM). Le tournage et le fraisage utilisent des machines à commande numérique (CNC) pour usiner des alliages et sont adaptés à la production de pièces de forme régulière telles que des barres ou des plaques. La dureté élevée du tungstène nécessite l'utilisation d'outils revêtus de carbure ou de diamant. De faibles vitesses de coupe et un liquide de refroidissement suffisant (comme des émulsions aqueuses) sont nécessaires pendant l'usinage afin de réduire les contraintes thermiques et l'usure des outils. La rectification affine la surface à l'aide de meules ou d'abrasifs pour obtenir une finition et une précision dimensionnelle élevées, particulièrement adaptées aux exigences de surface des pièces de blindage médical ou des dissipateurs thermiques électroniques. L'EDM utilise des impulsions électriques pour éliminer les traces de matière des matériaux conducteurs, ce qui est idéal pour la fabrication de formes complexes ou de canaux internes, comme l'usinage de microstructures de petits contrepoids dans l'aéronautique. L'EDM permet d'atteindre une haute précision sans contact direct, réduisant ainsi l'usure des outils et les contraintes sur les matériaux.

Le processus d'usinage doit être optimisé pour s'adapter aux caractéristiques de l'alliage tungstène-nickel-cuivre. La ténacité de la phase de liaison nickel-cuivre peut entraîner l'adhérence de l'alliage à l'outil pendant l'usinage, et les bavures de surface doivent être réduites en optimisant la vitesse de coupe et l'avance. La dureté élevée des particules de tungstène peut entraîner une usure rapide des outils, qui doivent être vérifiés et remplacés régulièrement pour garantir la régularité de l'usinage. L'environnement d'usinage doit être maintenu propre (fonctionnement en salle blanche) afin d'éviter la poussière ou les impuretés qui pourraient affecter les performances des composants. Le choix du liquide de refroidissement doit tenir compte de la protection de l'environnement et de la non-corrosivité de l'alliage afin d'éviter la corrosion de surface ou la formation de résidus. Les pièces usinées doivent être nettoyées par ultrasons pour éliminer les copeaux et le liquide de refroidissement et garantir une surface propre.

En production réelle, l'usinage de précision améliore considérablement les performances des pièces en alliage tungstène-nickel-cuivre. Par exemple, dans le bloc d'équilibrage de la machine de photolithographie, l'usinage CNC atteint une précision subnanométrique et assure la stabilité de la plateforme ; au cœur des projectiles perforants militaires, l'usinage par électro-étincelage crée des formes géométriques complexes et améliore les performances de pénétration. Le contrôle qualité vérifie la précision dimensionnelle et la finition grâce à des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT), des interféromètres laser et des tests de rugosité de surface. L'optimisation des processus doit se concentrer sur l'intégration des équipements d'usinage automatisés et la résistance à l'usure des matériaux des outils, et utiliser des systèmes CNC intelligents pour améliorer l'efficacité.

5.4.2 Procédé de traitement de surface

Le traitement de surface est une étape importante du post-traitement des alliages tungstène-nickel-cuivre. Il vise à améliorer l'état de surface, la résistance à la corrosion, la résistance à l'usure et l'esthétique des pièces afin de répondre aux exigences spécifiques des industries médicale, électronique et aérospatiale. La qualité de surface des alliages tungstène-nickel-cuivre influence directement leurs performances dans des environnements difficiles (tels que la stérilisation, les environnements marins ou à haute température). Le traitement de surface améliore la résistance à la corrosion, la résistance à l'oxydation et la fonctionnalité de l'alliage en optimisant l'état de surface. Les procédés de traitement de surface

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

comprennent le polissage mécanique, la passivation chimique, le polissage électrochimique et le revêtement. La méthode de traitement appropriée doit être choisie en fonction des exigences de l'application.

Le polissage mécanique est une méthode de traitement de surface couramment utilisée. La surface du composant est poncée progressivement à l'aide d'une meule, d'un tissu de polissage ou d'un abrasif afin d'éliminer les marques d'usinage, les rayures et les défauts mineurs, et ainsi obtenir un fini miroir. Le lissé de surface après polissage est amélioré (la rugosité est réduite), ce qui améliore non seulement l'esthétique, mais réduit également les points d'adhérence des produits corrosifs, ce qui est idéal pour l'application de collimateurs médicaux ou de dissipateurs thermiques électroniques. Le polissage nécessite l'utilisation d'abrasifs progressivement raffinés, et la pression et la vitesse de polissage sont contrôlées pour éviter la surchauffe ou la concentration des contraintes superficielles. Le polissage électrochimique applique un courant électrique dans l'électrolyte pour dissoudre légèrement la surface de l'alliage, la lisser et former un fin film de passivation, améliorant ainsi la résistance à la corrosion. Il est particulièrement adapté aux contrepois de navires en milieu marin.

La passivation chimique forme une couche protectrice d'oxyde dense (principalement NiO) en surface en immergeant les pièces dans une solution acide ou neutre (comme une solution diluée d'acide nitrique ou d'acide citrique), améliorant ainsi leur résistance à la corrosion et à l'oxydation. Le traitement de passivation nécessite un contrôle de la concentration de la solution et du temps d'immersion afin d'éviter une corrosion excessive et une dégradation superficielle. Les pièces traitées présentent une meilleure stabilité en environnement stérilisé ou humide et conviennent à une utilisation prolongée des dispositifs médicaux. Les technologies de revêtement (comme le dépôt physique en phase vapeur (PVD) ou le dépôt chimique en phase vapeur (CVD)) améliorent considérablement la dureté de surface, la résistance à l'usure et la résistance à la corrosion en déposant une fine couche de matériau (comme TiN, DLC ou CrN). Le revêtement PVD TiN confère aux pièces un aspect doré et une excellente résistance à l'usure, ce qui est idéal pour les contrepois aéronautiques; le revêtement DLC présente un faible coefficient de frottement et convient aux pièces coulissantes de l'industrie électronique. L'épaisseur du revêtement doit être contrôlée avec précision pour éviter toute altération de la conductivité thermique ou de l'amagnétisme.

Le traitement de surface doit être réalisé dans un environnement propre afin d'éviter toute pollution par la poussière ou l'huile. Avant le traitement, les pièces doivent être nettoyées par ultrasons pour éliminer les résidus de traitement; après traitement, elles doivent être rincées à l'eau déionisée et séchées pour éviter toute contamination secondaire. Le contrôle qualité vérifie la résistance à la corrosion par des tests de rugosité de surface (par exemple, un profilomètre), l'observation de la morphologie de surface au MEB et des tests au brouillard salin. L'optimisation du procédé doit se concentrer sur le respect de l'environnement de la solution de traitement et la haute précision des équipements, et utiliser des équipements de polissage ou de revêtement automatisés pour améliorer la régularité. En production réelle, le traitement de surface améliore considérablement les performances d'application de l'alliage. Par exemple, pour les pièces de blindage de tomographie médicale, le polissage électrochimique améliore l'état de surface et la résistance à la désinfection; pour les dissipateurs thermiques de photolithographie, les revêtements PVD améliorent la résistance à l'usure et la conductivité thermique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

High Density: Typically 16.5 - 18.75 g/cm³

High Thermal Conductivity: Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

5. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten-alloy.com



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Chapitre 6 Application de l'alliage tungstène-nickel-cuivre dans le domaine de l'information électronique

L'alliage tungstène-nickel-cuivre est largement utilisé dans le domaine de l'information électronique en raison de sa densité élevée, de ses propriétés amagnétiques, de son excellente conductivité thermique et de son faible coefficient de dilatation thermique, notamment pour l'encapsulation de puces, la gestion de la dissipation thermique et les composants de contreponds de haute précision. Préparé par métallurgie des poudres, cet alliage associe la densité élevée du tungstène à la ténacité et à la conductivité thermique de la phase de liaison nickel-cuivre. Il répond aux exigences élevées des équipements électroniques en matière de gestion thermique, de compatibilité électromagnétique et de stabilité dimensionnelle. Avec le développement rapide de la technologie 5G, de l'intelligence artificielle et de l'Internet des objets, la demande de matériaux haute performance dans le domaine de l'information électronique augmente. Grâce à ses propriétés physiques et chimiques uniques, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est devenu un choix idéal pour l'encapsulation de puces, les modules RF et les machines de photolithographie.

6.1 Conditionnement des puces et dissipation thermique

L'encapsulation des puces et la dissipation thermique sont des technologies clés dans le domaine de l'information électronique. Elles impliquent la fixation de la puce sur le substrat et la gestion efficace de la chaleur générée pendant le fonctionnement afin de garantir des performances élevées et une longue durée de vie du dispositif. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé comme substrat de dissipation thermique, dissipateur thermique et contreponds dans l'encapsulation des puces. Grâce à sa conductivité thermique élevée, son faible coefficient de dilatation thermique et ses propriétés amagnétiques, il permet une dissipation thermique efficace, une stabilité dimensionnelle et une protection contre les interférences électromagnétiques, répondant ainsi aux besoins des équipements électroniques haute puissance et haute fréquence. La microstructure de l'alliage est optimisée par frittage en phase liquide et pressage isostatique à chaud pour former un réseau dense de particules de tungstène et de phases de liaison nickel-cuivre, offrant une excellente conductivité thermique et une excellente stabilité mécanique. Ses applications couvrent les équipements de haute précision tels que les dispositifs haute puissance, les modules RF 5G et les machines de lithographie, contribuant ainsi à l'amélioration des performances et à la miniaturisation du secteur de l'information électronique.

6.1.1 Substrat de dissipation thermique pour dispositifs haute puissance

Le substrat de dissipation thermique des composants haute puissance est un composant essentiel du boîtier des puces. Il permet de dissiper rapidement la chaleur générée par la puce pendant son fonctionnement, évitant ainsi toute surchauffe susceptible d'entraîner une dégradation des performances ou une panne du composant. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau idéal pour les substrats de dissipation thermique des composants haute puissance (tels que les amplificateurs de puissance, les GPU et les diodes laser) grâce à son excellente conductivité thermique et son faible coefficient de dilatation thermique. La conductivité thermique élevée de l'alliage est due à la conductivité thermique rapide du cuivre, qui permet de transférer rapidement la chaleur générée par la puce au système de dissipation thermique. Ce faible coefficient de dilatation thermique correspond aux caractéristiques de dilatation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

thermique des matériaux des puces (tels que le silicium ou le nitrure de gallium), réduisant ainsi les déformations ou les fissures dues aux contraintes thermiques et garantissant la stabilité à long terme de la structure du boîtier. Son amagnétisme évite les interférences électromagnétiques et convient aux composants électroniques haute fréquence.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est transformé en un substrat haute densité par métallurgie des poudres. Le frittage en phase liquide assure une répartition uniforme de la phase de liaison nickel-cuivre, améliorant ainsi la conductivité thermique. Le pressage isostatique à chaud élimine les micropores et améliore la densité et la résistance du substrat. L'usinage de précision et les traitements de surface (tels que le polissage électrochimique ou le revêtement PVD) optimisent la finition du substrat, réduisent la résistance thermique et améliorent l'efficacité du contact avec la puce. La surface du substrat tungstène-nickel-cuivre est généralement fusionnée à la puce par soudage ou collage. Il est donc nécessaire de garantir une liaison solide de l'interface afin d'éviter tout décollement ou fissure lors des cycles thermiques. Dans les dispositifs haute puissance, l'utilisation de substrats de dissipation thermique tungstène-nickel-cuivre améliore considérablement les performances. Par exemple, dans les puces de calcul haute performance (HPC), la dissipation thermique rapide du substrat assure la stabilité de la puce sous forte charge. Dans les diodes laser, le faible coefficient de dilatation thermique préserve la précision de positionnement des composants optiques. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la conductivité thermique par l'ajustement du rapport nickel-cuivre, l'utilisation de nano-revêtements (tels que le DLC) pour réduire la résistance thermique de surface, ou encore l'association de la fabrication additive pour personnaliser des structures complexes de dissipation thermique. Le contrôle qualité vérifie les propriétés du substrat par des tests de conductivité thermique (méthode flash laser) et des mesures du coefficient de dilatation thermique afin de garantir la conformité aux normes de l'industrie électronique (telles que JEDEC).

6.1.2 Dissipateur thermique à contrepoids du module RF 5G

Le dissipateur thermique à contrepoids pour modules RF 5G est un composant essentiel des équipements de communication 5G. Il assure à la fois la dissipation thermique et le contrepoids, garantissant la gestion thermique du module et la stabilité du centre de gravité lors de son fonctionnement à haute fréquence. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est le matériau privilégié pour les dissipateurs thermiques à contrepoids des modules RF en raison de sa densité élevée, de ses propriétés amagnétiques, de sa conductivité thermique élevée et de son faible coefficient de dilatation thermique. Les modules RF 5G doivent fonctionner sous des signaux haute fréquence (ondes millimétriques), générant beaucoup de chaleur, tout en exigeant miniaturisation et haute précision. L'alliage tungstène-nickel-cuivre permet une dissipation thermique rapide, une stabilité dimensionnelle et une atténuation des interférences électromagnétiques, répondant ainsi aux exigences de haute performance du module. Sa haute densité lui permet de fournir un contrepoids suffisant dans un espace restreint, d'optimiser la répartition du centre de gravité du module et de réduire l'impact des vibrations sur la transmission du signal.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des dissipateurs thermiques à contrepoids de forme complexe par moulage par injection de métal (MIM) ou métallurgie des poudres. La technologie MIM permet de fabriquer des composants de haute précision

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

par mélange de poudre avec un liant, moulage par injection, dégraissage et frittage, adaptés aux exigences géométriques complexes des modules miniaturisés. Le frittage en phase liquide permet à la phase liquide nickel-cuivre de mouiller les particules de tungstène pour former une microstructure dense, améliorant ainsi la conductivité thermique et les propriétés mécaniques. Un traitement de surface (tel que le revêtement PVD TiN ou le polissage électrochimique) améliore la résistance à la corrosion et la finition de la surface, réduit la résistance thermique et renforce la résistance à l'oxydation. L'usinage de précision en post-traitement garantit la précision dimensionnelle des composants et répond aux exigences strictes de tolérance des modules 5G.

Dans les modules RF 5G, les dissipateurs thermiques à contrepoids en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les performances des modules. Par exemple, dans les modules d'antenne de station de base, la densité élevée de l'alliage assure la stabilité du centre de gravité de l'antenne, et la conductivité thermique disperse rapidement la chaleur de la puce RF pour maintenir la stabilité de la transmission du signal. Dans les terminaux mobiles (tels que les smartphones), les dissipateurs thermiques à contrepoids miniaturisés favorisent la compacité du module tout en garantissant une gestion thermique efficace. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la conductivité thermique par l'optimisation du rapport nickel-cuivre, l'amélioration des capacités de dissipation thermique grâce à des conceptions microstructurées (comme les canaux de dissipation thermique en nid d'abeille) ou l'association de la technologie de pressage isostatique à chaud pour améliorer encore la densité. Le contrôle qualité vérifie les performances des composants par des mesures de densité, des tests de conductivité thermique et des tests de force de magnétisation afin de garantir la conformité aux normes de communication 5G (telles que la 3GPP).

6.2 Équipements micro-ondes et radar

Les équipements hyperfréquences et radars constituent la technologie de base de l'information électronique. Largement utilisés dans les communications, la navigation, la télédétection et la défense nationale, ils nécessitent des matériaux à haute densité, amagnétiques, à conductivité thermique élevée et à stabilité dimensionnelle pour garantir les performances des équipements dans des environnements haute fréquence, haute puissance et complexes. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est devenu le matériau privilégié pour les composants de masse d'antenne et de blindage des équipements hyperfréquences et radars grâce à ses propriétés physiques et chimiques uniques. Sa densité élevée permet un contrôle précis du centre de gravité, ses propriétés amagnétiques préviennent les interférences électromagnétiques, tandis que sa conductivité thermique élevée et son faible coefficient de dilatation thermique garantissent la gestion thermique et la stabilité dimensionnelle, et répondent aux exigences de fiabilité des équipements dans des environnements extrêmes. Cet alliage forme une microstructure dense grâce à des procédés de frittage en phase liquide et de pressage isostatique à chaud, associés à un usinage de précision et à un traitement de surface, afin de répondre aux exigences de haute précision des équipements hyperfréquences et radars.

6.2.1 Ensemble de poids d'antenne

Les masses d'antenne sont des composants clés des équipements hyperfréquences et radars. Elles

permettent d'ajuster la distribution du centre de gravité de l'antenne afin d'assurer sa stabilité et sa précision de pointage dans des environnements dynamiques (tels que le mouvement des satellites ou les vibrations des navires). L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau idéal pour les masses d'antenne grâce à sa densité élevée et à ses propriétés amagnétiques. Cette densité élevée permet à l'alliage de fournir une masse suffisante dans un volume limité, d'optimiser la position du centre de gravité du système d'antenne et de réduire les déviations dues aux vibrations ou à la charge du vent. Cette propriété amagnétique évite les interférences du champ magnétique et garantit la précision et la stabilité de l'antenne lors de la transmission de signaux hyperfréquences haute fréquence (tels que la bande Ku ou les ondes millimétriques). Le faible coefficient de dilatation thermique de l'alliage assure la stabilité dimensionnelle face aux variations de température (telles que les différences de température entre le jour et la nuit ou les basses températures en altitude) et préserve la précision géométrique de l'antenne.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des masselottes d'antenne par métallurgie des poudres, généralement par moulage par injection de métal (MIM) ou par pressage isostatique à froid. Ces alliages permettent de former des billettes de formes complexes répondant aux exigences de compacité des systèmes d'antennes. Le frittage en phase liquide permet à la phase liquide nickel-cuivre de mouiller les particules de tungstène pour former une microstructure dense, améliorant ainsi la densité et les propriétés mécaniques des masselottes. Le pressage isostatique à chaud élimine les micropores et améliore la densité, ce qui le rend idéal pour des applications à haute fiabilité telles que les antennes de communication par satellite. L'usinage de précision (fraisage CNC ou électroérosion) garantit la précision dimensionnelle des masselottes, et le traitement de surface (polissage électrochimique ou revêtement PVD) améliore la résistance à la corrosion et l'état de surface, réduisant ainsi la diffusion du signal ou l'érosion environnementale.

Dans les applications d'antennes, les composants de lestage en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les performances des équipements. Par exemple, dans les antennes de station de base 5G, les lests haute densité assurent la stabilité de l'antenne face aux vibrations haute fréquence, et leurs propriétés amagnétiques évitent les interférences de signal ; dans les antennes de communication par satellite, le faible coefficient de dilatation thermique maintient la précision de pointage en haute altitude. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la conductivité thermique par l'optimisation du rapport nickel-cuivre, l'amélioration des propriétés mécaniques par la conception de la microstructure (comme les nervures de renfort internes) ou la personnalisation de formes complexes grâce à la fabrication additive. Le contrôle qualité vérifie les performances des composants par des mesures de densité, des tests de force de magnétisation et des tests de vibration afin de garantir la conformité aux normes de communication micro-ondes.

6.2.2 Composants de blindage radar

Les composants de blindage radar servent à isoler les interférences électromagnétiques, à absorber les signaux parasites ou à protéger les composants électroniques sensibles des équipements radar afin d'assurer un fonctionnement stable du système dans les environnements haute fréquence et haute puissance. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est le matériau privilégié pour les composants de blindage radar en raison de son amagnétisme, de sa haute densité et de son excellente conductivité thermique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cette propriété amagnétique évite l'interférence des champs magnétiques sur les signaux radar, ce qui est particulièrement adapté aux systèmes radar haute sensibilité (tels que les radars à commande de phase). Sa haute densité permet à l'alliage d'absorber et de protéger efficacement les ondes électromagnétiques, réduisant ainsi les fuites de signaux ou les interférences externes. La conductivité thermique disperse rapidement la chaleur générée par l'émetteur ou le récepteur radar, évitant ainsi toute surchauffe affectant les performances de l'équipement. Le faible coefficient de dilatation thermique garantit la stabilité dimensionnelle des composants dans des environnements à haute température ou soumis à des cycles thermiques, évitant ainsi toute déformation susceptible d'altérer l'effet de blindage.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des composants de blindage par métallurgie des poudres ou technologie MIM afin de répondre aux exigences de formes complexes et de conceptions compactes. Le frittage en phase liquide forme une microstructure dense avec une répartition uniforme de la phase de liaison nickel-cuivre, améliorant ainsi la conductivité thermique et les propriétés mécaniques. Le pressage isostatique à chaud élimine la porosité résiduelle, améliore la densité et la durabilité des composants de blindage et convient aux exigences élevées des radars militaires et aéronautiques. L'usinage de précision (comme la rectification ou l'électroérosion) permet d'obtenir une géométrie de haute précision pour garantir une intégration parfaite des composants aux systèmes radar. Les traitements de surface (comme le revêtement PVD CrN ou la passivation chimique) améliorent la résistance à la corrosion et à l'oxydation, prolongeant ainsi la durée de vie des composants dans les environnements humides ou à haute température.

