

## Que sont les feuilles d'alliage de tungstène

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto: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](http://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 du 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 du 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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Table des matières

### Chapitre 1 : Notions de base sur les tôles en alliage de tungstène

- 1.1 Concept des feuilles d'alliage de tungstène
  - 1.1.1 Définition des tôles en alliage de tungstène
  - 1.1.2 Différenciation par rapport aux matériaux connexes
- 1.2 Importance du développement et de la recherche sur les tôles en alliage de tungstène
  - 1.2.1 Contexte de développement basé sur l'utilisation des ressources en tungstène
  - 1.2.2 Intérêt de l'étude des tôles d'alliage de tungstène du point de vue du génie chimique
  - 1.2.3 État des tôles en alliage de tungstène dans les domaines d'application

### Chapitre deux : Système de classification des tôles en alliage de tungstène

- 2.1 Classification des tôles en alliage de tungstène selon leur composition.
  - 2.1.1 Feuilles d'alliage de tungstène de la série nickel-fer
  - 2.1.2 Tôles en alliage de tungstène de la série nickel-cuivre
  - 2.1.3 Tôles en alliage tungstène-cuivre
  - 2.1.4 Feuilles d'alliage tungstène-argent
  - 2.1.5 Autres feuilles d'alliage de tungstène à phase liante
- 2.2 Classification des tôles en alliage de tungstène selon les propriétés du noyau
  - 2.2.1 Tôles en alliage de tungstène haute densité
  - 2.2.2 Tôles en alliage de tungstène à haute dureté
  - 2.2.3 Tôles en alliage de tungstène résistantes à la corrosion et à l'usure
- 2.3 Classification des tôles en alliage de tungstène selon leurs spécifications dimensionnelles
  - 2.3.1 Feuilles d'alliage de tungstène ultra-minces (épaisseur < 0,1 mm)
  - 2.3.2 Tôles en alliage de tungstène d'épaisseur conventionnelle (0,1-10 mm)
  - 2.3.3 Tôles en alliage de tungstène à parois épaisses (épaisseur > 10 mm)
  - 2.3.4 Tôles d'alliage de tungstène de forme spéciale (sur mesure)
- 2.4 Classification des tôles en alliage de tungstène selon leurs applications
  - 2.4.1 Tôles en alliage de tungstène pour l'industrie de la défense nationale et militaire
  - 2.4.2 Tôles en alliage de tungstène pour la fabrication industrielle
  - 2.4.3 Tôles en alliage de tungstène pour applications nucléaires et médicales
  - 2.4.4 Feuilles d'alliage de tungstène pour l'information électronique
  - 2.4.5 Autres tôles en alliage de tungstène spécialisé

### Chapitre trois Principes d'alliage et systèmes de composition des tôles en alliage de tungstène

- 3.1 Principes chimiques de l'alliage dans les tôles d'alliage de tungstène
  - 3.1.1 Analyse du diagramme de phase du tungstène avec d'autres éléments métalliques
  - 3.1.2 Mécanismes chimiques de renforcement par solution solide et par dispersion
  - 3.1.3 Conditions de formation et stabilité des phases d'alliage
- 3.2 Rôles et proportions des éléments constitutifs dans les tôles en alliage de tungstène
  - 3.2.1 Mécanisme synergique du système nickel-fer dans les tôles en alliage de tungstène
  - 3.2.2 Mécanisme synergique du système nickel-cuivre dans les feuilles d'alliage de tungstène
  - 3.2.3 Effets dopants des éléments traces dans les tôles d'alliage de tungstène

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3 Règles chimiques pour la conception de la composition des tôles en alliage de tungstène
- 3.3.1 Logique d'optimisation de la composition axée sur la performance pour les tôles en alliage de tungstène
- 3.3.2 Méthodes de contrôle chimique pour l'uniformité de la composition des tôles en alliage de tungstène
- 3.3.3 Effets des éléments d'impuretés sur les propriétés des tôles en alliage de tungstène
- 3.3.4 Méthodes d'élimination des éléments d'impuretés dans les tôles en alliage de tungstène

## **Chapitre quatre : Relations structure-propriétés des tôles en alliage de tungstène**

- 4.1 Microstructure des tôles en alliage de tungstène
  - 4.1.1 Structure des grains et composition chimique des joints de grains
  - 4.1.2 Distribution et état chimique des phases de l'alliage
  - 4.1.3 Causes chimiques des structures défectueuses
- 4.2 Propriétés et mécanismes des tôles en alliage de tungstène
  - 4.2.1 Principe d'empilement atomique chimique à haute densité dans les feuilles d'alliage de tungstène
  - 4.2.2 Mécanisme de transport chimique de la conductivité thermique et électrique dans les feuilles d'alliage de tungstène
  - 4.2.3 Support structural chimique pour la stabilité thermique des tôles en alliage de tungstène
- 4.3 Corrélation entre les propriétés mécaniques et chimiques des tôles en alliage de tungstène
  - 4.3.1 Relation entre la dureté des tôles d'alliage de tungstène et la résistance de la liaison chimique
  - 4.3.2 Mécanisme de résistance à la corrosion chimique et à l'usure des tôles en alliage de tungstène
  - 4.3.3 Rôle de la barrière chimique de surface dans la résistance à la corrosion des tôles en alliage de tungstène
- 4.4 Analyse des corrélations procédé-structure-propriétés dans les tôles en alliage de tungstène
  - 4.4.1 Rôle régulateur du procédé de frittage sur la microstructure des tôles en alliage de tungstène
  - 4.4.2 Mécanisme d'influence du processus de laminage sur les propriétés mécaniques des tôles en alliage de tungstène
  - 4.4.3 Voie d'optimisation du traitement de surface pour les propriétés chimiques des tôles en alliage de tungstène
- 4.5 Réponses structurelles et propriétés des tôles en alliage de tungstène dans des environnements spéciaux
  - 4.5.1 Évolution de la stabilité structurelle des tôles en alliage de tungstène dans des environnements à haute température
  - 4.5.2 Tolérance structurale chimique des tôles en alliage de tungstène en environnement radiatif
  - 4.5.3 Lois d'évolution des propriétés des tôles en alliage de tungstène sous pression extrême
- 4.6 Fiche de données de sécurité (FDS) pour les tôles en alliage de tungstène de CTIA GROUP LTD

## **Chapitre cinq : Méthodes d'essais de performance et de caractérisation des tôles en alliage de tungstène**

- 5.1 Techniques d'analyse de la composition chimique des tôles en alliage de tungstène
  - 5.1.1 Analyse par spectroscopie d'absorption atomique et par spectroscopie d'émission de feuilles d'alliage de tungstène
  - 5.1.2 Méthode quantitative de spectroscopie de fluorescence X pour la détermination de la composition des tôles d'alliage de tungstène

### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- 5.1.3 Analyse par titrage chimique des éléments traces dans les tôles d'alliage de tungstène
- 5.2 Méthodes de caractérisation de la microstructure des tôles en alliage de tungstène
  - 5.2.1 Cartographie morphologique et de composition par microscopie électronique à balayage de feuilles d'alliage de tungstène
  - 5.2.2 Analyse de la phase et de la structure cristalline par diffraction des rayons X des feuilles d'alliage de tungstène
  - 5.2.3 Observation par microscopie électronique à transmission des défauts microscopiques dans les tôles d'alliage de tungstène
- 5.3 Normes d'essai des indicateurs de performance pour les tôles en alliage de tungstène
  - 5.3.1 Méthodes d'essai de la densité et de la compacité des tôles en alliage de tungstène
  - 5.3.2 Méthodes d'essai de dureté des tôles en alliage de tungstène
  - 5.3.3 Méthodes d'essai de la résistance à la corrosion des tôles en alliage de tungstène
  - 5.3.4 Méthodes d'essai de la résistance à l'usure des tôles en alliage de tungstène
  - 5.3.5 Méthodes d'essai de la résistance des tôles en alliage de tungstène