Dans les applications radar, les composants de blindage en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement la fiabilité du système. Par exemple, dans les radars multiéléments militaires, les composants de blindage non magnétiques évitent les interférences de signaux, et une densité élevée améliore l'efficacité du blindage électromagnétique ; dans les radars météorologiques, la conductivité thermique assure la gestion thermique des émetteurs haute puissance. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la conductivité par l'ajustement du rapport nickel-cuivre, l'utilisation de revêtements composites multicouches pour améliorer les effets de blindage, ou l'association de la technologie d'impression 3D pour la fabrication de structures de blindage complexes. Le contrôle qualité vérifie les performances des composants par des tests de blindage électromagnétique (tels que MIL-STD-461), de conductivité thermique et de brouillard salin afin de garantir la conformité aux normes des systèmes radar (telles que la norme CEI 61000).

6.3 Systèmes micro-électromécaniques

Les systèmes microélectromécaniques (MEMS) sont des technologies intégrant la microélectronique à des structures mécaniques à l'échelle du micron au millimètre. Ils sont largement utilisés dans les smartphones, l'automobile, les dispositifs médicaux et l'aérospatiale, notamment dans les accéléromètres, les gyroscopes et les microactionneurs. Les dispositifs MEMS nécessitent des matériaux à haute densité pour réaliser des contrepois miniaturisés, des propriétés amagnétiques pour éviter les interférences électromagnétiques, une excellente conductivité thermique pour gérer la chaleur dans des espaces réduits et de faibles coefficients de dilatation thermique pour assurer la stabilité dimensionnelle. Grâce à leur haute densité et à leurs propriétés amagnétiques, les alliages tungstène-nickel-cuivre peuvent fournir une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

masse suffisante dans un volume réduit et optimiser la répartition du centre de gravité des dispositifs MEMS. Leur conductivité thermique élevée et leur faible coefficient de dilatation thermique garantissent une gestion thermique et une stabilité à long terme, ce qui les rend adaptés aux applications dans des environnements dynamiques et de haute précision. Ces alliages sont préparés par moulage par injection de métal (MIM) ou métallurgie des poudres de précision, associés à un usinage de précision et à un traitement de surface pour répondre aux exigences de miniaturisation et de fabrication de haute précision des MEMS.

6.3.1 Contrepoids du capteur inertielle

Le contrepoids de capteur inertielle est un composant essentiel des accéléromètres et gyroscopes MEMS. Il permet d'ajuster les propriétés inertielles du bloc de masse du capteur afin de garantir une réponse très sensible à l'accélération ou à la vitesse angulaire. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau idéal pour les contrepoids de capteurs inertiels grâce à sa densité élevée et à ses propriétés amagnétiques. Cette densité élevée permet à l'alliage de fournir une masse suffisante dans un volume réduit, d'améliorer la sensibilité et la précision de réponse du capteur, et est adapté aux conceptions miniaturisées telles que les capteurs MEMS pour smartphones ou objets connectés. Cette propriété amagnétique évite les interférences des champs magnétiques sur les signaux du capteur, garantissant ainsi des mesures de haute précision dans des environnements électromagnétiques complexes (tels que l'électronique automobile ou les systèmes de navigation aérienne). Le faible coefficient de dilatation thermique de l'alliage assure la stabilité dimensionnelle du contrepoids face aux variations de température et préserve la fiabilité à long terme du capteur.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des micropoids par moulage par injection de métal (MIM) afin de répondre aux exigences des dispositifs MEMS en matière de formes complexes et de haute précision. Le procédé MIM mélange des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre avec un liant, et forme une structure dense par dégraissage et frittage en phase liquide après moulage par injection. La phase liquide nickel-cuivre mouille les particules de tungstène, réduit la porosité et améliore la densité et les propriétés mécaniques. L'usinage de précision (comme le micro-fraisage ou le traitement laser) optimise encore la précision dimensionnelle du contrepoids à des tolérances de l'ordre du micron. Le traitement de surface (comme le polissage électrochimique ou le revêtement PVD) améliore l'état de surface, réduit les frottements et la résistance thermique, et assure une intégration parfaite aux structures MEMS. Le traitement et la manipulation doivent être effectués en salle blanche afin d'éviter toute contamination par la poussière qui affecte les performances des microcomposants.

Dans les applications de capteurs inertiels, les contrepoids en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les performances des dispositifs. Par exemple, dans les accéléromètres pour smartphones, les contrepoids haute densité améliorent la sensibilité de la détection de mouvement, et leurs propriétés amagnétiques garantissent un fonctionnement stable dans des environnements d'interférences électromagnétiques ; dans les systèmes d'airbags automobiles, la stabilité dimensionnelle et la conductivité thermique des contrepoids garantissent la fiabilité des capteurs à des températures extrêmes. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la conductivité thermique par l'optimisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

du rapport nickel-cuivre, l'utilisation de microstructures (comme des contrepoids poreux) pour réduire la masse tout en préservant l'inertie, ou l'association de la fabrication additive pour obtenir une miniaturisation de plus grande précision. Le contrôle qualité vérifie les performances des contrepoids par des mesures de densité, des tests de force de magnétisation et des tests de vibration afin de garantir la conformité aux normes MEMS (telles que la norme ISO 16063). À l'avenir, à mesure que les capteurs MEMS évolueront vers une sensibilité et une miniaturisation accrues, les contrepoids en tungstène-nickel-cuivre pourront optimiser encore davantage leurs performances grâce à l'intégration de nanomatériaux.

6.3.2 Composants de la microbalance

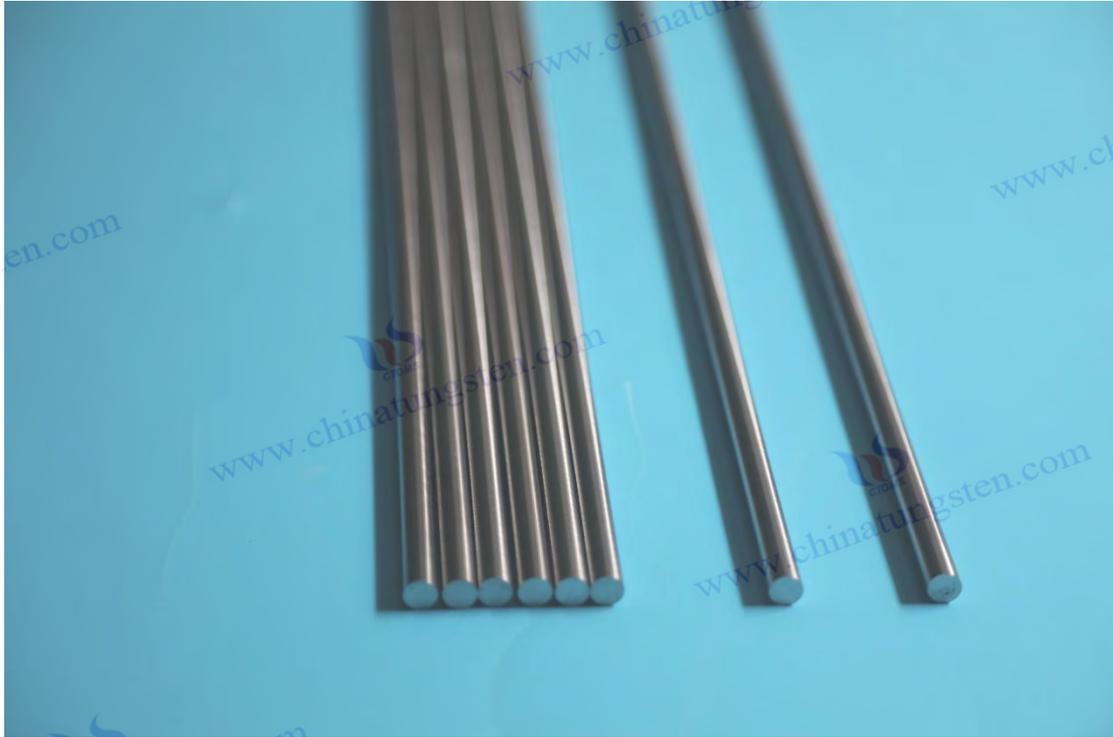
Les composants micro-équilibrés sont des composants clés des actionneurs, oscillateurs ou micro-miroirs MEMS. Ils permettent d'ajuster l'équilibre dynamique et la répartition du centre de gravité des structures micromécaniques afin d'assurer leur stabilité lors de vibrations haute fréquence ou de mouvements rapides. Les alliages tungstène-nickel-cuivre sont les matériaux privilégiés pour les composants micro-équilibrés en raison de leur densité élevée, de leurs propriétés amagnétiques et de leur faible coefficient de dilatation thermique. Cette densité élevée permet à l'alliage d'offrir une masse suffisante dans un volume réduit, d'optimiser la position du centre de gravité des dispositifs MEMS (tels que les micro-miroirs optiques ou les micro-gyroscopes) et de réduire le décalage vibratoire ou la résonance mécanique. Cette propriété amagnétique évite les interférences électromagnétiques et convient aux équipements optiques ou de communication de haute précision. Le faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité géométrique des composants face aux variations de température et préserve la précision de fonctionnement de la structure MEMS.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des composants micro-équilibrés par le procédé MIM (micro-métallurgie des poudres), afin de répondre aux exigences de formes complexes et de précision au micron. Le procédé MIM forme de minuscules billettes par moulage par injection, tandis que le frittage en phase liquide et le pressage isostatique à chaud améliorent encore la densité, éliminent les micropores et optimisent les propriétés mécaniques et la conductivité thermique. L'usinage de précision (tel que le micro-usinage laser ou l'usinage par électro-étincelage) permet d'obtenir des formes géométriques de haute précision avec des tolérances contrôlées au micron, ce qui est adapté aux structures minuscules des oscillateurs MEMS. Les traitements de surface (tels que le revêtement DLC ou la passivation chimique) améliorent la résistance à l'usure et à la corrosion, et prolongent la durée de vie des composants dans des environnements dynamiques. Le processus de traitement doit être réalisé dans un environnement hautement propre afin d'éviter que la pollution par la poussière n'affecte les performances des microcomposants.

Dans les applications MEMS, les composants micro-équilibrés tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les performances des dispositifs. Par exemple, dans les micromiroirs à balayage laser, les composants d'équilibrage haute densité optimisent la répartition du centre de gravité de l'oscillateur et améliorent la précision et la vitesse de balayage ; dans les microgyroscopes, l'amagnétisme et les faibles coefficients de dilatation thermique garantissent une sensibilité élevée et une adaptabilité environnementale. Les axes d'optimisation incluent la réduction de la masse grâce à la conception de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

microstructures (comme des structures creuses), l'utilisation de nanorevêtements pour améliorer les propriétés de surface ou la combinaison de la technologie d'impression 3D pour une personnalisation rapide de formes complexes. Le contrôle qualité vérifie les performances des composants par des mesures de précision dimensionnelle par MMT, des tests de conductivité thermique et des tests de blindage électromagnétique afin de garantir la conformité aux normes MEMS (comme la norme IEEE 1833).



CTIA GROUP LTD Alliage de tungstène nickel cuivre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 7 Application de l'alliage tungstène-nickel-cuivre dans l'énergie et l'industrie

L'alliage tungstène-nickel-cuivre présente un excellent potentiel d'application dans les secteurs de l'énergie et de l'industrie grâce à sa densité élevée, ses propriétés amagnétiques, son excellente conductivité thermique et son faible coefficient de dilatation thermique, notamment dans les applications à forte demande telles que les véhicules à énergies nouvelles, l'aérospatiale et les équipements industriels. Préparé par métallurgie des poudres, cet alliage associe la densité élevée du tungstène à la ténacité et à la conductivité thermique de la phase de liaison nickel-cuivre, ce qui lui permet de répondre aux exigences strictes des équipements énergétiques en matière de gestion thermique, d'équilibrage des masses et de compatibilité électromagnétique. Face à la demande mondiale croissante d'énergies propres et de technologies industrielles performantes, l'application de l'alliage tungstène-nickel-cuivre aux véhicules à énergies nouvelles prend une importance croissante, notamment pour les contrepoids de rotors de moteurs et les substrats de dissipation thermique des batteries.

7.1 Domaine des véhicules à énergie nouvelle

Les véhicules à énergies nouvelles (y compris les véhicules électriques et hybrides) s'appuient sur des systèmes moteurs et de gestion de batterie performants, et imposent des exigences élevées en matière de densité, de conductivité thermique, d'amagnétisme et de stabilité dimensionnelle des matériaux. Grâce à ses propriétés physiques et chimiques uniques, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est devenu un matériau idéal pour les composants clés des systèmes moteurs et batteries. Sa densité élevée lui permet d'assurer un équilibrage précis du poids et d'optimiser l'équilibre dynamique du rotor du moteur ; sa conductivité thermique élevée et son faible coefficient de dilatation thermique favorisent la gestion thermique du système batterie et préservent la stabilité et la sécurité opérationnelles ; son amagnétisme évite les interférences électromagnétiques et garantit les performances du moteur et du système électronique. L'alliage est élaboré par frittage en phase liquide, pressage isostatique à chaud et usinage de précision pour répondre aux exigences des véhicules à énergies nouvelles en matière de précision et de durabilité.

7.1.1 Poids du rotor du moteur

Le contrepoids du rotor du moteur est un composant essentiel du système d'entraînement des véhicules à énergies nouvelles. Il permet d'ajuster la répartition du centre de gravité du rotor, d'assurer l'équilibre dynamique du moteur lors des rotations à grande vitesse, de réduire les vibrations et le bruit, et d'améliorer le rendement et la durée de vie. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est le matériau privilégié pour les contrepoids du rotor du moteur en raison de sa densité élevée et de ses propriétés amagnétiques. Cette densité élevée permet à l'alliage de fournir une masse suffisante dans un volume limité, de contrôler avec précision la position du centre de gravité du rotor, de réduire les vibrations excentriques lors des rotations à grande vitesse et de prolonger la durée de vie des roulements du moteur. Cette propriété amagnétique évite les interférences du champ magnétique et assure un fonctionnement stable du moteur dans un environnement électromagnétique haute fréquence. Il est particulièrement adapté aux moteurs synchrones à aimants permanents ou aux moteurs à induction. Le faible coefficient de dilatation thermique de l'alliage assure la stabilité dimensionnelle du contrepoids malgré l'échauffement dû au fonctionnement du moteur et préserve la précision de l'équilibrage du rotor. Lors du processus de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des composants de contrepoids par moulage par injection de métal ou par métallurgie des poudres afin de répondre aux exigences de conception de formes complexes et de miniaturisation. La technologie MIM forme une structure haute densité en mélangeant des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre avec un liant, puis en procédant à un dégraissage et à un frittage en phase liquide après moulage par injection. La phase liquide nickel-cuivre mouille les particules de tungstène pour améliorer les propriétés mécaniques et la conductivité thermique. Le pressage isostatique à chaud élimine les micropores, améliore la densité et la résistance du contrepoids et convient aux applications de moteurs hautes performances. L'usinage de précision permet d'obtenir des tolérances de l'ordre du micron pour garantir une adaptation parfaite du contrepoids au rotor. Le traitement de surface améliore la résistance à la corrosion et l'état de surface, tout en réduisant les frottements et l'usure.

Dans les véhicules à énergies nouvelles, les masselottes de rotor de moteur en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les performances du système d'entraînement. Par exemple, dans les moteurs d'entraînement principaux des véhicules électriques, les masselottes haute densité réduisent les vibrations et le bruit et améliorent le rendement énergétique ; dans les systèmes de moteurs de véhicules hybrides, les masselottes amagnétiques évitent les interférences électromagnétiques et améliorent la précision de commande. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la conductivité thermique par l'optimisation du rapport nickel-cuivre, la réduction de la masse par une conception de microstructures légères (comme les masselottes creuses) ou l'association de la fabrication additive pour réaliser des personnalisations de formes complexes. Le contrôle qualité vérifie les performances des masselottes par des mesures de densité, des tests de vibration et des tests de force de magnétisation afin de garantir la conformité aux normes de l'industrie automobile.

7.1.2 Substrat de dissipation thermique du bloc-batterie

Le substrat de dissipation thermique du bloc-batterie est un élément clé du système de gestion de la batterie des véhicules à énergies nouvelles. Il permet de dissiper rapidement la chaleur élevée générée par la batterie pendant son fonctionnement, évitant ainsi toute surchauffe susceptible d'entraîner une dégradation des performances ou des risques pour la sécurité. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau idéal pour ce substrat de dissipation thermique grâce à sa conductivité thermique élevée et son faible coefficient de dilatation thermique. Cette conductivité thermique élevée est due à la conductivité thermique rapide du cuivre, qui peut transférer rapidement la chaleur générée par la batterie (comme les batteries lithium-ion) au système de dissipation thermique afin de maintenir la température de fonctionnement idéale de la batterie. Le faible coefficient de dilatation thermique correspond aux caractéristiques de dilatation thermique des matériaux de la batterie (comme le graphite ou les membranes en céramique), réduit les déformations ou les fissures dues aux contraintes thermiques et assure la stabilité structurelle du bloc-batterie. Son amagnétisme évite les interférences électromagnétiques et convient à une utilisation à proximité de l'unité de contrôle électronique (ECU) du système de gestion de la batterie.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des substrats de dissipation thermique par métallurgie des poudres ou technologie MIM afin de répondre aux exigences

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des batteries en matière de structures à parois minces et de haute précision. Le frittage en phase liquide forme une microstructure dense, avec des phases de liaison nickel-cuivre uniformément réparties, améliorant ainsi la conductivité thermique et les propriétés mécaniques. Le pressage isostatique à chaud élimine la porosité résiduelle, améliore la densité et la durabilité du substrat et convient aux applications de batteries haute puissance. L'usinage de précision (comme le micro-fraisage ou le traitement laser) réalise des canaux de dissipation thermique complexes ou des structures de plaques minces pour assurer un contact étroit avec le module de batterie. Le traitement de surface (comme le revêtement PVD TiN ou la passivation chimique) améliore la résistance à la corrosion et à l'oxydation, et prolonge la durée de vie du substrat dans les environnements humides ou à haute température. Le traitement doit être effectué en salle blanche afin d'éviter que la pollution par la poussière n'affecte l'efficacité de la conduction thermique.

Dans les véhicules à énergies nouvelles, les substrats de dissipation thermique en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les performances des batteries. Par exemple, dans les véhicules électriques hautes performances, la dissipation thermique rapide du substrat réduit l'échauffement de la batterie, prolongeant ainsi sa durée de vie et son efficacité de charge ; dans les bus électriques commerciaux, le faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité structurelle de la batterie pendant les cycles thermiques. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de l'efficacité de la dissipation thermique grâce à la conception de microcanaux, l'utilisation de revêtements composites pour réduire la résistance thermique, ou encore l'association de la technologie d'impression 3D pour personnaliser des structures de dissipation thermique complexes. Le contrôle qualité vérifie les performances du substrat par des tests de conductivité thermique, la mesure du coefficient de dilatation thermique et des tests au brouillard salin afin de garantir la conformité aux normes de l'industrie automobile.

7.2 Solutions de refroidissement industriel

Les solutions de dissipation thermique industrielles constituent la technologie clé pour le fonctionnement stable des équipements industriels modernes. Elles impliquent une gestion efficace de la chaleur générée par les composants ou systèmes électroniques de forte puissance en fonctionnement, afin d'éviter toute surchauffe susceptible d'entraîner une dégradation des performances ou une panne de l'équipement. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau idéal pour les composants de dissipation thermique industriels grâce à sa conductivité thermique élevée, son faible coefficient de dilatation thermique et ses propriétés amagnétiques. Il permet une dissipation thermique rapide, une stabilité dimensionnelle et une protection contre les interférences électromagnétiques. Sa densité élevée et ses excellentes propriétés mécaniques le rendent adapté à une utilisation durable dans des environnements difficiles, tels que les serveurs de centres de données, les équipements d'automatisation industrielle et les modules semi-conducteurs de puissance. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est préparé par frittage en phase liquide, pressage isostatique à chaud et usinage de précision pour former une microstructure dense, répondant aux exigences de dissipation thermique industrielle en termes de précision et de durabilité, et contribuant au fonctionnement stable des équipements industriels hautes performances.