## Chapitre six : Procédés de préparation des tôles en alliage de tungstène

- 6.1 Procédés de préparation et classification des tôles en alliage de tungstène
  - 6.1.1 Principales méthodes de préparation des tôles en alliage de tungstène
  - 6.1.2 Différences de procédé entre les tôles en alliage de tungstène haute densité et les tôles non haute densité
  - 6.1.3 Plages d'épaisseur typiques et sélection du procédé correspondant (0,05 mm à 50 mm)
- 6.2 Préparation de la poudre de matière première
  - 6.2.1 Exigences de préparation et de qualité de la poudre de tungstène de haute pureté
  - 6.2.2 Sélection et prétraitement des poudres d'éléments d'alliage (Ni, Fe, Cu, Co, Mo, etc.)
  - 6.2.3 Contrôle de la distribution granulométrique des poudres et essais granulométriques Fisher
  - 6.2.4 Méthodes de mélange et d'alliage des poudres
- 6.3 Procédés de mise en forme des poudres
  - 6.3.1 Pressage isostatique à froid
  - 6.3.2 Optimisation du pressage et des paramètres de pression
  - 6.3.3 Application du moulage par injection aux ébauches de tôles minces
  - 6.3.4 Procédés d'amélioration de la résistance à l'état vert et de dégraissage
- 6.4 Procédés de frittage
  - 6.4.1 Technologie de frittage vertical sous atmosphère d'hydrogène
  - 6.4.2 Contrôle de la plage de température et du temps de maintien lors du frittage en phase liquide
  - 6.4.3 Procédé de frittage sous vide et de frittage intégré par pressage isostatique à chaud
  - 6.4.4 Conception des outillages de contrôle et de support de la déformation par frittage
  - 6.4.5 Assurance de l'uniformité du champ de température pour le frittage d'ébauches de plaques de grande taille
- 6.5 Travail à chaud et traitement thermique
  - 6.5.1 Procédés de forgeage par effeuillage et de laminage à chaud
  - 6.5.2 Forgeage multidirectionnel pour améliorer l'uniformité des tissus
  - 6.5.3 Recuit intermédiaire et traitement thermique de relaxation des contraintes
  - 6.5.4 Traitement par solution à haute température et refroidissement rapide

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.6 Laminage à froid et laminage à chaud pour la préparation de feuilles minces
  - 6.6.1 Répartition de la déformation totale lors du laminage à froid et programme de réduction de passe
  - 6.6.2 Application du laminage à chaud aux alliages à haute teneur en tungstène
  - 6.6.3 Contrôle de la direction de roulement et optimisation de la texture
  - 6.6.4 Procédés de prévention et d'ébavurage des bords
- 6.7 Traitement et finition de surface
  - 6.7.1 Nettoyage chimique et décapage pour éliminer les couches d'oxyde
  - 6.7.2 Nettoyage alcalin pour éliminer l'enrichissement de surface de la phase liante
  - 6.7.3 Rectification et polissage mécaniques
  - 6.7.4 Procédé de nivellement à chaud sous vide/protection à l'hydrogène
  - 6.7.5 Cisaillement de précision, découpe laser et découpe au jet d'eau

## **Chapitre sept : Applications des feuilles d'alliage de tungstène**

- 7.1 Applications des tôles en alliage de tungstène dans les domaines de la défense nationale et militaire
  - 7.1.1 Feuilles d'alliage de tungstène pour perforation de blindage
  - 7.1.2 Tôles en alliage de tungstène pour contrepoids
  - 7.1.3 Feuilles d'alliage de tungstène pour la protection
- 7.2 Applications des tôles en alliage de tungstène dans les secteurs de la fabrication de pointe
  - 7.2.1 Feuilles d'alliage de tungstène pour inserts de moule
  - 7.2.2 Tôles en alliage de tungstène pour outils de coupe
  - 7.2.3 Tôles en alliage de tungstène pour contrepoids mécaniques
- 7.3 Applications des tôles en alliage de tungstène dans les domaines nucléaire et médical
  - 7.3.1 Feuilles d'alliage de tungstène pour blindage nucléaire
  - 7.3.2 Feuilles d'alliage de tungstène pour blindage médical
  - 7.3.3 Tôles en alliage de tungstène pour environnements nucléaires
- 7.4 Applications des feuilles d'alliage de tungstène dans les domaines de l'électronique et des nouvelles énergies
  - 7.4.1 Feuilles d'alliage de tungstène pour substrats de dissipation thermique
  - 7.4.2 Feuilles d'alliage de tungstène pour emballage électronique
  - 7.4.3 Feuilles d'alliage de tungstène pour électrodes
- 7.5 Applications des feuilles d'alliage de tungstène dans les cartes
  - 7.5.1 Cartes bancaires et cartes de paiement en alliage de tungstène
  - 7.5.2 Étiquettes d'identification pour animaux de compagnie en alliage de tungstène
  - 7.5.3 Cartes