7.2.1 Base de refroidissement du serveur

Le dissipateur thermique est un composant essentiel du serveur de centre de données. Il permet de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dissiper rapidement la chaleur générée par le processeur, le processeur graphique ou le module mémoire pendant le fonctionnement, garantissant ainsi la stabilité et la fiabilité du serveur sous forte charge. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est le matériau privilégié pour le dissipateur thermique du serveur en raison de sa conductivité thermique élevée et de son faible coefficient de dilatation thermique. Cette conductivité thermique élevée est due à la conductivité thermique rapide du cuivre, qui permet de transférer rapidement la chaleur générée par le processeur vers le radiateur ou le système de refroidissement liquide, de réduire la température de la puce et de prolonger la durée de vie de l'équipement. Le faible coefficient de dilatation thermique correspond aux caractéristiques de dilatation thermique des puces à base de silicium ou des substrats céramiques, réduit les déformations et les fissures dues aux contraintes thermiques et assure la stabilité du contact à long terme entre la base et la puce. Son amagnétisme évite les interférences électromagnétiques et est adapté à l'environnement électromagnétique à haute densité des centres de données.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est transformé en dissipateur thermique par métallurgie des poudres, généralement par pressage isostatique à froid ou moulage par injection de métal (MIM), afin de former une billette de haute précision. Le frittage en phase liquide permet à la phase liquide nickel-cuivre de mouiller les particules de tungstène, formant ainsi une microstructure dense, améliorant ainsi la conductivité thermique et les propriétés mécaniques. Le pressage isostatique à chaud élimine les micropores, améliore la densité et la durabilité de la base et convient aux applications de serveurs à forte charge. L'usinage de précision (fraisage CNC ou usinage laser) permet de réaliser des canaux de dissipation thermique complexes ou des structures de plaques minces pour assurer un contact étroit avec la puce. Le traitement de surface (polissage électrochimique ou revêtement PVD TiN) améliore l'état de surface et la résistance à la corrosion, réduit la résistance thermique et renforce la résistance à l'oxydation. Le traitement doit être effectué en salle blanche afin d'éviter toute contamination par la poussière qui pourrait affecter l'efficacité de la conduction thermique.

Dans les applications serveur, le dissipateur thermique en tungstène-nickel-cuivre améliore considérablement les performances des centres de données. Par exemple, dans les serveurs de calcul haute performance (HPC), la dissipation thermique rapide de la base réduit l'échauffement de la puce et permet un fonctionnement continu à forte charge ; dans les serveurs de cloud computing, le faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité structurelle sous les cycles thermiques et réduit les coûts de maintenance. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de l'efficacité de la dissipation thermique grâce à la conception de microcanaux, l'utilisation de nano-revêtements (comme le graphène) pour réduire la résistance thermique, ou l'association de la technologie d'impression 3D pour personnaliser des structures de dissipation thermique complexes. Le contrôle qualité vérifie les performances de la base par des tests de conductivité thermique (méthode flash laser), la mesure du coefficient de dilatation thermique et des tests de durabilité afin de garantir la conformité aux normes des centres de données (comme l'ASHRAE).

7.2.2 Substrat de conditionnement de semi-conducteurs de puissance

Les substrats de boîtiers de semi-conducteurs de puissance sont des composants essentiels des dispositifs électroniques de haute puissance. Ils servent de support à la puce et dispersent rapidement la chaleur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

élevée générée pendant le fonctionnement, garantissant ainsi les performances et la fiabilité du dispositif dans les environnements à haute tension et à fort courant. Les alliages tungstène-nickel-cuivre sont des matériaux idéaux pour les substrats de boîtiers de semi-conducteurs de puissance grâce à leur conductivité thermique élevée, leur faible coefficient de dilatation thermique et leurs propriétés amagnétiques. Une conductivité thermique élevée permet de transférer rapidement la chaleur des puces semi-conductrices vers le système de dissipation thermique, de réduire la température de jonction et d'améliorer l'efficacité et la durée de vie du dispositif. Le faible coefficient de dilatation thermique correspond aux caractéristiques de dilatation thermique des matériaux de la puce (tels que le silicium ou le carbure de silicium), réduisant ainsi les défaillances du boîtier dues aux contraintes thermiques et garantissant une stabilité à long terme. Leurs propriétés amagnétiques évitent les interférences électromagnétiques et conviennent aux applications d'électronique de puissance haute fréquence.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des substrats d'encapsulation par métallurgie des poudres ou technologie MIM afin de répondre aux exigences de structures à parois minces et de haute précision. Le frittage en phase liquide forme une microstructure dense avec une répartition uniforme de la phase de liaison nickel-cuivre, améliorant ainsi la conductivité thermique et les propriétés mécaniques. Le pressage isostatique à chaud élimine la porosité résiduelle, améliore la densité et la durabilité du substrat et convient aux applications haute puissance. L'usinage de précision (tel que le micro-fraisage ou l'usinage par électro-étincelage) permet d'obtenir des surfaces planes et des dimensions précises avec des tolérances contrôlées au micron près pour garantir une liaison étroite avec la puce. Un traitement de surface (tel que le revêtement PVD CrN ou la passivation chimique) améliore la résistance à la corrosion et à l'oxydation et prolonge la durée de vie du substrat dans les environnements humides ou à haute température. La surface du substrat est généralement liée à la puce par soudage ou par adhésif thermoconducteur, et la résistance thermique de l'interface doit être minimisée.

Dans les applications de semi-conducteurs de puissance, les substrats de boîtier tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les performances des dispositifs. Par exemple, dans les onduleurs industriels, la dissipation thermique rapide du substrat améliore la densité de puissance et la fiabilité du module IGBT ; dans les onduleurs éoliens, le faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité du boîtier sous les cycles thermiques. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la conductivité thermique par l'optimisation du rapport nickel-cuivre, l'utilisation d'une structure composite multicouche pour améliorer l'efficacité de la diffusion thermique, ou l'association de la fabrication additive pour personnaliser des chemins de dissipation thermique complexes. Le contrôle qualité vérifie les performances du substrat par des tests de conductivité thermique, des mesures du coefficient de dilatation thermique et des tests de vieillissement à haute température afin de garantir la conformité aux normes industrielles (telles que la norme CEI 60747).



CTIA GROUP LTD Alliage de tungstène nickel cuivre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 8 Application de l'alliage tungstène-nickel-cuivre dans l'industrie de la défense nationale

L'alliage tungstène-nickel-cuivre a démontré une excellente valeur d'application dans le domaine de la défense nationale et de l'industrie militaire grâce à sa densité élevée, ses propriétés amagnétiques, son excellente conductivité thermique et son faible coefficient de dilatation thermique, notamment dans les équipements de contre-mesures électroniques, les systèmes d'armes et les équipements de protection. Préparé par métallurgie des poudres, cet alliage allie la densité élevée du tungstène à la ténacité et à la conductivité thermique de la phase de liaison nickel-cuivre, ce qui lui permet de répondre aux exigences strictes des équipements militaires en matière de contrôle du poids, de compatibilité électromagnétique et de résistance aux environnements extrêmes. Face à la demande croissante de haute précision, de fiabilité et de dissimulation dans les guerres modernes, l'utilisation de l'alliage tungstène-nickel-cuivre dans les équipements de contre-mesures électroniques prend une importance croissante, notamment dans les composants de poids de brouilleurs et de leurres radars.

8.1 Équipement de contre-mesures électroniques

Les équipements de contre-mesures électroniques constituent une technologie essentielle de la défense nationale et de l'industrie militaire modernes. Ils servent à perturber ou à tromper les radars, les systèmes de communication et les équipements de navigation ennemis afin de protéger ses propres troupes et équipements. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau idéal pour les composants clés des équipements de contre-mesures électroniques grâce à sa densité élevée, ses propriétés amagnétiques, sa conductivité thermique élevée et son faible coefficient de dilatation thermique. Cette densité élevée lui permet d'offrir une masse suffisante dans un volume limité et d'optimiser la répartition du poids et l'équilibre dynamique de l'équipement. Son amagnétisme évite les interférences électromagnétiques et assure la stabilité de fonctionnement dans les environnements électromagnétiques haute fréquence. Sa conductivité thermique élevée et son faible coefficient de dilatation thermique favorisent la gestion thermique et la stabilité dimensionnelle, ce qui le rend adapté aux scénarios militaires à haute résistance et à déploiement rapide. L'alliage est préparé par frittage en phase liquide, pressage isostatique à chaud et usinage de précision pour former une microstructure dense répondant aux exigences des équipements de contre-mesures électroniques en matière de précision et de durabilité.

8.1.1 Contre-mesures et composantes pondérales

Le contrepoids du brouilleur est un composant essentiel des équipements de contre-mesures électroniques. Il permet d'ajuster le centre de gravité du brouilleur (comme les leurres coaxiaux ou infrarouges) afin d'assurer sa stabilité dynamique et la précision de sa trajectoire lors du lancement et du vol à grande vitesse. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est le matériau privilégié pour le contrepoids du brouilleur en raison de sa densité élevée et de ses propriétés amagnétiques. Cette densité élevée permet à l'alliage de fournir une masse suffisante dans un volume réduit, de contrôler précisément le centre de gravité du brouilleur, d'optimiser ses performances aérodynamiques, d'allonger la distance de vol et d'améliorer la précision de largage. L'amagnétisme évite les interférences du champ magnétique sur les composants électroniques internes du brouilleur (tels que l'autodirecteur ou le circuit de commande),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

garantissant ainsi un fonctionnement optimal dans un environnement électromagnétique complexe. Le faible coefficient de dilatation thermique de l'alliage assure la stabilité dimensionnelle du contre-poids sous la chaleur de frottement de l'air ou les différences de température ambiante générées par le vol à grande vitesse.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des composants de contre-poids par moulage par injection de métal (MIM) ou métallurgie des poudres afin de répondre aux exigences de miniaturisation et de formes complexes des brouilleurs. La technologie MIM forme une structure haute densité en mélangeant des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre avec un liant, puis en procédant à un dégraissage et à un frittage en phase liquide après moulage par injection. La phase liquide nickel-cuivre mouille les particules de tungstène pour améliorer les propriétés mécaniques et la conductivité thermique. Le pressage isostatique à chaud élimine les micropores, améliore la densité et la résistance du contre-poids et convient aux applications soumises à des charges dynamiques élevées. L'usinage de précision (fraisage CNC ou électroérosion) permet d'obtenir des tolérances de l'ordre du micron pour garantir une adaptation précise du contre-poids à la structure du brouilleur. Le traitement de surface améliore la résistance à la corrosion et à l'oxydation, prolongeant ainsi la durée de vie des composants dans des environnements humides ou à haute température.

Dans les applications de contre-mesures électroniques, les assemblages de contre-poids tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les performances des brouilleurs. Par exemple, dans les brouilleurs de paillettes embarqués, les contre-poids haute densité optimisent la trajectoire du missile pour assurer une couverture précise de la portée de détection radar ennemie ; dans les bombes leurres infrarouges, les contre-poids amagnétiques évitent les interférences avec le système de guidage électronique et améliorent l'effet d'induction. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la conductivité thermique par l'optimisation du rapport nickel-cuivre, la réduction de la masse par la conception de microstructures (comme les contre-poids creux) ou la personnalisation de formes complexes en combinaison avec la technologie de fabrication additive. Le contrôle qualité vérifie les performances du contre-poids par des mesures de densité, des tests de vibration et des tests de force de magnétisation afin de garantir sa conformité aux normes militaires.

8.1.2 Composants du leurre radar

Les composants de leurres radar sont un élément important des équipements de contre-mesures électroniques. Ils servent à simuler les signaux des cibles ou à interférer avec les radars ennemis, protégeant ainsi les avions, les navires ou les équipements terrestres de toute détection et attaque. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau idéal pour les composants de leurres radar grâce à sa densité élevée, son amagnétisme et sa conductivité thermique élevée. Cette densité élevée lui permet d'offrir une masse suffisante dans un volume réduit pour simuler la section efficace radar (SCR) d'une cible réelle et renforcer l'effet de déception du leurre. L'amagnétisme évite les interférences du champ magnétique sur les composants électroniques internes du leurre (tels que les antennes ou les générateurs de signaux), garantissant un fonctionnement stable dans les environnements électromagnétiques haute fréquence. Sa conductivité thermique élevée disperse rapidement la chaleur générée par le leurre lorsqu'il vole à grande vitesse ou fonctionne à haute puissance, évitant ainsi toute surchauffe et panne ; son faible

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

coefficient de dilatation thermique assure la stabilité dimensionnelle des composants sous des écarts de température extrêmes.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des composants de leurres radar par procédé MIM ou métallurgie des poudres afin de répondre aux exigences de formes complexes et de haute précision. La technologie MIM forme de minuscules billettes par moulage par injection, tandis que le frittage en phase liquide et le pressage isostatique à chaud améliorent la densité, éliminent les micropores et améliorent la conductivité thermique et les propriétés mécaniques. L'usinage de précision (tel que le micro-usinage laser ou l'usinage par électro-étincelage) permet d'obtenir des formes géométriques complexes avec des tolérances contrôlées au micron près, ce qui est adapté à la conception miniaturisée des leurres radar. Le traitement de surface (tel que le revêtement PVD TiN ou le polissage électrochimique) améliore la résistance à la corrosion et l'état de surface, réduit la diffusion du signal et renforce la résistance à l'oxydation. Le traitement doit être effectué en salle blanche afin d'éviter que la pollution par la poussière n'affecte les performances des composants.

Dans les applications de leurres radar, les composants tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement l'efficacité des contre-mesures. Par exemple, dans les leurres de drones, les composants haute densité simulent la SER d'avions réels et trompent les radars ennemis ; dans les systèmes de leurres embarqués, les propriétés amagnétiques et la conductivité thermique élevée garantissent la stabilité et la fiabilité des leurres en fonctionnement à haute puissance. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la conductivité par l'ajustement du rapport nickel-cuivre, l'utilisation de structures composites multicouches pour renforcer le blindage électromagnétique, ou la combinaison de la technologie d'impression 3D pour fabriquer des structures de leurres complexes. Le contrôle qualité vérifie les performances des composants par des tests de blindage électromagnétique, de conductivité thermique et de vieillissement à haute température afin de garantir la conformité aux normes militaires.

8.2 Système de munitions

Composant essentiel de l'industrie de la défense, il requiert des matériaux à haute densité pour optimiser la répartition du poids, de bonnes propriétés mécaniques pour résister aux impacts à grande vitesse et des propriétés amagnétiques pour éviter les interférences électromagnétiques. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau idéal pour les composants de contrepoids et d'équilibrage des systèmes de munitions grâce à sa densité élevée, ses propriétés amagnétiques, sa résistance élevée et son faible coefficient de dilatation thermique. Sa densité élevée lui permet d'offrir une masse suffisante dans un volume limité pour optimiser la stabilité en vol et la pénétration des munitions ; ses propriétés amagnétiques garantissent l'absence d'interférence avec le système de guidage électronique des munitions ; sa résistance et sa ténacité élevées permettent aux composants de supporter des charges mécaniques extrêmes pendant le lancement et le vol ; son faible coefficient de dilatation thermique assure une stabilité dimensionnelle dans des environnements à haute température ou à différences de température. L'alliage est préparé par frittage en phase liquide, pressage isostatique à chaud et usinage de précision pour former une microstructure dense répondant aux exigences de précision et de durabilité des systèmes de munitions.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2.1 Contrepoids de l'ogive du projectile

Le contrepoids d'une ogive est un élément clé de la conception d'un projectile. Il permet d'ajuster le centre de gravité du projectile et d'assurer sa stabilité dynamique et sa précision de pénétration lors du lancement et du vol à grande vitesse. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est le matériau privilégié pour le contrepoids d'une ogive en raison de sa densité élevée et de ses propriétés amagnétiques. Cette densité élevée permet à l'alliage de fournir une masse suffisante dans un volume limité, de contrôler précisément le centre de gravité du projectile, d'optimiser les performances aérodynamiques, de réduire la déflexion en vol et d'améliorer la précision des impacts. Cette propriété amagnétique évite les interférences du champ magnétique sur les composants électroniques du projectile (tels que le système de guidage ou la fusée), garantissant ainsi un fonctionnement fiable dans un environnement électromagnétique complexe. La résistance et la ténacité élevées de l'alliage lui permettent de supporter l'énorme force d'impact lors du lancement du projectile et les vibrations lors du vol à grande vitesse. Son faible coefficient de dilatation thermique assure une stabilité dimensionnelle à des températures de lancement élevées ou à des variations de température ambiante.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des contrepoids par métallurgie des poudres ou moulage par injection de métal (MIM) afin de répondre aux exigences de formes complexes et de haute précision des obus d'artillerie. La technologie MIM forme une structure haute densité en mélangeant des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre avec un liant, puis en procédant à un dégraissage et à un frittage en phase liquide après moulage par injection. La phase liquide nickel-cuivre mouille les particules de tungstène pour améliorer les propriétés mécaniques et la conductivité thermique. Le pressage isostatique à chaud élimine les micropores, améliore la densité et la résistance aux chocs du contrepoids et convient aux obus d'artillerie hautes performances. L'usinage de précision (tel que le tournage CNC ou l'électroérosion) permet d'obtenir des tolérances de l'ordre du micron pour garantir l'adéquation parfaite du contrepoids à la structure de l'ogive. Le traitement de surface améliore la résistance à la corrosion et à l'oxydation, et prolonge la durée de vie du contrepoids dans les environnements humides ou à haute température.

Dans les applications d'obus d'artillerie, les contrepoids tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les performances des munitions. Par exemple, dans les obus de char, les contrepoids haute densité optimisent la stabilité en vol de l'ogive et renforcent les capacités de perforation du blindage ; dans les munitions de canons navals, les contrepoids amagnétiques évitent les interférences des détonateurs électroniques et améliorent la précision des tirs. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la robustesse par l'optimisation du rapport nickel-cuivre, l'optimisation de la répartition du centre de gravité par la conception de microstructures (comme les contrepoids à gradient de densité) ou la personnalisation de formes complexes en combinaison avec la technologie de fabrication additive. Le contrôle qualité vérifie les performances des contrepoids par des mesures de densité, des essais d'impact et des tests de force de magnétisation afin de garantir leur conformité aux normes militaires.

8.2.2 Composants d'équilibrage de l'ogive du missile

Le composant d'équilibrage de l'ogive est un élément clé du système de missile. Il permet d'ajuster la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

répartition du centre de gravité de l'ogive afin d'assurer la stabilité et la précision du guidage du missile en vol et en manœuvre à grande vitesse. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau idéal pour les composants d'équilibrage de l'ogive en raison de sa densité élevée, de son amagnétisme et de sa résistance élevée. Cette densité élevée permet à l'alliage de fournir une masse suffisante dans un volume réduit, de contrôler avec précision le centre de gravité de l'ogive et d'optimiser la trajectoire et la stabilité d'attitude du missile, notamment en vol supersonique ou à haute vitesse. Son amagnétisme évite les interférences du champ magnétique sur le système électronique de l'ogive (tel qu'un autodirecteur radar ou un système de navigation inertielle), garantissant ainsi un guidage de haute précision. La résistance et la ténacité élevées de l'alliage lui permettent de résister aux impacts du lancement et aux charges mécaniques extrêmes en vol. Son faible coefficient de dilatation thermique assure une stabilité dimensionnelle sous frottement à haute température ou à température ambiante.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est transformé en composants équilibrés par procédé MIM ou métallurgie des poudres afin de répondre aux exigences de miniaturisation et de formes complexes des ogives de missiles. La technologie MIM permet de former de minuscules billettes par moulage par injection, tandis que le frittage en phase liquide et le pressage isostatique à chaud améliorent la densité, éliminent les micropores et optimisent les propriétés mécaniques et la conductivité thermique. L'usinage de précision (tel que le micro-usinage laser ou l'usinage par électro-étincelage) permet d'obtenir des formes géométriques complexes avec des tolérances contrôlées au micron, ce qui est adapté à la conception compacte des ogives. Les traitements de surface (tels que le revêtement PVD CrN ou le polissage électrochimique) améliorent la résistance à la corrosion et l'état de surface, réduisent l'impact de la chaleur de frottement de l'air et renforcent la résistance à l'oxydation. Le traitement doit être effectué dans un environnement hautement propre afin d'éviter que la pollution par la poussière n'affecte les performances des composants.

Dans les applications de missiles, les composants d'équilibrage en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les performances des ogives. Par exemple, dans les missiles antinavires, les composants d'équilibrage haute densité optimisent la répartition du centre de gravité de l'ogive et améliorent la stabilité en vol à grande vitesse ; dans les missiles à guidage de précision, les propriétés amagnétiques et la résistance élevée garantissent la fiabilité et la résistance aux chocs du système de guidage. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la conductivité thermique par l'ajustement du rapport nickel-cuivre, l'utilisation de structures composites multicouches pour améliorer les propriétés mécaniques, ou la combinaison de la technologie d'impression 3D pour fabriquer des structures d'équilibrage complexes. Le contrôle qualité vérifie les performances des composants par des mesures de densité, des tests de vibrations et des tests de blindage électromagnétique afin de garantir la conformité aux normes militaires.

8.3 Équipement de protection blindé

Les équipements de protection blindés sont un élément essentiel de l'industrie militaire de défense nationale. Ils servent à protéger le personnel, les véhicules et les installations contre les projectiles, les fragments d'explosion et autres menaces. Ils nécessitent des matériaux à haute densité, haute résistance, robustesse et amagnétisme pour atteindre un équilibre entre légèreté et hautes performances de protection.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'alliage tungstène-nickel-cuivre offre une forte résistance aux chocs grâce à sa densité élevée et à ses excellentes propriétés mécaniques. Ses propriétés amagnétiques évitent les interférences électromagnétiques et conviennent aux systèmes de blindage modernes intégrant des équipements électroniques. Son faible coefficient de dilatation thermique assure une stabilité dimensionnelle à des températures extrêmes.

8.3.1 Renforts de plaques de blindage légers

Les renforts de plaques de blindage légers sont des composants essentiels des équipements de protection. Ils permettent d'améliorer les performances antibalistiques des plaques de blindage tout en réduisant leur poids au maximum. Ils conviennent aux équipements de protection portables (tels que les gilets pare-balles) ou aux véhicules blindés légers. Les alliages tungstène-nickel-cuivre sont les matériaux privilégiés pour les renforts de plaques de blindage légers en raison de leur densité élevée, de leur résistance et de leur ténacité élevées. Cette densité élevée permet à l'alliage de fournir une masse suffisante dans un volume limité, d'améliorer la résistance aux chocs de la plaque de blindage et d'absorber et de disperser efficacement l'énergie cinétique des projectiles ou des fragments d'explosion. La ténacité de la phase de liaison nickel-cuivre rend l'alliage moins sujet à la rupture fragile sous un impact à grande vitesse et peut absorber l'énergie par déformation plastique pour améliorer les performances de protection. Sa propriété amagnétique évite les interférences des champs magnétiques sur les équipements électroniques intégrés aux plaques de blindage, ce qui est adapté à l'environnement électromagnétique complexe des champs de bataille modernes. Le faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité dimensionnelle du renfort en cas d'explosion à haute température ou de variations de température ambiante.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des renforts par métallurgie des poudres ou moulage par injection de métal (MIM) afin de répondre aux exigences des plaques de blindage légères aux formes complexes et à la légèreté. La technologie MIM forme une structure haute densité en mélangeant des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre avec un liant, puis en procédant à un dégraissage et à un frittage en phase liquide après le moulage par injection. La phase liquide nickel-cuivre mouille les particules de tungstène pour améliorer la ténacité et les propriétés mécaniques. Le pressage isostatique à chaud élimine les micropores, améliore la densité et la résistance aux chocs du renfort et convient aux applications soumises à des charges dynamiques élevées. L'usinage de précision (fraisage CNC ou électroérosion) permet d'obtenir des formes géométriques et des tolérances dimensionnelles précises pour garantir une intégration parfaite des renforts aux plaques de blindage. Les traitements de surface (revêtement PVD TiN ou passivation chimique) améliorent la résistance à la corrosion et à l'usure, prolongeant ainsi la durée de vie des renforts dans les environnements difficiles.

Dans les applications de blindage, les renforts en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les performances de protection des plaques de blindage légères. Par exemple, dans les gilets pare-balles, les renforts améliorent la résistance aux projectiles perforants tout en conservant leur légèreté et en améliorant la mobilité des soldats ; dans les véhicules blindés légers, les renforts haute densité optimisent la résistance aux chocs des plaques de blindage. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la ténacité par l'optimisation du rapport nickel-cuivre, l'utilisation de structures composites (par exemple

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en combinaison avec de la céramique) pour améliorer l'efficacité de la protection, ou l'association de la fabrication additive pour personnaliser des renforts complexes. Le contrôle qualité vérifie la performance des renforts par des mesures de densité, des essais d'impact et des tests de blindage électromagnétique afin de garantir leur conformité aux normes militaires.

8.3.2 Revêtement de protection du véhicule blindé

Le revêtement de protection des véhicules blindés est un élément essentiel de leur protection. Il sert à absorber et à disperser l'énergie des ondes de choc, des projectiles ou des fragments d'explosion, et à protéger les occupants et les équipements essentiels. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est devenu le matériau privilégié pour les revêtements de protection des véhicules blindés grâce à sa haute densité, sa résistance élevée et ses propriétés amagnétiques. Cette haute densité permet à l'alliage d'absorber efficacement l'énergie d'impact, de réduire la pénétration des explosions ou des projectiles et d'améliorer les capacités de protection du véhicule. La ténacité de la phase de liaison nickel-cuivre permet au revêtement d'absorber l'énergie par déformation plastique lors d'un impact à grande vitesse, d'éviter les ruptures fragiles et d'améliorer sa résistance aux impacts multiples. Ses propriétés amagnétiques garantissent que le revêtement n'interfère pas avec les systèmes électroniques du véhicule (tels que les équipements de navigation ou de communication), ce qui est adapté aux véhicules blindés intelligents modernes. Le faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité dimensionnelle du revêtement en cas d'explosion à haute température ou de variations de température ambiante, et préserve l'intégrité de la structure de protection.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des revêtements de protection par métallurgie des poudres ou technologie MIM afin de répondre aux exigences des véhicules blindés en matière de formes complexes et de légèreté. Le frittage en phase liquide forme une microstructure dense, et la phase liquide nickel-cuivre mouille les particules de tungstène, améliorant ainsi les propriétés mécaniques et la conductivité thermique. Le pressage isostatique à chaud élimine les micropores, améliore la densité et la résistance aux chocs du revêtement et convient aux applications de protection haute intensité. L'usinage de précision (comme la rectification CNC ou le traitement laser) permet d'obtenir des formes géométriques complexes, et la tolérance est contrôlée au micron près pour garantir l'ajustement précis du revêtement à la structure du véhicule. Les traitements de surface (comme le revêtement PVD CrN ou la passivation chimique) améliorent la résistance à la corrosion et à l'oxydation, et prolongent la durée de vie du revêtement dans les environnements humides ou à haute température. Le traitement doit être effectué dans un environnement très propre afin d'éviter que la pollution par la poussière n'affecte les performances. Dans les véhicules blindés, les revêtements de protection en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les performances de protection. Par exemple, dans les chars de combat principaux, les revêtements haute densité absorbent efficacement l'énergie d'impact des explosions et protègent les occupants ; dans les véhicules blindés de transport de troupes, les revêtements amagnétiques assurent le fonctionnement stable des équipements électroniques. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de l'efficacité d'absorption d'énergie grâce à la conception de microstructures (comme les revêtements à gradient de densité), l'utilisation de revêtements composites pour améliorer la résistance à l'usure, ou encore l'association de l'impression 3D pour la fabrication de structures de revêtement sur mesure. Le contrôle

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

qualité vérifie les performances des revêtements par des mesures de densité, des essais d'impact et des tests de vieillissement à haute température afin de garantir leur conformité aux normes militaires.

8.4 Armes spatiales

Les armes spatiales comprennent des systèmes tels que les fusées, les missiles et les engins spatiaux. Ces systèmes nécessitent des matériaux à haute densité pour optimiser la répartition du poids, une excellente conductivité thermique et une résistance aux températures élevées pour supporter les environnements thermiques extrêmes, des propriétés amagnétiques pour éviter les interférences électromagnétiques et un faible coefficient de dilatation thermique pour garantir la stabilité dimensionnelle. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est devenu un matériau idéal pour les composants clés des armes aérospatiales grâce à ses propriétés physiques et chimiques uniques. Sa haute densité lui permet de fournir une masse suffisante dans un volume limité, optimisant ainsi la répartition du centre de gravité et l'équilibre dynamique du système ; sa conductivité thermique élevée et sa résistance aux températures élevées favorisent les performances des composants dans des environnements à flux thermique élevé ; ses propriétés amagnétiques évitent les interférences avec les systèmes électroniques de précision ; et son faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité géométrique à des températures extrêmes. L'alliage est préparé par frittage en phase liquide, pressage isostatique à chaud et usinage de précision pour former une microstructure dense répondant aux exigences des armes aérospatiales en matière de précision et de durabilité.

8.4.1 Composants de la tuyère du moteur-fusée

Les composants des tuyères de moteurs-fusées sont des composants essentiels des armes aérospatiales. Ils servent à guider et accélérer les gaz à haute température et haute pression afin d'assurer une poussée efficace. Ils doivent résister à des températures extrêmement élevées, aux chocs thermiques et aux contraintes mécaniques. Les alliages tungstène-nickel-cuivre sont les matériaux privilégiés pour les composants des tuyères en raison de leur conductivité thermique élevée, de leur résistance aux hautes températures et de leur faible coefficient de dilatation thermique. Cette conductivité thermique élevée est due à la conductivité thermique rapide du cuivre, qui permet de dissiper rapidement la chaleur de la tuyère à haute température dans la chambre de combustion, évitant ainsi toute surchauffe locale et toute défaillance matérielle. Le faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité géométrique de la tuyère malgré de fortes variations de température, maintient un guidage précis du flux de gaz et améliore l'efficacité de la poussée. La densité et la ténacité élevées de l'alliage lui permettent de résister au frottement et aux vibrations du flux de gaz à grande vitesse, et la plasticité de la phase de liaison nickel-cuivre absorbe l'énergie des chocs thermiques pour éviter les ruptures fragiles. Les propriétés non magnétiques garantissent qu'il n'y a aucune interférence avec les composants électroniques du système de navigation ou de contrôle de la fusée.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des composants de tuyère par métallurgie des poudres ou moulage par injection de métal (MIM) afin de répondre aux exigences de formes complexes et de haute précision. Le frittage en phase liquide forme une microstructure dense, et la phase liquide nickel-cuivre mouille les particules de tungstène, améliorant

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ainsi la conductivité thermique et les propriétés mécaniques. Le pressage isostatique à chaud élimine les micropores, améliore la densité et la résistance aux hautes températures des composants, et convient aux environnements à flux thermique élevé. L'usinage de précision (comme la rectification CNC ou l'usinage par électro-étincelage) permet d'obtenir des formes géométriques complexes avec des tolérances contrôlées au micron près afin de garantir les performances aérodynamiques de la tuyère. Les traitements de surface (comme le revêtement PVD CrN ou la passivation chimique) améliorent la résistance à l'oxydation et à l'érosion à haute température, et prolongent la durée de vie des composants dans des environnements extrêmes. Le traitement doit être effectué dans un environnement hautement propre afin d'éviter que la pollution par la poussière n'affecte les performances. Dans les applications d'armes aérospatiales, les composants de tuyère en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les performances des moteurs-fusées. Par exemple, dans les moteurs-fusées à propergol solide, les composants de tuyère à haute conductivité thermique gèrent efficacement le flux de gaz à haute température et prolongent la durée de vie ; dans les moteurs-fusées à propergol liquide, les faibles coefficients de dilatation thermique assurent la stabilité géométrique de la tuyère pendant les cycles thermiques. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la conductivité thermique par l'optimisation du rapport nickel-cuivre, l'utilisation de revêtements composites pour améliorer la résistance aux hautes températures, ou la combinaison de la technologie d'impression 3D pour fabriquer des structures de tuyère complexes. Le contrôle qualité vérifie les performances des composants par des tests de conductivité thermique, des tests de choc thermique et des tests de vieillissement à haute température afin de garantir la conformité aux normes aérospatiales.

8.4.2 Contrepoids de contrôle d'attitude du vaisseau spatial

Les contrepoids de contrôle d'attitude des engins spatiaux sont des composants essentiels des armes spatiales et des systèmes de satellites. Ils permettent d'ajuster la répartition du centre de gravité de l'engin spatial afin d'assurer sa stabilité d'attitude et un contrôle précis lors des opérations orbitales ou des manœuvres. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau idéal pour les contrepoids de contrôle d'attitude grâce à sa densité élevée, ses propriétés amagnétiques et son faible coefficient de dilatation thermique. Cette densité élevée permet à l'alliage de fournir une masse suffisante dans un volume réduit, de contrôler précisément le centre de gravité de l'engin spatial, d'optimiser l'efficacité du réglage d'attitude et de réduire la consommation de propergol. Cette propriété amagnétique évite l'interférence des champs magnétiques sur le système de navigation de l'engin spatial (tel que les capteurs stellaires ou les gyroscopes), garantissant ainsi un contrôle d'attitude de haute précision. Le faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité dimensionnelle du contrepoids face aux variations extrêmes de température de l'environnement spatial et préserve l'équilibre dynamique de l'engin spatial.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des contrepoids par procédé MIM ou métallurgie des poudres, afin de répondre aux exigences de miniaturisation et de formes complexes des engins spatiaux. La technologie MIM permet de former de minuscules billettes par moulage par injection, tandis que le frittage en phase liquide et le pressage isostatique à chaud améliorent la densité, éliminent les micropores et optimisent les propriétés mécaniques et la conductivité thermique. L'usinage de précision (tel que le micro-usinage laser ou l'usinage par électro-étincelage) permet d'obtenir des formes géométriques complexes avec des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tolérances contrôlées au micron près, ce qui est adapté à la conception compacte des engins spatiaux. Le traitement de surface améliore la résistance à la corrosion et l'état de surface, et réduit la contamination particulaire ou les effets des radiations dans l'environnement spatial. Le traitement doit être effectué dans un environnement hautement propre afin d'éviter que la contamination par la poussière n'affecte les performances des composants.

Dans les applications spatiales, les contrepoids en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les performances du contrôle d'attitude. Par exemple, dans les satellites de reconnaissance militaire, les contrepoids haute densité optimisent la répartition du centre de gravité et améliorent la réactivité du réglage d'attitude ; dans les systèmes de défense antimissile, les contrepoids amagnétiques assurent la stabilité du fonctionnement des systèmes de navigation. Les axes d'optimisation incluent la réduction de la masse grâce à la conception de la microstructure, l'utilisation de revêtements résistants aux radiations pour améliorer l'adaptabilité aux environnements spatiaux, ou encore l'association de la fabrication additive pour obtenir des structures de contrepoids sur mesure. Le contrôle qualité vérifie les performances des contrepoids par des mesures de densité, des tests de vibrations et des tests de force de magnétisation afin de garantir leur conformité aux normes aérospatiales.



CTIA GROUP LTD Alliage de tungstène nickel cuivre
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 9 Application de l'alliage tungstène-nickel-cuivre dans le domaine médical

L'alliage tungstène-nickel-cuivre a démontré une excellente valeur d'application dans le domaine médical grâce à sa densité élevée, ses propriétés amagnétiques, son excellente conductivité thermique et sa bonne biocompatibilité, notamment dans les équipements de radiothérapie, d'imagerie et les instruments chirurgicaux. Préparé par métallurgie des poudres, cet alliage associe la densité élevée du tungstène à la ténacité et à la conductivité thermique de la phase de liaison nickel-cuivre. Il répond aux exigences strictes des équipements médicaux en matière de protection contre les radiations, de gestion thermique et de compatibilité électromagnétique. Avec le développement de la médecine de précision et des technologies de traitement non invasives, l'utilisation de l'alliage tungstène-nickel-cuivre dans les équipements de radiothérapie prend une importance croissante.

9.1 Équipement de radiothérapie

Les équipements de radiothérapie (tels que les accélérateurs linéaires et les gamma knives) sont une technologie essentielle utilisée en médecine moderne pour le traitement du cancer. Ils contrôlent avec précision les rayons de haute énergie (tels que les rayons X ou gamma) afin de cibler les tissus tumoraux tout en protégeant les tissus sains environnants. Ce type d'équipement requiert des matériaux extrêmement exigeants : une densité élevée pour une protection efficace contre les radiations, des propriétés amagnétiques pour éviter les interférences avec les systèmes électroniques de précision, une excellente conductivité thermique pour gérer la chaleur générée pendant le fonctionnement et une bonne biocompatibilité pour garantir la sécurité. L'alliage tungstène-nickel-cuivre peut absorber et protéger efficacement les radiations et protéger les patients et le personnel médical grâce à sa densité élevée et ses propriétés amagnétiques. Sa conductivité thermique élevée et son faible coefficient de dilatation thermique favorisent la gestion thermique et la stabilité dimensionnelle de l'équipement lors d'un fonctionnement à haute puissance ; la robustesse de la phase liante nickel-cuivre améliore la durabilité des composants. L'alliage est préparé par frittage en phase liquide, pressage isostatique à chaud et usinage de précision pour former une microstructure dense répondant aux exigences des équipements médicaux en matière de précision et de fiabilité.

9.1.1 Ensemble de protection pour radiothérapie

Les composants de blindage pour radiothérapie sont essentiels aux équipements de radiothérapie. Ils servent à protéger et à limiter les rayons de haute énergie, à garantir que le rayonnement n'agit que sur la zone de traitement ciblée et à protéger les tissus sains des patients et le personnel médical d'une exposition inutile aux radiations. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau idéal pour les composants de blindage pour radiothérapie grâce à sa haute densité et à ses propriétés amagnétiques. Cette haute densité lui permet d'absorber efficacement les rayons X et gamma, de réduire considérablement les fuites de rayonnement et d'offrir d'excellents effets de blindage. Il est plus léger et plus respectueux de l'environnement que les matériaux traditionnels en plomb. Son amagnétisme évite les interférences des champs magnétiques sur les systèmes électroniques de précision des équipements de radiothérapie (tels que les systèmes de guidage par résonance magnétique), garantissant ainsi la précision du traitement. Sa conductivité thermique élevée disperse rapidement la chaleur générée pendant le fonctionnement,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

empêchant ainsi la surchauffe du blindage et les performances de l'équipement. Son faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité dimensionnelle du composant pendant les cycles thermiques et préserve la précision de la structure du blindage.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des composants de blindage par métallurgie des poudres ou moulage par injection de métal (MIM) afin de répondre aux exigences de formes complexes et de haute précision. La technologie MIM forme une structure haute densité en mélangeant des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre avec un liant, puis en procédant à un dégraissage et à un frittage en phase liquide après moulage par injection. La phase liquide nickel-cuivre mouille les particules de tungstène pour améliorer les propriétés mécaniques et la conductivité thermique. Le pressage isostatique à chaud élimine les micropores, améliore la densité et la capacité d'absorption des radiations du blindage et convient aux applications de radiothérapie à haute énergie. L'usinage de précision (comme le fraisage CNC ou l'usinage par électro-étincelage) permet d'obtenir des géométries complexes avec des tolérances contrôlées au micron près pour garantir une intégration parfaite avec les équipements de radiothérapie. Les traitements de surface (comme le polissage électrochimique ou la passivation chimique) améliorent la résistance à la corrosion et la biocompatibilité, et préviennent l'érosion dans les environnements d'oxydation ou de stérilisation lors d'une utilisation prolongée.

Dans les applications de radiothérapie, les composants de blindage en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement la sécurité et la précision du traitement. Par exemple, dans les accélérateurs linéaires, un blindage haute densité limite efficacement la diffusion des rayonnements et protège les tissus sains des patients ; dans les équipements gamma knife, un blindage non magnétique assure la compatibilité électromagnétique du système de traitement. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la conductivité thermique par l'optimisation du rapport nickel-cuivre, l'utilisation de revêtements composites (tels que le DLC) pour améliorer la résistance à la corrosion, ou encore l'association de l'impression 3D pour la fabrication de structures de blindage sur mesure. Le contrôle qualité vérifie les performances des composants par des tests de blindage contre les rayonnements, de conductivité thermique et de biocompatibilité (ISO 10993).

9.1.2 Composants du collimateur de rayonnement

Le collimateur de rayonnement est un composant essentiel des équipements de radiothérapie. Il permet de contrôler avec précision la direction et la portée du rayonnement, de garantir la focalisation du rayonnement à haute énergie sur le tissu tumoral et de minimiser les dommages aux tissus sains environnants. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est le matériau privilégié pour les collimateurs de rayonnement en raison de sa densité élevée, de son magnétisme et de sa conductivité thermique élevée. Cette densité élevée lui permet d'absorber et de protéger efficacement le rayonnement diffusé, de moduler précisément le faisceau de rayonnement et d'améliorer le ciblage du traitement. L'amagnétisme évite les interférences du champ magnétique sur le système de commande électronique (comme les servomoteurs ou les capteurs) à proximité du collimateur, garantissant ainsi la précision du réglage dynamique du faisceau de rayonnement. La conductivité thermique élevée disperse rapidement la chaleur générée par le collimateur sous l'action du rayonnement à haute énergie, évitant ainsi toute déformation due à la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

surchauffe ; le faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité dimensionnelle du composant pendant les cycles thermiques et préserve la précision de la collimation.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des composants de collimateur par procédé MIM ou métallurgie des poudres afin de répondre aux exigences de formes complexes et d'une précision de l'ordre du micron. La technologie MIM permet de former de minuscules billettes par moulage par injection, tandis que le frittage en phase liquide et le pressage isostatique à chaud améliorent la densité, éliminent les micropores et renforcent la protection contre les radiations ainsi que les propriétés mécaniques. L'usinage de précision (tel que le micro-usinage laser ou l'usinage par électro-étincelage) permet de réaliser des géométries complexes, comme la structure en feuille mince du collimateur multi-feuilles (MLC), avec des tolérances contrôlées au micron près pour garantir un contrôle précis du faisceau. Le traitement de surface (tel que le revêtement PVD TiN ou le polissage électrochimique) améliore la résistance à la corrosion et l'état de surface, réduit la diffusion du rayonnement et renforce la résistance à l'oxydation. Le traitement doit être effectué dans un environnement hautement propre afin d'éviter que la contamination par la poussière n'affecte les performances des composants.

Dans les applications de radiothérapie, les composants de collimateur en tungstène nickel cuivre améliorent considérablement la précision et la sécurité du traitement. Par exemple, en radiothérapie à modulation d'intensité (IMRT), les collimateurs haute densité façonnent avec précision le faisceau et ciblent les tumeurs complexes ; dans les équipements de protonthérapie, les collimateurs non magnétiques assurent le fonctionnement stable des systèmes de contrôle électromagnétique de haute précision. Les axes d'optimisation incluent la réduction de la masse grâce à la conception de microstructures (comme des lames de collimation poreuses), l'utilisation de nanorevêtements pour améliorer la résistance à l'usure et la biocompatibilité, ou encore l'association de la fabrication additive pour réaliser des structures de collimation complexes. Le contrôle qualité vérifie les performances des composants par des tests de protection contre les radiations, des tests de conductivité thermique et des mesures de précision géométrique afin de garantir la conformité aux normes médicales.

9.2 Équipement d'imagerie diagnostique

L'imagerie diagnostique est une technologie essentielle utilisée en médecine moderne pour le diagnostic des maladies et la planification des traitements. Elle génère des images de l'intérieur du corps humain grâce à des rayonnements ou des champs magnétiques de haute précision. Ce procédé requiert des matériaux à haute densité pour protéger contre les rayonnements, des propriétés amagnétiques pour éviter les interférences électromagnétiques, une excellente conductivité thermique pour gérer la chaleur de fonctionnement de l'équipement et une bonne biocompatibilité pour garantir la sécurité. L'alliage tungstène-nickel-cuivre offre une protection efficace contre les rayons X et assure un bon équilibre du poids grâce à sa densité élevée et ses propriétés amagnétiques. Sa conductivité thermique élevée et son faible coefficient de dilatation thermique favorisent la gestion thermique et la stabilité dimensionnelle. La robustesse de la phase liante nickel-cuivre améliore la durabilité des composants. L'alliage est préparé par frittage en phase liquide, pressage isostatique à chaud et usinage de précision pour former une microstructure dense répondant aux exigences de précision et de fiabilité des équipements d'imagerie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

diagnostique.

9.2.1 Pièces de protection du détecteur CT

Les écrans de protection pour détecteurs CT sont des composants essentiels des équipements de tomodensitométrie (CT). Ils servent à protéger les capteurs des rayons X diffusés, les modules de détection et les patients contre une exposition inutile aux rayonnements, et à garantir la clarté et la précision des signaux d'image. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est devenu le matériau privilégié pour les écrans de protection des détecteurs CT en raison de sa haute densité et de ses propriétés amagnétiques. Cette densité élevée lui permet d'absorber efficacement les rayons X et de réduire considérablement le rayonnement diffusé. Plus fin et plus respectueux de l'environnement que les matériaux traditionnels en plomb, il offre d'excellents effets de blindage. Ses propriétés amagnétiques empêchent les champs magnétiques d'interférer avec les composants électroniques de précision des appareils CT (tels que les matrices de détecteurs ou les circuits de traitement du signal), garantissant ainsi la stabilité de l'acquisition d'images. Sa conductivité thermique élevée disperse rapidement la chaleur générée par le détecteur pendant son fonctionnement, évitant ainsi toute surchauffe affectant sa sensibilité. Son faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité dimensionnelle de l'écran pendant les cycles thermiques et maintient un ajustement précis au module détecteur.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des pièces de protection par moulage par injection de métal (MIM) ou par métallurgie des poudres afin de répondre aux exigences des machines de tomographie par ordinateur (CT) en termes de formes complexes et de haute précision. La technologie MIM forme une structure haute densité en mélangeant des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre avec un liant, puis en procédant à un dégraissage et à un frittage en phase liquide après le moulage par injection. La phase liquide nickel-cuivre mouille les particules de tungstène pour améliorer les propriétés mécaniques et la conductivité thermique. Le pressage isostatique à chaud élimine les micropores, améliore la densité et la capacité d'absorption des radiations des pièces de protection et est adapté aux environnements à rayons X à haute énergie. L'usinage de précision permet d'obtenir des formes géométriques complexes avec des tolérances contrôlées au micron près, garantissant une intégration parfaite des pièces de protection aux modules de détection. Les traitements de surface (tels que le polissage électrochimique ou la passivation chimique) améliorent la résistance à la corrosion et la biocompatibilité, et préviennent l'érosion par oxydation ou désinfection des environnements lors d'une utilisation prolongée.

Dans les applications de tomodensitométrie, les pièces de protection en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement la qualité d'image et la sécurité des équipements. Par exemple, dans les scanners CT haute résolution, les pièces de protection haute densité réduisent efficacement les rayons diffusés et améliorent le contraste de l'image ; dans les équipements CT mobiles, les conceptions amagnétiques et légères favorisent la portabilité et la compatibilité électromagnétique. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la conductivité thermique par l'optimisation du rapport nickel-cuivre, l'utilisation de nano-revêtements (tels que le DLC) pour améliorer la résistance à la corrosion, ou encore l'association de la technologie d'impression 3D pour la fabrication de structures de protection sur mesure. Le contrôle qualité vérifie les performances des pièces de protection par des tests de protection

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contre les radiations (conformément à la norme CEI 60601), de conductivité thermique et de biocompatibilité (ISO 10993).

9.2.2 Contrepoids pour équipements IRM

Le contrepoids des équipements d'imagerie par résonance magnétique (IRM) est un composant essentiel du système. Il permet d'ajuster le centre de gravité de l'équipement ou l'équilibre de la structure mécanique, garantissant ainsi la stabilité et la précision de la plateforme de balayage ou de l'ensemble magnétique pendant le fonctionnement. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau idéal pour ce type de contrepoids grâce à sa haute densité, son amagnétisme et son faible coefficient de dilatation thermique. Cette densité élevée permet à l'alliage de fournir une masse suffisante dans un volume réduit, de contrôler avec précision la répartition du centre de gravité des équipements d'IRM (tels que les lits de balayage ou les bobines de gradient), de réduire les vibrations ou les décalages mécaniques et d'améliorer la clarté des images. Son amagnétisme est essentiel pour éviter toute interférence du champ magnétique avec le champ magnétique de haute intensité (1,5 T à 7 T) de l'IRM, garantissant ainsi l'uniformité du champ magnétique et la précision de l'acquisition du signal. Le faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité dimensionnelle du contrepoids face à l'augmentation de la température liée au fonctionnement de l'équipement ou aux variations de température ambiante, et préserve la fiabilité à long terme de la structure mécanique.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des contrepoids par procédé MIM ou métallurgie des poudres afin de répondre aux besoins des équipements d'IRM en termes de formes complexes et de miniaturisation. La technologie MIM permet de former de minuscules billettes par moulage par injection, tandis que le frittage en phase liquide et le pressage isostatique à chaud améliorent la densité, éliminent les micropores et optimisent les propriétés mécaniques et la conductivité thermique. L'usinage de précision (comme le fraisage CNC ou l'électroérosion) permet d'obtenir des formes géométriques complexes avec des tolérances contrôlées au micron près, ce qui est adapté à la conception compacte des équipements d'IRM. Les traitements de surface (comme le revêtement PVD TiN ou le polissage électrochimique) améliorent la résistance à la corrosion et l'état de surface, et réduisent les risques d'oxydation ou de contamination en environnement stérile. Le traitement doit être effectué dans un environnement hautement propre afin d'éviter que la contamination par la poussière n'affecte les performances des composants ou les champs magnétiques de l'IRM. Dans les applications d'IRM, les contrepoids tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les performances des équipements. Par exemple, dans les équipements d'IRM à haut champ, les contrepoids haute densité optimisent l'équilibre dynamique de la plateforme de balayage et réduisent l'impact des vibrations sur la qualité de l'image ; dans les systèmes d'IRM portables, les contrepoids non magnétiques assurent la stabilité du champ magnétique et la compatibilité électromagnétique. Les axes d'optimisation incluent la réduction de la masse grâce à la conception de microstructures (comme les contrepoids creux), l'utilisation de revêtements résistants à la corrosion pour améliorer la biocompatibilité, ou encore l'association de la fabrication additive pour obtenir des structures de contrepoids personnalisées. Le contrôle qualité vérifie les performances des contrepoids par des mesures de densité, des tests de force de magnétisation et des tests de vibrations afin de garantir leur conformité aux normes médicales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.3 Instruments chirurgicaux

Les instruments chirurgicaux sont des outils essentiels pour un diagnostic et un traitement précis en médecine moderne. Ils comprennent les systèmes de navigation chirurgicale, les instruments interventionnels mini-invasifs et les dispositifs médicaux implantables. Ils nécessitent des matériaux à haute densité pour optimiser l'équilibre du poids, des propriétés amagnétiques pour éviter les interférences électromagnétiques, d'excellentes propriétés mécaniques pour garantir la durabilité et une bonne biocompatibilité afin de répondre aux normes de sécurité pour une utilisation in vivo ou à la surface du corps. Les alliages tungstène-nickel-cuivre permettent un contrôle précis du poids et une compatibilité électromagnétique grâce à leur densité élevée et leurs propriétés amagnétiques. La ténacité et la conductivité thermique élevée de la phase de liaison nickel-cuivre améliorent la durabilité et les capacités de gestion thermique de l'instrument. Enfin, le faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité dimensionnelle à température corporelle ou en environnement stérilisé. L'alliage est préparé par frittage en phase liquide, pressage isostatique à chaud et usinage de précision pour former une microstructure dense répondant aux exigences de précision et de fiabilité des instruments chirurgicaux.

9.3.1 Composants de positionnement de navigation chirurgicale de haute précision

Les pièces de positionnement de navigation chirurgicale de haute précision sont des composants essentiels pour localiser et guider les instruments chirurgicaux dans les systèmes de navigation. Elles sont largement utilisées en neurochirurgie, en orthopédie et en chirurgie cardiovasculaire pour garantir la précision et la sécurité des trajets chirurgicaux. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est le matériau privilégié pour les pièces de positionnement de navigation chirurgicale en raison de sa densité élevée, de son amagnétisme et de son faible coefficient de dilatation thermique. Cette densité élevée permet à l'alliage d'offrir une masse suffisante dans un volume réduit, d'optimiser la répartition du centre de gravité des pièces de positionnement, d'améliorer la stabilité du système de navigation chirurgicale et, plus particulièrement, d'améliorer la précision du positionnement lors des ajustements dynamiques (comme la chirurgie robotisée). L'amagnétisme évite les interférences des champs magnétiques sur les composants électroniques du système de navigation (tels que les trackers électromagnétiques ou les capteurs optiques), garantissant ainsi la fiabilité du guidage par résonance magnétique ou de la navigation électromagnétique. Le faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité dimensionnelle des pièces de positionnement à température corporelle ou en environnement stérilisé, préservant ainsi la précision de la navigation.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des pièces de positionnement par moulage par injection de métal (MIM) ou par métallurgie des poudres. Il répond ainsi aux exigences des systèmes de navigation chirurgicale en matière de formes complexes et de précision au micron. La technologie MIM forme une structure haute densité en mélangeant des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre avec un liant, puis en les dégraissant et en les frittant en phase liquide après le moulage par injection. La phase liquide nickel-cuivre mouille les particules de tungstène pour améliorer les propriétés mécaniques et la conductivité thermique. Le pressage isostatique à chaud élimine les micropores, améliore la densité et la durabilité des pièces de positionnement et convient aux applications de haute précision. L'usinage de précision (comme le micro-usinage laser ou l'électro-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

étincelage) permet d'obtenir des géométries complexes avec des tolérances contrôlées au micron près, garantissant ainsi une intégration parfaite avec les systèmes de navigation. Le traitement de surface (tel que le polissage électrochimique ou le revêtement PVD TiN) améliore la résistance à la corrosion et la biocompatibilité, empêche l'oxydation pendant la stérilisation ou les environnements in vivo et répond aux normes de biocompatibilité ISO 10993.

Dans les applications de navigation chirurgicale, les pièces de positionnement en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement la précision et la sécurité chirurgicales. Par exemple, en navigation neurochirurgicale, les pièces de positionnement haute densité optimisent la stabilité du système de guidage et garantissent une chirurgie cérébrale avec une précision micrométrique ; en chirurgie orthopédique, les pièces de positionnement amagnétiques évitent les interférences électromagnétiques et améliorent la fiabilité du système de navigation. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration de la robustesse par l'optimisation du rapport nickel-cuivre, l'utilisation de nanorevêtements pour améliorer la résistance à l'usure et la biocompatibilité, ou encore l'association de la technologie d'impression 3D pour la fabrication de structures de positionnement sur mesure. Le contrôle qualité vérifie les performances des pièces de positionnement par des mesures de densité, des tests de force de magnétisation et des tests de rugosité de surface afin de répondre aux normes médicales.

9.3.2 Composants du guide du dispositif interventionnel mini-invasif

clés utilisés pour guider les fils-guides, les cathéters ou les stents lors des chirurgies mini-invasives (telles que les interventions cardiovasculaires ou endoscopiques). Ils requièrent une précision, une biocompatibilité et une durabilité élevées pour garantir le succès de l'intervention et la sécurité des patients. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau idéal pour les composants de guidage grâce à sa densité élevée, ses propriétés amagnétiques et ses excellentes propriétés mécaniques. Cette densité élevée permet à l'alliage de fournir une masse suffisante dans un volume réduit, d'optimiser la répartition du centre de gravité du composant de guidage et d'améliorer la maniabilité et la stabilité du fil-guide ou du cathéter, notamment pour un guidage précis dans les voies vasculaires complexes. Cette propriété amagnétique évite l'interférence des champs magnétiques sur les composants électroniques (tels que les capteurs ou les modules d'imagerie) des dispositifs interventionnels et convient aux chirurgies mini-invasives guidées par résonance magnétique. La robustesse de la phase liante nickel-cuivre permet au composant de résister à des flexions et des torsions répétées, et son faible coefficient de dilatation thermique assure une stabilité dimensionnelle à température corporelle ou en environnement stérilisé.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des composants de guidage par procédé MIM (micro-métallurgie des poudres), afin de répondre aux besoins des dispositifs mini-invasifs en matière de miniaturisation et de formes complexes. La technologie MIM permet de former de minuscules billettes par moulage par injection, tandis que le frittage en phase liquide et le pressage isostatique à chaud augmentent la densité, éliminent les micropores et améliorent les propriétés mécaniques et la conductivité thermique. L'usinage de précision (tel que le micro-usinage laser ou l'usinage par électro-étincelage) permet d'obtenir des géométries complexes, telles que des bagues de guidage pour fils-guides ou des pointes de cathéter, avec des tolérances contrôlées au micron près pour garantir une manipulation précise pendant l'intervention chirurgicale. Le traitement de surface (tel que le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

revêtement DLC ou la passivation chimique) améliore la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la biocompatibilité, réduit les frottements avec les tissus vasculaires et prévient l'oxydation ou l'érosion par désinfection lors d'une utilisation prolongée. Le traitement doit être effectué dans un environnement hautement propre afin d'éviter que la pollution par la poussière n'affecte les performances des composants.

En chirurgie mini-invasive, les composants de guidage en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement l'efficacité et la sécurité chirurgicales. Par exemple, pour l'implantation d'un stent cardiovasculaire, les composants de guidage haute densité optimisent la maniabilité du fil-guide et garantissent un positionnement précis ; en chirurgie neuro-interventionnelle, les composants de guidage non magnétiques évitent les interférences de l'environnement IRM et améliorent la fiabilité du guidage par imagerie.

Les axes d'optimisation incluent la réduction de la masse grâce à la conception de microstructures (comme des guides creux), l'utilisation de revêtements biocompatibles pour améliorer l'affinité tissulaire, ou encore la combinaison de technologies de fabrication additive pour obtenir des structures de guidage personnalisées. Le contrôle qualité vérifie les performances des composants par des tests de propriétés mécaniques, des tests de biocompatibilité (ISO 10993) et des mesures de rugosité de surface.

9.4 Appareils d'assistance à la réadaptation

Les dispositifs d'assistance à la rééducation (tels que les prothèses, les orthèses et les équipements de rééducation) sont des outils importants de la médecine moderne pour aider les patients à retrouver leurs fonctions motrices ou à améliorer leur qualité de vie. Ils nécessitent des matériaux à haute densité pour optimiser la répartition du poids, d'excellentes propriétés mécaniques pour garantir leur durabilité, des propriétés amagnétiques pour éviter les interférences électromagnétiques et une bonne biocompatibilité pour répondre aux normes de sécurité d'utilisation à long terme. L'alliage tungstène-nickel-cuivre permet un contrôle précis du poids et une compatibilité électromagnétique grâce à sa densité élevée et à ses propriétés amagnétiques. La robustesse et la conductivité thermique élevée de la phase de liaison nickel-cuivre améliorent la durabilité et la gestion thermique des composants. Enfin, le faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité dimensionnelle à température corporelle ou ambiante. L'alliage est préparé par frittage en phase liquide, pressage isostatique à chaud et usinage de précision pour former une microstructure dense répondant aux exigences de haute précision et de fiabilité des dispositifs d'assistance à la rééducation.

9.4.1 Composants du poids des articulations prothétiques

Les lests de prothèses articulaires sont des éléments clés de la conception prothétique. Ils permettent d'ajuster la répartition du centre de gravité de la prothèse, d'optimiser l'équilibre des mouvements et la démarche naturelle, et d'améliorer le confort et la fonctionnalité du patient. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est devenu le matériau privilégié pour les lests de prothèses articulaires grâce à sa haute densité, son amagnétisme et ses excellentes propriétés mécaniques. Sa haute densité permet à l'alliage de fournir une masse suffisante dans un volume réduit, de contrôler précisément le centre de gravité de la prothèse, de simuler la répartition du poids des membres naturels et de réduire la fatigue du patient lors de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'utilisation de la prothèse. L'amagnétisme évite les interférences du champ magnétique sur les composants électroniques intégrés à la prothèse, ce qui est adapté aux systèmes prothétiques intelligents. La robustesse du liant nickel-cuivre permet aux lests de résister à des charges et impacts mécaniques répétés, tels que les contraintes liées à la marche ou à la course. Le faible coefficient de dilatation thermique assure la stabilité dimensionnelle des composants à température corporelle ou à différence de température ambiante, et maintient la précision de mouvement de l'articulation.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des composants de poids par moulage par injection de métal (MIM) ou par métallurgie des poudres afin de répondre aux exigences des prothèses en matière de miniaturisation, de formes complexes et de haute précision. La technologie MIM forme une structure haute densité en mélangeant des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre avec un liant, puis en procédant au dégraissage et au frittage en phase liquide après le moulage par injection. La phase liquide nickel-cuivre mouille les particules de tungstène pour améliorer les propriétés mécaniques et la conductivité thermique. Le pressage isostatique à chaud élimine les micropores, améliore la densité et la durabilité des composants de poids et convient aux applications prothétiques à long terme. L'usinage de précision (tel que le micro-usinage laser ou le fraisage CNC) permet d'obtenir des géométries complexes avec des tolérances contrôlées au micron près pour garantir un ajustement précis à l'articulation prothétique. Le traitement de surface améliore la résistance à la corrosion et la biocompatibilité, empêche l'oxydation lors d'une utilisation à long terme ou l'irritation au contact de la peau et répond aux normes de biocompatibilité ISO 10993.

9.4.2 Pièces de réglage de l'équilibre pour les équipements de rééducation

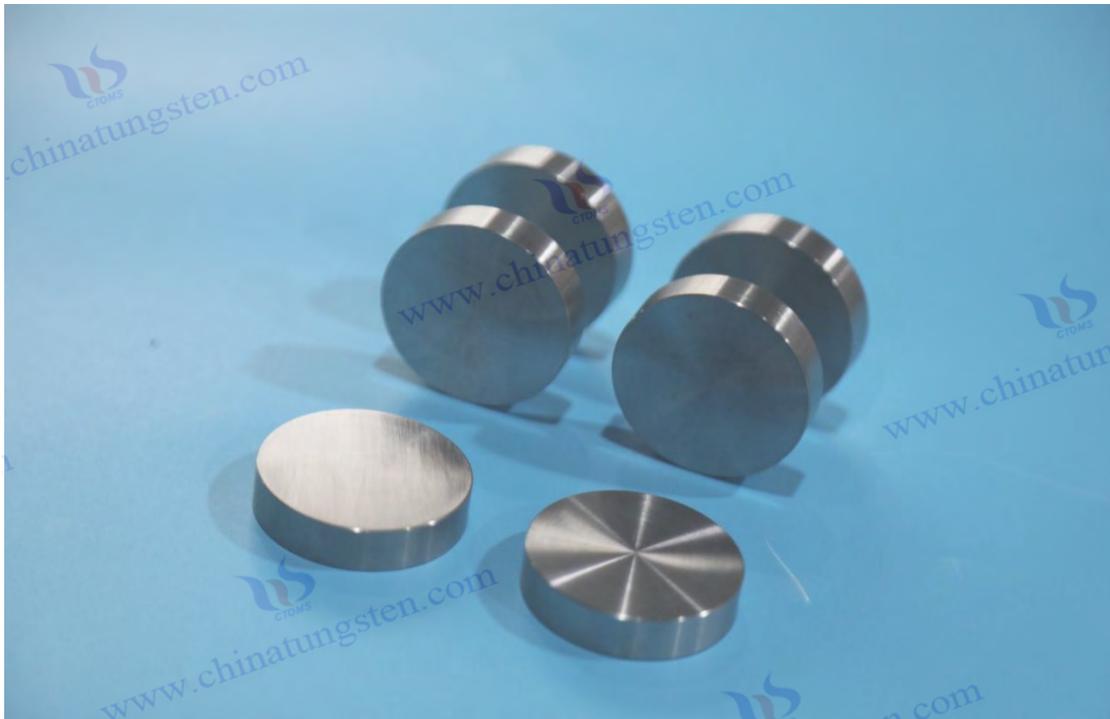
Les pièces de réglage de l'équilibre pour les équipements de rééducation sont des composants essentiels des appareils d'entraînement (tels que les appareils d'entraînement à la marche ou de musculation). Elles permettent d'ajuster le centre de gravité ou la résistance au mouvement de l'équipement afin d'assurer stabilité et sécurité pendant l'entraînement, tout en optimisant la rééducation du patient. L'alliage tungstène-nickel-cuivre est un matériau idéal pour les pièces de réglage de l'équilibre des équipements de rééducation grâce à sa haute densité, ses propriétés amagnétiques et ses excellentes propriétés mécaniques. Cette haute densité permet à l'alliage de fournir une masse suffisante dans un volume limité, de contrôler avec précision la répartition du centre de gravité de l'équipement, d'améliorer sa stabilité en mouvement dynamique et de réduire les interférences vibratoires ou les décalages pour le patient. Cette amagnétisme évite l'interférence des champs magnétiques sur les composants électroniques des équipements de rééducation (tels que les capteurs de mouvement ou les systèmes de contrôle), ce qui est idéal pour les équipements de rééducation intelligents. La robustesse de la phase de liaison nickel-cuivre permet aux pièces de réglage de résister à des charges mécaniques répétées, et le faible coefficient de dilatation thermique assure une stabilité dimensionnelle à température corporelle ou ambiante, préservant ainsi la précision du réglage.

Lors du processus de préparation, l'alliage tungstène-nickel-cuivre est utilisé pour fabriquer des pièces de réglage d'équilibre par procédé MIM ou métallurgie des poudres, afin de répondre aux exigences des équipements de rééducation en matière de formes complexes et de haute précision. La technologie MIM forme de minuscules billettes par moulage par injection, tandis que le frittage en phase liquide et le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pressage isostatique à chaud augmentent la densité, éliminent les micropores et améliorent les propriétés mécaniques et la conductivité thermique. L'usinage de précision (tel que l'électroérosion ou la rectification CNC) permet d'obtenir des formes géométriques complexes, et les tolérances sont contrôlées au micron près pour garantir l'ajustement précis des pièces de réglage à la structure de l'appareil. Le traitement de surface (tel que le revêtement DLC ou la passivation chimique) améliore la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la biocompatibilité, réduit les frottements avec la peau du patient et prévient l'oxydation en environnement stérile. Le traitement doit être effectué dans un environnement hautement propre afin d'éviter que la pollution par la poussière n'affecte les performances des composants.

Dans les équipements de rééducation, les ajusteurs d'équilibre en tungstène-nickel-cuivre améliorent considérablement les résultats de l'entraînement et la fiabilité des équipements. Par exemple, dans les appareils d'entraînement à la marche, les ajusteurs haute densité optimisent le centre de gravité de l'appareil et améliorent la stabilité pendant l'entraînement ; dans les équipements de rééducation musculaire, les ajusteurs non magnétiques évitent les interférences des systèmes de contrôle électronique et améliorent la précision des trajectoires de mouvement. Les axes d'optimisation incluent l'optimisation de la répartition du poids grâce à la conception de microstructures (comme les ajusteurs à gradient de densité), l'utilisation de nano-revêtements pour améliorer la durabilité et la biocompatibilité, ou l'association de la fabrication additive pour obtenir des structures d'ajustement personnalisées. Le contrôle qualité vérifie la performance des ajusteurs par des mesures de densité, des tests de vibrations et des tests de biocompatibilité afin de garantir leur conformité aux normes médicales (comme la norme ISO 13485).



CTIA GROUP LTD Alliage de tungstène nickel cuivre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 10 Comparaison entre l'alliage tungstène-nickel-cuivre et d'autres matériaux

L'[alliage tungstène-nickel-cuivre](#) a démontré sa grande valeur ajoutée dans les domaines de l'aérospatiale, de la médecine, de l'information électronique, de la défense nationale et de l'énergie grâce à sa densité élevée, ses propriétés amagnétiques, son excellente conductivité thermique et son faible coefficient de dilatation thermique. Préparé par métallurgie des poudres, cet alliage allie la densité élevée du tungstène à la ténacité et à la conductivité thermique de la phase de liaison nickel-cuivre pour répondre aux besoins de nombreux scénarios exigeants. Cependant, dans les applications réelles, il est souvent comparé à d'autres matériaux hautes performances tels que les alliages tungstène-nickel-fer et cuivre-tungstène afin d'évaluer ses avantages en termes de performances et d'applicabilité. Les propriétés physiques et chimiques, les procédés de préparation et les différences de coût des différents matériaux déterminent leur compétitivité dans des applications spécifiques.

10.1 Analyse des matériaux concurrents de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

L'alliage tungstène-nickel-cuivre (W-Ni-Cu) est largement utilisé dans les composants de pondération, de dissipation thermique, de blindage et de protection en raison de sa densité élevée (15-18 g/cm³), de ses propriétés amagnétiques, de sa bonne conductivité thermique et de sa biocompatibilité. Cependant, ses performances et son coût sont sensiblement différents de ceux du tungstène-nickel-fer (W-Ni-Fe) et du cuivre-tungstène (W-Cu). Les alliages tungstène-nickel-fer présentent un avantage dans les domaines militaire et industriel grâce à leur résistance élevée et à leur faible coût, mais leur magnétisme limite les applications exigeant une compatibilité électromagnétique élevée. Les alliages cuivre-tungstène excellent dans les domaines de l'électronique et de la gestion thermique grâce à leur excellente conductivité thermique et électrique, mais présentent une faible densité et une faible ténacité. Le choix de matériaux concurrents doit être évalué en fonction des exigences de l'application (telles que les propriétés amagnétiques, la conductivité thermique ou le coût).

10.1.1 Comparaison avec l'alliage tungstène-nickel-fer

Le tungstène-nickel-fer (W-Ni-Fe) est un alliage haute densité courant, largement utilisé dans l'industrie militaire (comme les noyaux perforants), les contrepoids aérospatiaux et les équipements industriels. Ses principaux composants sont le tungstène (85 % à 98 %), le nickel et le fer, et sa densité est similaire à celle de l'alliage tungstène-nickel-cuivre. Comparé à l'alliage tungstène-nickel-cuivre, l'alliage tungstène-nickel-fer présente des différences significatives en termes de propriétés mécaniques, de coût et de possibilités d'application.

Comparaison des performances : La résistance et la dureté de l'alliage tungstène-nickel-fer sont généralement supérieures à celles de l'alliage tungstène-nickel-cuivre. L'ajout de fer améliore les propriétés mécaniques de la phase de liaison nickel-fer, ce qui la rend plus avantageuse pour les applications nécessitant une résistance aux chocs et à l'usure (comme les noyaux de projectiles perforants ou les contrepoids mécaniques). Cependant, l'ajout de fer le rend faiblement magnétique, ce qui limite son utilisation dans les applications exigeant une compatibilité électromagnétique élevée (comme les équipements d'IRM et les équipements de contre-mesures électroniques). La nature amagnétique de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'alliage tungstène-nickel-cuivre constitue son principal avantage, et il convient aux applications où les interférences électromagnétiques doivent être évitées, comme les équipements médicaux et les systèmes radar. La conductivité thermique de l'alliage tungstène-nickel-cuivre est légèrement supérieure à celle de l'alliage tungstène-nickel-fer. Grâce à sa meilleure conductivité thermique, le cuivre est adapté aux applications de dissipation thermique (comme les dissipateurs thermiques électroniques). Les coefficients de dilatation thermique des deux sont similaires et les deux peuvent offrir une bonne stabilité dimensionnelle.

Comparaison des procédés de préparation : Les deux alliages sont préparés par métallurgie des poudres, incluant le mélange de poudre, le pressage et le frittage en phase liquide. Cependant, la température de frittage de l'alliage tungstène-nickel-fer est légèrement inférieure, et le coût du procédé est moindre, car le prix du fer est bien inférieur à celui du cuivre. La préparation de l'alliage tungstène-nickel-cuivre nécessite un contrôle environnemental plus strict (comme l'argon de haute pureté ou le vide) pour éviter l'oxydation du cuivre, ce qui augmente les coûts de production. Les performances de traitement de l'alliage tungstène-nickel-fer sont légèrement inférieures, car sa dureté plus élevée peut entraîner une usure des outils, tandis que la ténacité de l'alliage tungstène-nickel-cuivre facilite l'obtention de formes complexes en usinage de précision (comme l'usinage MIM ou CNC).

Scénarios applicables, avantages et inconvénients : L'alliage tungstène-nickel-fer est largement utilisé dans le domaine militaire (tels que les noyaux perforants, les contrepoids de missiles) et les contrepoids industriels (tels que les suppresseurs de vibrations) en raison de sa haute résistance et de son faible coût, mais son faible magnétisme le rend inadapté aux environnements sensibles aux ondes électromagnétiques. L'alliage tungstène-nickel-cuivre présente davantage d'avantages dans les domaines médical (contrepoids IRM, blindage en radiothérapie), de l'information électronique (modules radiofréquence 5G) et des armes aérospatiales (contrepoids de contrôle d'attitude). Ses propriétés amagnétiques et sa biocompatibilité répondent à des exigences de haute précision et de sécurité. L'inconvénient de l'alliage tungstène-nickel-cuivre est son coût élevé, qui affecte son efficacité économique, en particulier lorsque les prix du cuivre fluctuent. Les axes d'optimisation incluent l'amélioration des performances en ajustant le rapport nickel-cuivre ou le recours à la fabrication additive pour réduire les coûts de traitement.

10.1.2 Comparaison avec l'alliage cuivre-tungstène

L'alliage cuivre-tungstène (W-Cu) est un matériau composite dont la matrice est le tungstène et la phase liante le cuivre. Il est largement utilisé pour la dissipation thermique électronique, les contacts électriques et les composants haute température. Sa composition typique comprend du tungstène (70 à 90 %) et du cuivre, et sa masse volumique varie de 12 à 17 g/cm³. Comparé à l'alliage tungstène-nickel-cuivre, l'alliage cuivre-tungstène présente des différences significatives en termes de conductivité thermique et électrique, ainsi que de possibilités d'application.

Comparaison des performances : La conductivité thermique et électrique de l'alliage cuivre-tungstène est supérieure à celle de l'alliage tungstène-nickel-cuivre. Sa teneur plus élevée en cuivre (10 %-30 %) améliore l'efficacité de la conduction thermique et électrique, ce qui en fait un excellent matériau pour la dissipation thermique des composants électroniques de forte puissance (comme les substrats de semi-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conducteurs de puissance, les dissipateurs thermiques de serveurs) et les matériaux d'électrodes. Cependant, sa densité est inférieure à celle de l'alliage tungstène-nickel-cuivre, ce qui limite son application aux applications nécessitant un équilibrage de poids important (comme les contrepoids aérospatiaux et les composants d'équilibrage de missiles). Les propriétés mécaniques de l'alliage cuivre-tungstène sont faibles, et sa ténacité et sa résistance aux chocs sont inférieures à celles de l'alliage tungstène-nickel-cuivre. En raison de l'absence d'effet de renforcement du nickel, il se rompt facilement sous forte contrainte. Son amagnétisme constitue son avantage, car il est adapté aux environnements sensibles aux champs électromagnétiques. Bien que l'alliage cuivre-tungstène soit également amagnétique, sa faible densité rend sa capacité de blindage légèrement inférieure. Leurs coefficients de dilatation thermique sont similaires et conviennent aux situations exigeant une stabilité dimensionnelle.

Comparaison des procédés de préparation : L'alliage cuivre-tungstène et l'alliage tungstène-nickel-cuivre sont tous deux préparés par métallurgie des poudres. Cependant, l'alliage cuivre-tungstène est généralement préparé par infiltration (frittage du squelette de tungstène, puis infiltration de cuivre liquide), une méthode complexe et énergivore. L'alliage tungstène-nickel-cuivre utilise le frittage en phase liquide, plus flexible et permettant d'obtenir des formes complexes grâce au procédé MIM, ce qui le rend adapté aux composants miniaturisés (tels que les collimateurs médicaux et les contrepoids MEMS). L'alliage cuivre-tungstène est difficile à usiner en raison de sa dureté élevée et de la douceur de sa phase de cuivre, qui peuvent facilement entraîner des surfaces irrégulières. La ténacité de l'alliage tungstène-nickel-cuivre le rend plus avantageux pour l'usinage de précision. L'alliage cuivre-tungstène présente une teneur élevée en cuivre et l'atmosphère de frittage doit être strictement contrôlée pour éviter l'oxydation, ce qui augmente le coût du procédé.

Français Scénarios applicables et avantages et inconvénients : L'alliage cuivre-tungstène est largement utilisé dans l'industrie électronique (comme l'emballage des semi-conducteurs de puissance, les contacts électriques) et les composants à haute température (comme les revêtements de tuyères de fusées) en raison de son excellente conductivité thermique et électrique, mais sa faible densité et sa faible ténacité limitent son application dans les contrepoids à haute densité ou les scénarios à fort impact. L'alliage tungstène-nickel-cuivre présente plus d'avantages dans le médical (blindage de radiothérapie, contrepoids d'IRM), la défense nationale (leures radar, contrepoids de missiles) et les véhicules à énergie nouvelle (contrepoids de moteur). Sa densité et sa ténacité élevées répondent à des exigences mécaniques et électromagnétiques complexes. Le coût de l'alliage cuivre-tungstène fluctue considérablement en raison de sa teneur élevée en cuivre, tandis que le coût de l'alliage tungstène-nickel-cuivre est affecté par les prix du nickel et du cuivre, et le rapport doit être optimisé pour réduire la pression économique. Les directions d'optimisation incluent l'amélioration de la ténacité des alliages cuivre-tungstène grâce à des revêtements composites, ou l'utilisation de poudre de tungstène à l'échelle nanométrique pour améliorer les performances des alliages tungstène-nickel-cuivre.

10.2 Recherche et développement d'une technologie de pointe pour les alliages tungstène-nickel-cuivre

Face à la demande croissante de matériaux hautes performances, la recherche et le développement d'alliages tungstène-nickel-cuivre évolue de l'optimisation traditionnelle des performances vers la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conception de microstructures et l'innovation fonctionnelle. Les alliages nanostructurés améliorent significativement la résistance, la ténacité et la conductivité thermique des matériaux en réduisant la taille des particules de poudre à l'échelle nanométrique, ce qui les rend adaptés aux applications de haute précision et aux environnements extrêmes. Les matériaux à gradient fonctionnel permettent d'obtenir des performances personnalisées en introduisant une distribution progressive de la composition ou de la structure au sein de l'alliage afin de répondre à des besoins complexes et multifonctionnels. Ces technologies favorisent de nouvelles applications des alliages tungstène-nickel-cuivre dans les domaines médical, électronique, de la défense et de l'énergie grâce à des procédés de préparation avancés, contribuant ainsi à la prochaine génération de composants hautes performances.

10.2.1 Alliages nanostructurés

Les alliages nanostructurés tungstène-nickel-cuivre sont préparés à partir de poudres nanométriques de tungstène, de nickel et de cuivre, ce qui améliore considérablement la microstructure et les propriétés de l'alliage. Les particules nanométriques présentent une surface spécifique et une activité de surface élevées, ce qui permet de former une microstructure plus uniforme lors du frittage, de réduire la porosité et d'améliorer la densité, la résistance et la ténacité. Comparés aux alliages micrométriques traditionnels tungstène-nickel-cuivre, les alliages nanostructurés présentent des propriétés mécaniques nettement améliorées, car le renforcement des joints de grains par les nanoparticules améliore la résistance aux chocs et à la fatigue. Les propriétés amagnétiques sont conservées, ce qui convient aux applications exigeant une compatibilité électromagnétique élevée (telles que les équipements d'IRM et les systèmes radar). De plus, la répartition uniforme des particules nanométriques améliore la conductivité thermique, ce qui confère à l'alliage de meilleures performances dans les applications de dissipation thermique (telles que les substrats de semi-conducteurs de puissance et les modules RF 5G). La finesse des grains de la nanostructure réduit également le coefficient de dilatation thermique, améliorant ainsi la stabilité dimensionnelle.

Méthode de préparation : Les alliages nanostructurés sont généralement préparés par broyage à billes à haute énergie, dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ou procédé assisté par plasma pour préparer des poudres nanométriques. Les alliages denses sont ensuite formés par des procédés de métallurgie des poudres (tels que le frittage en phase liquide ou le frittage par plasma d'étincelles, SPS). Le broyage à billes à haute énergie affine les particules de poudre à l'échelle nanométrique par broyage mécanique. Le temps de broyage et l'environnement (argon haute pureté ou vide) doivent être contrôlés pour éviter l'introduction d'impuretés. La technologie SPS utilise la haute tension et le courant pulsé pour fritter rapidement les nanopoudres, raccourcir le temps de frittage, inhiber la croissance des grains et préserver les caractéristiques de la nanostructure. Le pressage isostatique à chaud (HIP) améliore encore la densité et élimine les micropores. L'usinage de précision (tel que le micro-usinage laser) permet d'obtenir des formes complexes, et le traitement de surface améliore la résistance à la corrosion et la biocompatibilité. Le processus de préparation nécessite un contrôle strict de la pureté de la poudre et des conditions de frittage afin de garantir la stabilité et la constance des performances de la nanostructure.

Applications et avantages : Les alliages nanostructurés tungstène-nickel-cuivre présentent des avantages significatifs pour les applications de haute précision. Par exemple, dans le domaine médical,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

les alliages nanostructurés sont utilisés dans les composants de collimateurs de radiothérapie pour améliorer l'efficacité de la protection contre les radiations et la précision dimensionnelle ; dans le domaine de l'information électronique, l'excellente conductivité thermique des nanoalliages les rend adaptés aux bases de dissipation thermique des serveurs haute puissance ; dans le domaine de la défense, les nanoalliages haute résistance peuvent être utilisés dans les composants d'équilibrage de missiles pour améliorer la résistance aux chocs. Les axes d'optimisation incluent le développement de technologies plus performantes de préparation de nanopoudres, l'utilisation de nanorevêtements composites pour améliorer les performances, ou la combinaison de la fabrication additive pour obtenir des nanostructures complexes. Le défi réside dans le coût élevé des nanopoudres et le contrôle de l'oxydation pendant le processus de préparation, qui nécessite l'utilisation d'équipements automatisés et de technologies de surveillance en ligne pour améliorer l'efficacité de la production.

10.2.2 Matériaux à gradient fonctionnel

Les matériaux à gradient fonctionnel (FGM) permettent une transition en douceur d'une densité élevée à une conductivité thermique ou une ténacité élevées grâce à une répartition graduelle de la composition ou de la structure au sein des alliages tungstène-nickel-cuivre, afin de répondre aux besoins des composants multifonctionnels. La composition uniforme des alliages tungstène-nickel-cuivre traditionnels limite leur adaptabilité aux conditions de travail complexes, tandis que les FGM optimisent les performances grâce à une conception à gradient (par exemple, une variation progressive de la teneur en tungstène d'une valeur élevée à une valeur faible, ou une variation régionale du rapport nickel-cuivre). Par exemple, les zones à forte teneur en cuivre près de la surface peuvent améliorer la conductivité thermique et sont adaptées aux besoins de dissipation thermique ; les zones internes à forte teneur en tungstène offrent une densité élevée pour répondre aux exigences de poids. Les propriétés amagnétiques des FGM sont conservées, ce qui les rend adaptés aux environnements électromagnétiques sensibles ; la structure à gradient améliore également la résistance aux chocs thermiques et la liaison des interfaces, les rendant ainsi adaptés aux scénarios de températures élevées ou de fortes contraintes.

Méthode de préparation : Les alliages tungstène-nickel-cuivre FGM sont généralement préparés par empilement de poudres stratifiées associé à un frittage en phase liquide ou à une technologie de fabrication additive. L'empilement de poudres stratifiées forme une structure à gradient en déposant couche par couche des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre de différentes compositions dans un moule (par exemple, un gradient allant d'une couche à forte teneur en tungstène à une couche à forte teneur en cuivre), puis par frittage en phase liquide. La température et l'atmosphère doivent être contrôlées avec précision pendant le frittage pour garantir l'adhérence de l'interface. La fabrication additive (comme la fusion sélective par laser, SLM) construit directement une structure à gradient en déposant couche par couche des poudres de différentes compositions, ce qui est adapté aux pièces de formes complexes. Le pressage isostatique à chaud améliore encore la densité et élimine les micropores à l'interface à gradient. L'usinage de précision (comme le fraisage CNC ou l'électro-étagage) permet d'obtenir une géométrie précise, et le traitement de surface (comme la passivation chimique ou le revêtement PVD) améliore la résistance à la corrosion et la biocompatibilité. Le processus de préparation nécessite une optimisation de la distribution de la poudre et des paramètres de frittage pour éviter la concentration de contraintes à l'interface du gradient.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Applications et avantages : Les alliages tungstène-nickel-cuivre à gradient fonctionnel présentent des avantages significatifs dans les composants multifonctionnels. Par exemple, dans le substrat de dissipation thermique des batteries de véhicules à énergie nouvelle, la forte teneur en cuivre en surface améliore la conductivité thermique, tandis que la forte teneur en tungstène à l'intérieur assure un support structurel ; dans les capots de blindage pour la radiothérapie médicale, la structure à gradient optimise la protection contre les radiations et la légèreté ; dans les composants de tuyères d'armes aérospatiales, la conception à gradient améliore la résistance aux chocs thermiques. Les axes d'optimisation incluent le développement de technologies de contrôle de gradient plus précises (comme l'impression 3D multi-matériaux), l'utilisation de revêtements composites pour améliorer les propriétés de surface ou l'optimisation de la distribution de gradient par simulation. Le défi réside dans le coût de préparation élevé et la stabilité de l'interface de gradient, qui doit être réduite grâce à une production automatisée et une surveillance en ligne.

10.3 Technologie de fabrication verte de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

Les alliages tungstène-nickel-cuivre font appel à des procédés de métallurgie des poudres à haute énergie et à des traitements chimiques, susceptibles de produire des gaz résiduels, des liquides résiduels et des déchets solides, ce qui représente une charge environnementale. Les technologies de fabrication écologiques réduisent considérablement l'impact environnemental en améliorant les procédés de préparation et en développant des méthodes efficaces de recyclage des déchets, tout en améliorant l'utilisation des ressources et l'efficacité de la production. Les procédés de préparation respectueux de l'environnement permettent une production propre en optimisant les processus de production, en réduisant l'utilisation de produits chimiques nocifs et en diminuant la consommation d'énergie ; les technologies de recyclage des déchets réduisent le gaspillage de ressources et la pollution environnementale en recyclant les déchets et les pièces mises au rebut lors de la production. Ces technologies répondent non seulement aux exigences des réglementations environnementales, mais renforcent également la compétitivité des alliages tungstène-nickel-cuivre dans des secteurs tels que la médecine, l'électronique et la défense, ouvrant ainsi une nouvelle voie vers une fabrication durable.

10.3.1 Processus de préparation respectueux de l'environnement

Le procédé de préparation écologique vise à créer un procédé de fabrication propre et efficace en optimisant la production d'alliages tungstène-nickel-cuivre, réduisant ainsi la consommation d'énergie, les émissions de gaz d'échappement et l'utilisation de produits chimiques nocifs. Les procédés traditionnels de métallurgie des poudres impliquent des étapes de frittage à haute énergie et de nettoyage chimique, susceptibles de produire des gaz d'échappement oxydés ou des liquides résiduels acides. Ce procédé de préparation écologique réduit considérablement l'impact environnemental grâce à l'utilisation d'une technologie de frittage basse énergie, de liants verts et de méthodes de traitement propres. La technologie de frittage basse énergie utilise des méthodes de frittage rapides telles que le frittage par plasma d'étincelles (SPS), qui chauffe rapidement grâce à un courant pulsé et une haute pression afin de raccourcir le temps de frittage et de réduire la consommation d'énergie tout en préservant la densité et les performances de l'alliage. Les liants verts utilisent des matériaux dégradables ou non toxiques pour remplacer les liants traditionnels à base de paraffine ou de polymère, réduire les émissions de composés

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

organiques volatils lors du moulage par injection de métal (MIM) et diminuer la pollution des gaz d'échappement lors du dégraissage. Les méthodes de traitement propres réduisent les déchets liquides nocifs pendant le traitement en utilisant des liquides de refroidissement à base d'eau au lieu de liquides de refroidissement à base d'huile, tout en optimisant les processus d'usinage de précision pour réduire la production de poussière et de déchets.

Les procédés de préparation respectueux de l'environnement mettent également l'accent sur le contrôle de l'environnement de production. Le frittage et le traitement sous gaz inerte de haute pureté ou sous vide permettent d'éviter l'oxydation des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre et de réduire la production de gaz résiduels oxydés. Le système de traitement des eaux usées collecte et purifie le liquide de nettoyage en production afin de réduire le gaspillage d'eau et la pollution environnementale. L'optimisation des procédés comprend également l'utilisation de systèmes de contrôle automatisés pour contrôler avec précision la température et l'atmosphère de frittage, améliorer la régularité de la production et réduire les déchets liés aux erreurs de procédé. L'avantage des procédés de préparation respectueux de l'environnement réside dans la réduction de la consommation d'énergie et des émissions, tout en préservant la densité élevée, l'amagnétisme et la conductivité thermique de l'alliage, répondant ainsi aux besoins des blindages en radiothérapie médicale, des substrats de dissipation thermique électronique et des composants de contrepoids de la défense nationale. Les axes d'optimisation comprennent le développement d'une technologie de frittage rapide plus performante, l'exploration de l'application de liants biosourcés et l'intégration de systèmes de fabrication intelligents pour améliorer encore l'efficacité de la production.

10.3.2 Technologie de recyclage des déchets

Réduit le gaspillage de ressources et la pollution environnementale, et améliore la rentabilité et la durabilité des matériaux en recyclant les déchets (poudres, copeaux, etc.) et les pièces mises au rebut (pièces de blindage médical, contrepoids, etc.) lors de la production d'alliages tungstène-nickel-cuivre. Les méthodes de recyclage traditionnelles peuvent impliquer une fusion à haute énergie ou un traitement chimique, ce qui génère une pollution secondaire. La technologie de recyclage des déchets verts permet d'obtenir des taux de récupération élevés et un faible impact environnemental grâce à la séparation physique, la purification chimique et des procédés de réutilisation efficaces. La séparation physique utilise le broyage et le tamisage mécaniques pour séparer initialement les composants tungstène, nickel et cuivre des déchets, réduisant ainsi le besoin de traitement chimique. La purification chimique utilise des solvants respectueux de l'environnement (solutions aqueuses ou liquides acides peu toxiques) pour séparer et purifier les composants métalliques, évitant ainsi les gaz et liquides résiduels générés par la fusion traditionnelle à l'acide fort ou à haute température. Ce procédé de réutilisation efficace redistribue la poudre métallique récupérée pour la métallurgie des poudres ou les procédés MIM afin de préparer de nouvelles pièces en alliage et de maintenir des performances constantes.

La technologie de recyclage des déchets inclut également le recyclage des pièces mises au rebut. Le démontage et le tri de collimateurs médicaux, de dissipateurs thermiques électroniques ou de contrepoids de défense mis au rebut permettent d'extraire des matériaux tungstène-nickel-cuivre utilisables, qui sont ensuite nettoyés, broyés et refrittés pour être transformés en poudre de haute qualité. Le processus de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

recyclage doit être réalisé dans un environnement propre afin d'éviter toute contamination par des impuretés qui pourraient affecter l'amagnétisme et la biocompatibilité de l'alliage. Une technologie avancée de surveillance en ligne permet de détecter la composition et la pureté de la poudre recyclée afin de garantir sa conformité aux normes de production. L'avantage de la technologie de recyclage des déchets est de réduire considérablement la dépendance aux minerais primaires de tungstène, de nickel et de cuivre, de réduire l'impact environnemental de l'extraction et du raffinage, et de limiter l'accumulation de déchets solides. Les axes d'optimisation comprennent le développement de technologies de séparation plus efficaces (comme le tri électromagnétique ou le tri laser), l'exploration de systèmes de recyclage en boucle fermée et l'intégration de la fabrication additive pour utiliser directement les poudres recyclées dans la production de composants complexes.



CTIA GROUP LTD Alliage de tungstène nickel cuivre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 11 Problèmes courants et solutions de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

L'alliage tungstène-nickel-cuivre est largement utilisé dans les secteurs de l'aérospatiale, de la médecine, de l'électronique, de la défense et de l'énergie en raison de sa densité élevée, de ses propriétés amagnétiques, de son excellente conductivité thermique et de son faible coefficient de dilatation thermique. Préparé par métallurgie des poudres, cet alliage allie la densité élevée du tungstène à la ténacité et à la conductivité thermique de la phase de liaison nickel-cuivre pour répondre aux exigences de haute précision et aux environnements difficiles. Cependant, divers problèmes peuvent survenir lors du processus de préparation, tels que des défauts de frittage, une composition irrégulière ou des difficultés de mise en œuvre, qui affectent les performances et la fiabilité de l'alliage. La résolution de ces problèmes nécessite l'optimisation des flux de production, l'amélioration du contrôle des équipements et l'adoption de technologies avancées pour garantir la qualité et la régularité de l'alliage.

11.1 Procédé de préparation de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

L'alliage tungstène-nickel-cuivre repose principalement sur la métallurgie des poudres, notamment le mélange, le pressage, le frittage et le post-traitement. Des problèmes peuvent survenir à chaque étape en raison de matières premières, d'équipements ou de paramètres de procédé inappropriés. Le frittage, étape clé, affecte directement la densité, la microstructure et les performances de l'alliage, mais il est sujet à des défauts tels que la porosité, les fissures ou la ségrégation des composants. Ces problèmes peuvent entraîner une diminution des propriétés mécaniques, une conductivité thermique insuffisante ou une dégradation des propriétés amagnétiques de l'alliage, compromettant ainsi son application dans les pièces de blindage médical, les substrats de dissipation thermique électronique ou les composants de contrepoids de défense nationale. La résolution des problèmes liés au processus de préparation nécessite de commencer par la sélection des matières premières, l'optimisation du procédé et le contrôle qualité afin de garantir que les performances de l'alliage répondent aux exigences des applications les plus exigeantes.

11.1.1 Solutions aux défauts de frittage

Les défauts de frittage sont des problèmes courants lors de la préparation des alliages tungstène-nickel-cuivre. Ils se manifestent principalement par des pores, des fissures, une ségrégation de composition ou un frittage irrégulier. Ces défauts réduisent la densité, les propriétés mécaniques et la conductivité thermique de l'alliage, affectant ainsi sa fiabilité dans les applications de haute précision. La porosité est généralement due à un remplissage incomplet des espaces entre les particules de poudre ou à des gaz résiduels, ce qui peut entraîner une densité insuffisante et affaiblir la protection contre les radiations ou l'effet de contrepoids. Les fissures sont souvent causées par des contraintes thermiques ou une vitesse de refroidissement irrégulière pendant le frittage, affectant la ténacité et la durabilité de l'alliage. La ségrégation de composition est due à une répartition inégale des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre, ou à une fluidité insuffisante pendant le frittage en phase liquide, ce qui peut entraîner des propriétés locales irrégulières, telles qu'une conductivité thermique réduite ou des propriétés amagnétiques altérées. Un frittage irrégulier est lié à un gradient de température ou à un contrôle de l'atmosphère inapproprié dans le four, ce qui affecte l'uniformité de la microstructure de l'alliage.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Solution : Les défauts de frittage peuvent être résolus en optimisant le choix des matières premières, en améliorant le processus de frittage et en renforçant le contrôle du procédé. L'utilisation de poudres de tungstène, de nickel et de cuivre de haute pureté et de granulométrie uniforme garantit une composition chimique et des propriétés physiques constantes et réduit l'apparition de porosité et de ségrégation. Le broyage à billes à haute énergie ou la technologie d'alliage mécanique permettent de mélanger les poudres afin d'améliorer l'uniformité et la surface de contact des particules et de favoriser le mouillage et le remplissage des phases nickel et cuivre pendant le frittage en phase liquide. Optimiser les paramètres du processus de frittage, adopter une stratégie de frittage par montée en température progressive, chauffer lentement jusqu'à la température de frittage en phase liquide afin que la phase liquide de nickel et de cuivre puisse s'écouler pleinement, combler les espaces entre les particules de tungstène et réduire la formation de pores ; contrôler simultanément la vitesse de refroidissement pour éviter les fissures dues aux contraintes thermiques. Utiliser un gaz inerte de haute pureté (comme l'argon) ou un environnement sous vide pour le frittage afin d'éviter la formation d'oxydes et de maintenir la conductivité thermique et amagnétique de l'alliage. Introduire une technologie de frittage rapide, comme le frittage par plasma d'étincelles (SPS), qui utilise un courant pulsé et une haute pression pour chauffer rapidement, raccourcir le temps de frittage, inhiber la croissance des grains et réduire la porosité et la ségrégation.

Renforcez le contrôle qualité pendant le processus de frittage et utilisez un système de surveillance en ligne pour détecter en temps réel la température, l'atmosphère et la pression dans le four afin de garantir la stabilité des conditions de frittage. Le pressage isostatique à chaud (HIP) est utilisé en post-traitement pour éliminer les pores résiduels et les microfissures grâce à des températures et des pressions élevées, améliorer la densité et l'uniformité de l'alliage et est particulièrement adapté aux applications exigeantes telles que les collimateurs médicaux ou les composants de contrepois pour l'aérospatiale. Étalonnez régulièrement l'équipement de frittage pour garantir un champ de température uniforme dans le four et éviter les frittages irréguliers causés par des surchauffes locales ou des zones froides. De plus, combinez les technologies de simulation pour optimiser les paramètres de frittage, prédire l'écoulement en phase liquide et la répartition des contraintes, et réduire les coûts d'essais et d'erreurs. L'avantage de cette solution est qu'elle améliore considérablement la densité, les propriétés mécaniques et la constance des performances de l'alliage, répondant ainsi aux exigences strictes des secteurs médical, électronique et de la défense. Les axes d'optimisation comprennent le développement d'équipements de frittage rapide plus performants, l'exploration de systèmes de contrôle automatisés pour améliorer la stabilité du procédé et l'intégration de la fabrication additive pour préparer directement des formes complexes et réduire les défauts de fabrication ultérieurs. À l'avenir, en combinant les technologies de fabrication verte, le procédé de frittage permettra de réduire davantage la consommation d'énergie et les émissions, et de favoriser le développement durable des alliages tungstène-nickel-cuivre.

11.1.2 Contrôle de l'uniformité de la composition

L'uniformité de la composition est un problème fréquent dans la préparation des alliages tungstène-nickel-cuivre. Il s'agit d'une répartition inégale des composants tungstène, nickel et cuivre dans l'alliage, ce qui peut entraîner des différences de densité locales, une conductivité thermique réduite ou une altération des propriétés amagnétiques. L'hétérogénéité de la composition est généralement due à un mélange de poudre insuffisant, à des différences de granulométrie ou à une mauvaise fluidité lors du

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

frittage en phase liquide. La densité élevée du tungstène facilite sa sédimentation lors du mélange de poudre, tandis que la répartition inégale de la phase de liaison nickel-cuivre peut provoquer une ségrégation locale après frittage, affectant la constance des performances de l'alliage. Par exemple, dans les pièces de blindage pour la radiothérapie médicale, une composition inégale peut réduire l'effet de protection contre les radiations ; dans les dissipateurs thermiques électroniques, elle peut entraîner une conductivité thermique instable et affecter l'efficacité de la dissipation thermique.

Solution : Pour garantir l'uniformité de la composition, il est possible d'optimiser le choix des poudres, d'améliorer le processus de mélange et de renforcer le contrôle du frittage. Sélectionner des poudres de tungstène, de nickel et de cuivre de haute pureté, présentant une granulométrie homogène, afin de réduire la sédimentation et la stratification des particules et d'assurer l'uniformité dès la phase initiale du mélange. Utiliser un broyeur à boulets à haute énergie ou une technologie d'alliage mécanique pour le mélange des poudres. Grâce à un broyage intensif et prolongé, les particules de tungstène, de nickel et de cuivre sont parfaitement dispersées, ce qui améliore l'uniformité du contact entre les particules et évite l'introduction d'impuretés. Utiliser un équipement de mélange tridimensionnel ou un mélange assisté par ultrasons pour améliorer la dispersion et la fluidité de la poudre et réduire la sédimentation. Optimiser le frittage en phase liquide et contrôler la fusion et l'écoulement de la phase liquide nickel-cuivre grâce à une stratégie de chauffage par étapes afin de garantir un mouillage complet des particules de tungstène, de combler les espaces entre les particules et de réduire la ségrégation. Utilisez un gaz inerte de haute pureté ou un environnement sous vide pendant le processus de frittage pour éviter que l'oxydation du cuivre ne provoque un déséquilibre de la composition.

Le renforcement du contrôle du procédé est essentiel pour garantir l'homogénéité de la composition. Un système de surveillance en ligne détecte en temps réel le degré de mélange de la poudre et la répartition de la composition pendant le frittage. L'homogénéité est vérifiée par analyse par fluorescence X ou microscopie électronique. Le pressage isostatique à chaud (CIC) est un procédé de post-traitement qui élimine la ségrégation locale et les micropores grâce à des températures et des pressions élevées, améliore la densité et la consistance de la composition de l'alliage et est particulièrement adapté aux applications de haute précision telles que les contrepois aérospatiaux ou les collimateurs médicaux. L'étalonnage régulier des équipements de mélange et de frittage de la poudre garantit la stabilité des paramètres du procédé et évite les inhomogénéités de composition dues aux écarts de l'équipement. De plus, la technologie de simulation est combinée pour optimiser les paramètres de mélange et de frittage de la poudre, prédire l'écoulement du liquide et la répartition de la composition, et réduire les coûts d'essai. L'avantage de cette solution est qu'elle améliore considérablement la constance des performances de l'alliage, répondant ainsi aux exigences strictes des secteurs médical, électronique et de la défense. Les axes d'optimisation comprennent le développement d'un système automatisé de mélange de poudre, l'exploration de poudres à l'échelle nanométrique pour améliorer encore l'uniformité et l'intégration de la technologie de fabrication additive pour contrôler directement la distribution de la composition.

11.2 Analyse des défaillances d'application de l'alliage tungstène-nickel-cuivre

Les alliages tungstène-nickel-cuivre peuvent présenter des défaillances dans des applications exigeantes (telles que le blindage en radiothérapie médicale, les substrats de dissipation thermique électronique et

les composants de contrepoids de défense) en raison de défauts de matériaux, de facteurs environnementaux ou d'une utilisation inappropriée, entraînant une dégradation des performances ou des dommages aux composants. Les défaillances d'application peuvent se manifester par des propriétés mécaniques insuffisantes, une conductivité thermique réduite, une corrosion de surface ou une instabilité dimensionnelle, affectant la sécurité et la fiabilité des équipements. Par exemple, dans les équipements médicaux, les défaillances peuvent réduire l'efficacité du blindage contre les radiations ; dans les appareils électroniques, des défaillances dues à la surchauffe peuvent survenir ; dans les équipements de défense, la précision des contrepoids ou la résistance aux chocs peuvent être affectées. L'analyse des causes de défaillance et la proposition de solutions sont essentielles pour améliorer la fiabilité des applications des alliages, en commençant par la préparation des matériaux, l'adaptabilité environnementale et les conditions d'utilisation.

Causes et solutions des défaillances : Les causes courantes de défaillance des applications incluent les défauts de préparation, l'érosion environnementale et la surcharge mécanique. Les défauts de préparation tels que les pores, les fissures ou une composition irrégulière affaiblissent directement les propriétés mécaniques et la conductivité thermique de l'alliage. Ces défauts peuvent être éliminés en optimisant le procédé de frittage (par exemple, le frittage par plasma d'étincelles) ou en utilisant la compression isostatique à chaud pour garantir une microstructure dense et uniforme. L'érosion environnementale est principalement causée par l'humidité, la désinfection chimique ou l'oxydation à haute température, entraînant une corrosion de surface ou une dégradation des performances, en particulier dans les équipements médicaux ou les environnements marins. Les solutions incluent l'utilisation de traitements de surface résistants à la corrosion, tels que les revêtements PVD TiN ou la passivation chimique, pour former une couche protectrice dense et améliorer la résistance à l'oxydation et à la corrosion ; tout en optimisant la composition de l'alliage et en augmentant le rapport nickel-cuivre pour améliorer la résistance à la corrosion. La surcharge mécanique est fréquente dans les environnements soumis à de forts impacts ou à des vibrations (par exemple, contrepoids de missiles, protection de blindage), ce qui peut provoquer des fissures ou des déformations. La résistance aux chocs peut être améliorée en améliorant la ténacité de l'alliage (par exemple en utilisant une conception nanostructurée) ou en optimisant la géométrie des composants (par exemple en ajoutant des congés ou des structures à gradient).

L'adaptabilité environnementale est au cœur de l'analyse des défaillances. Dans les environnements à haute température ou soumis à des cycles thermiques, les contraintes thermiques peuvent entraîner une instabilité dimensionnelle ou un décollement de l'interface, affectant ainsi les performances des substrats de dissipation thermique ou des composants de blindage. Les solutions incluent l'utilisation d'une formulation à faible coefficient de dilatation thermique, associée à des matériaux à gradient fonctionnel (FGM) pour optimiser la répartition des contraintes thermiques. Les interférences électromagnétiques peuvent provoquer des défaillances non magnétiques, notamment dans les équipements d'IRM ou les systèmes radar, ce qui peut être assuré par un contrôle strict de la teneur en impuretés de fer et des tests de magnétisation en ligne. Une utilisation inappropriée, comme une surcharge ou une installation non conforme aux exigences de conception, peut entraîner une défaillance des composants. Les erreurs humaines doivent être réduites grâce à la formation des utilisateurs et à des processus d'installation standardisés. Le contrôle qualité utilise la microscopie électronique à balayage pour analyser la microstructure, le test au brouillard salin pour vérifier la résistance à la corrosion et le test de vibration

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pour évaluer les propriétés mécaniques afin de garantir la conformité des composants aux normes d'application. L'avantage de cette solution est d'améliorer considérablement la fiabilité et la durée de vie de l'alliage afin de répondre aux exigences élevées des secteurs médical, électronique et de la défense. Les axes d'optimisation comprennent le développement de revêtements auto-cicatrisants pour faire face à l'érosion environnementale, l'exploration d'une technologie de surveillance intelligente pour détecter les risques de défaillance en temps réel et l'intégration d'une technologie de fabrication additive pour personnaliser les structures anti-défaillance.

11.2.1 Solutions aux défaillances du cycle thermique

La défaillance par cycle thermique est un mode de défaillance courant des alliages tungstène-nickel-cuivre dans des environnements à haute température ou à différences de température. Elle se manifeste par des microfissures, un décollement de l'interface ou une déformation dimensionnelle causés par des dilatations et contractions thermiques répétées, affectant l'intégrité structurelle et la stabilité des performances de l'alliage. La défaillance par cycle thermique est principalement causée par les contraintes thermiques. Lorsque l'alliage subit des variations rapides de température en fonctionnement à haute température ou dans des environnements à différences de température extrêmes, une concentration de contraintes se produit à l'intérieur du matériau ou à l'interface avec la matrice en raison des différences de coefficients de dilatation thermique, ce qui peut entraîner la propagation de fissures ou la défaillance des composants. Par exemple, dans le blindage du détecteur d'un scanner médical, les cycles thermiques peuvent entraîner une déformation du composant de blindage et réduire l'effet de protection contre les radiations.

Solution : Les défaillances du cycle thermique peuvent être résolues en optimisant la composition de l'alliage, en améliorant la microstructure et en adoptant des procédés avancés. Ajuster le rapport nickel-cuivre et augmenter la teneur en cuivre permet d'améliorer la conductivité thermique, d'accélérer la dispersion de la chaleur, de réduire les écarts de température locaux et de limiter l'accumulation de contraintes thermiques. L'utilisation d'un matériau à gradient fonctionnel (FGM) optimise l'adaptation du coefficient de dilatation thermique et soulage les contraintes d'interface grâce à une répartition progressive des teneurs en tungstène, nickel et cuivre au sein de l'alliage. Ce matériau est particulièrement adapté aux substrats de dissipation thermique ou aux pièces de blindage associées au silicium, à la céramique et à d'autres substrats. L'utilisation d'alliages nanostructurés permet d'exploiter l'effet de renforcement des joints de grains des nanoparticules pour améliorer la résistance à la fatigue thermique et réduire la formation de microfissures. Optimiser le frittage et utiliser le frittage par plasma d'étincelles (SPS) pour former rapidement une structure dense et réduire les pores et les points de concentration de contraintes ; le pressage isostatique à chaud (HIP) élimine également les micropores et améliore la résistance aux chocs thermiques de l'alliage.

Le traitement de surface est une mesure importante pour gérer les défaillances dues aux cycles thermiques. L'application de revêtements haute performance formant une barrière thermique peut réduire l'impact des chocs thermiques sur la surface de l'alliage, tout en améliorant la force de liaison interfaciale pour prévenir le pelage. Optimiser la conception géométrique des composants, par exemple en augmentant les congés ou l'épaisseur du gradient, permet de disperser les contraintes thermiques et de réduire le risque

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de fissures. Le contrôle qualité simule les conditions d'utilisation réelles grâce à des essais de cycles thermiques, combinés à la microscopie électronique à balayage, pour analyser les microfissures et vérifier la stabilité thermique de l'alliage. L'avantage de cette solution est d'améliorer significativement la fiabilité de l'alliage dans des environnements à hautes températures et à différences de température, répondant ainsi aux exigences strictes des secteurs médical, électronique et aérospatial. Les axes d'optimisation comprennent le développement de revêtements adaptatifs pour soulager dynamiquement les contraintes thermiques et l'exploration de la technologie d'impression 3D pour la fabrication de structures à gradient complexes.

11.2.2 Protection environnementale contre la corrosion

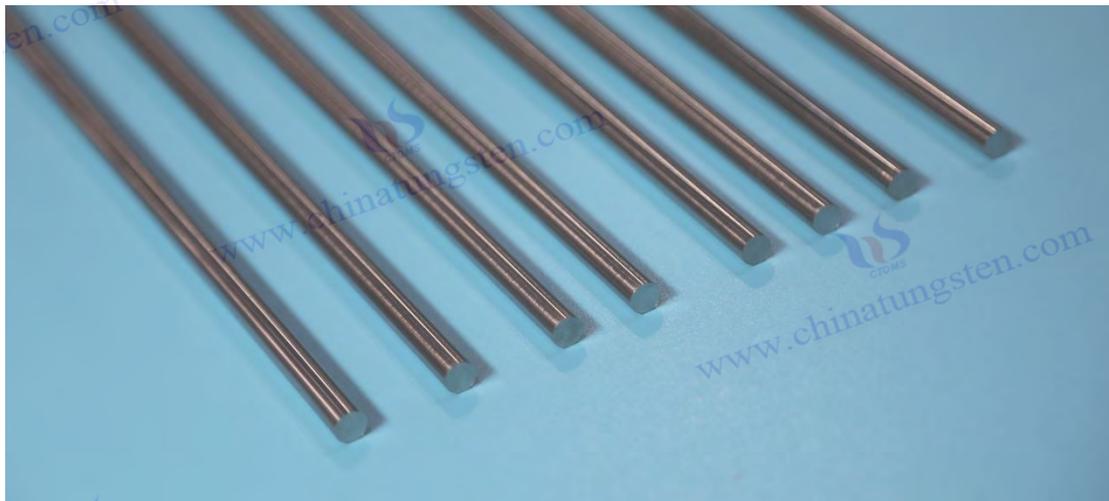
La corrosion environnementale est un mode de défaillance courant des alliages tungstène-nickel-cuivre dans les environnements humides, stérilisés chimiquement ou oxydants à haute température. Elle se manifeste par une oxydation de surface, des piqûres de corrosion ou une dégradation du matériau, affectant les performances et la durée de vie de l'alliage. La corrosion est principalement causée par des facteurs environnementaux tels que l'humidité, le brouillard salin ou les agents de nettoyage chimiques, en particulier dans les équipements médicaux (une désinfection fréquente est nécessaire), les environnements marins (comme les contrepoids de radar embarqués) ou les applications à haute température (comme les composants de tuyères de fusées). Le cuivre, en tant que phase de liaison, est sensible à l'oxydation ou aux attaques chimiques, ce qui entraîne une rugosité de surface, une diminution de la conductivité thermique ou une altération des propriétés amagnétiques. Par exemple, dans les capots de blindage pour la radiothérapie médicale, la corrosion peut réduire l'effet de protection contre les radiations ; dans les contrepoids de moteurs de véhicules à énergies nouvelles, elle peut provoquer une usure de surface et affecter l'équilibre dynamique.

Solution : La corrosion environnementale peut être résolue en optimisant la composition des alliages, en appliquant des revêtements protecteurs et en améliorant la gestion environnementale. L'augmentation de la teneur en nickel ou l'optimisation du rapport nickel-cuivre peut améliorer la résistance à la corrosion de la phase de liaison et réduire la tendance à l'oxydation du cuivre en milieu humide ou chimique. Les technologies de traitement de surface, telles que le revêtement PVD TiN ou CrN, peuvent être utilisées pour former une couche protectrice dense isolant l'oxygène, l'humidité et les produits chimiques, améliorant ainsi considérablement la résistance à la corrosion. Le traitement de passivation chimique peut encore améliorer la résistance à l'oxydation et la biocompatibilité en formant un film protecteur d'oxyde à la surface, adapté aux prothèses médicales ou aux composants de navigation chirurgicale. Le polissage électrochimique optimise l'état de surface, réduit les points de départ de la corrosion et améliore la résistance à la corrosion.

Améliorer le processus de préparation pour réduire la sensibilité à la corrosion. Utiliser des matières premières de haute pureté et un environnement de frittage propre (comme le vide ou l'argon de haute pureté) pour éviter l'introduction d'impuretés (comme le fer ou l'oxygène) et préserver les propriétés amagnétiques et de résistance à la corrosion de l'alliage. Le pressage isostatique à chaud (CIC) augmente la densité de l'alliage et réduit le risque de formation de pores, point de départ de la corrosion. Optimiser la gestion de l'environnement d'utilisation, par exemple en utilisant des désinfectants neutres plutôt que

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des nettoyants acides et alcalins puissants dans les équipements médicaux afin de réduire la corrosion chimique ; combiner la conception d'étanchéité en milieu marin pour isoler le brouillard salin et l'humidité. Le contrôle qualité vérifie la résistance à la corrosion par des tests au brouillard salin, des tests de cycle thermique humide et des analyses de surface (MEB ou XPS) afin de garantir la conformité aux normes médicales et militaires. L'avantage de cette solution est qu'elle prolonge considérablement la durée de vie de l'alliage dans les environnements difficiles et répond aux exigences de fiabilité des secteurs médical, électronique et de la défense. Les axes d'optimisation comprennent le développement de revêtements auto-cicatrisants pour réparer dynamiquement les dommages causés par la corrosion, l'exploration de revêtements nano-composites pour améliorer l'efficacité de la protection et l'intégration d'une technologie de surveillance en ligne pour évaluer l'état de la corrosion en temps réel.



CTIA GROUP LTD Alliage de tungstène nickel cuivre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

High Density: Typically 16.5 - 18.75 g/cm³

High Thermal Conductivity: Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

5. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten-alloy.com



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

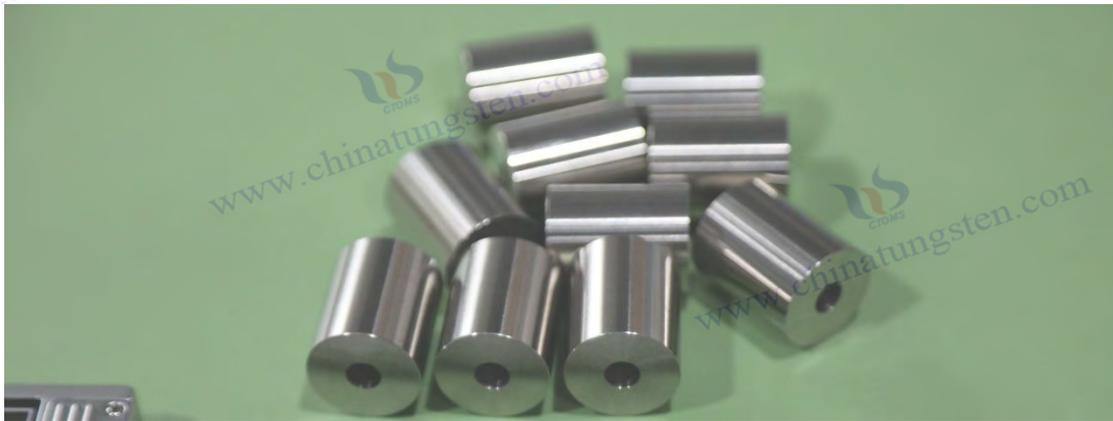
Appendice

Terminologie des alliages de tungstène, de nickel et de cuivre

Le terme	Définition et explication
Métallurgie des poudres	Procédé de préparation de matériaux métalliques par mélange de poudres métalliques, pressage et frittage pour la production d'alliages tungstène-nickel-cuivre, assurant une densité élevée et une microstructure homogène.
Frittage en phase liquide	Au cours du processus de frittage, la phase nickel-cuivre fond à haute température pour former un liquide qui mouille les particules de tungstène et comble les espaces, améliorant ainsi la densité et les performances de l'alliage.
Pressage isostatique à chaud (HIP)	Procédé qui traite les alliages sous haute température et haute pression sous pression omnidirectionnelle pour éliminer les micropores et les défauts et améliorer la densité et les propriétés mécaniques.
Moulage par injection de métal (MIM)	Procédé de préparation de pièces de forme complexe et de haute précision par mélange de poudre métallique avec un liant, déliantage et frittage après moulage par injection, adapté aux applications de miniaturisation.
Haute densité	Les alliages tungstène-nickel-cuivre font référence à leur masse élevée par unité de volume, ce qui les rend adaptés aux applications de contrepoids et de blindage, telles que les pièces de blindage de radiothérapie médicale et les contrepoids aérospatiaux.
Non magnétique	L'alliage ne génère pas de champs magnétiques et n'est pas perturbé par les champs magnétiques, ce qui le rend adapté aux environnements électromagnétiquement sensibles tels que les équipements IRM et les systèmes radar.
Conductivité thermique	La capacité de l'alliage à transférer la chaleur et l'ajout de la phase de cuivre lui permettent d'exceller dans les applications de dissipation thermique (telles que les dissipateurs thermiques électroniques, les substrats de batterie).
Faible coefficient de dilatation thermique	La faible variation dimensionnelle de l'alliage sous l'effet des changements de température assure la stabilité géométrique pendant les cycles thermiques et convient aux composants de haute précision.
Matériaux à gradient fonctionnel (FGM)	Matériaux aux performances optimisées grâce à une conception à gradient de composition ou de structure, comme la combinaison d'un noyau haute densité et d'une couche de surface à haute conductivité thermique.
Alliages nanostructurés	L'alliage est fabriqué à partir de poudre à l'échelle nanométrique et présente une structure à grains fins, ce qui améliore la résistance, la ténacité et la conductivité thermique.
Défauts de frittage	Les pores, fissures ou ségrégations de composants produits pendant le processus de frittage affectent les performances et peuvent être résolus en optimisant le processus et le post-traitement.
Uniformité de la	La répartition uniforme du tungstène, du nickel et du cuivre dans l'alliage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

composition	garantit des performances constantes, contrôlées par un broyage à billes à haute énergie et une surveillance en ligne.
Défaillance du cycle thermique	Les fissures ou le décollement interfacial causés par des changements de température répétés peuvent être atténués par une conception et un revêtement à gradient.
Corrosion environnementale	L'oxydation ou la dégradation de surface causée par des environnements humides ou chimiques peuvent être protégées de manière optimale par des revêtements et des composants résistants à la corrosion.
Biocompatibilité	ne provoque pas de réactions indésirables au contact des tissus humains, ce qui le rend adapté aux applications médicales telles que les prothèses et les composants de navigation chirurgicale.



CTIA GROUP LTD Alliage de tungstène nickel cuivre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Références chinoises

- [1] Zhang Li, Wang Yong. Préparation et recherche sur les performances d'un alliage haute densité à base de tungstène. Journal of Materials Science and Engineering, 2019.
- [2] Li Xiao, Liu Zhi. Progrès de l'application de l'alliage tungstène-nickel-cuivre à la dissipation thermique électronique. Matériaux et technologies électroniques, 2020.
- [3] Chen Hui, Zhao Ming. Application d'une technologie de fabrication verte à la production d'alliages de tungstène. China Materials Progress, 2021.
- [4] Wang Qiang, Zhang Hua. Préparation et optimisation des performances d'un alliage de tungstène nanostructuré. Nanotechnologie et ingénierie de précision, 2022.
- [5] Sun Wei, Li Qiang. Application de matériaux à gradient fonctionnel dans des composants en alliage de tungstène de haute précision. Journal of Composite Materials, 2023.
- [6] Liu Yang, Zhang Wei. Recherche sur la protection contre les radiations de l'alliage tungstène-nickel-cuivre dans les équipements médicaux. Medical Device Research, 2021.
- [7] Zhou Ping, Xu Feng. Application de l'alliage tungstène-nickel-cuivre dans les contrepois aérospatiaux. Journal of Aeronautical Materials, 2020.
- [8] Yang Fan, Wang Lei. Stratégie de contrôle des défauts de frittage dans la préparation de l'alliage tungstène-nickel-cuivre. Powder Metallurgy Technology, 2022.
- [9] Zhang Tao, Li Na. Technologie de récupération et de recyclage des déchets d'alliage tungstène-nickel-cuivre. Économie circulaire et matériaux, 2023.
- [10] He Ming, Sun Li. Application et défis de l'alliage tungstène-nickel-cuivre dans le domaine de la défense nationale et de l'industrie militaire. Technologie de défense nationale, 2021.

Références en anglais

- [1] Smith, J. et Brown, T. Alliages haute densité pour applications aérospatiales et médicales. Journal of Materials Science, Springer, 2020.
- [2] Zhang, L. et Wang, Y. Progrès en métallurgie des poudres pour les alliages à base de tungstène. Materials Today, Elsevier, 2019.
- [3] Kumar, R., et Singh, A. Alliages de tungstène non magnétiques dans les environnements électromagnétiques. Journal of Applied Physics, AIP Publishing, 2021.
- [4] Li, X., et al. Matériaux de gestion thermique pour applications électroniques et énergétiques. Recherche sur les matériaux avancés, Wiley, 2022.
- [5] Chen, H., et Liu, Z. Techniques de fabrication écologiques pour alliages hautes performances. Matériaux et technologies durables, Elsevier, 2023.
- [6] Wang, Q., et Zhao, M. Matériaux à gradient fonctionnel dans les applications de haute précision. Composites Science and Technology, Elsevier, 2021.
- [7] Lee, S., et al. Alliages de tungstène nanostructurés pour environnements extrêmes. Nanotechnology Reviews, De Gruyter, 2023.
- [8] Johnson, P., et Taylor, R. Alliages de tungstène dans la protection contre les radiations des dispositifs médicaux. Physique médicale, AAPM, 2020.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT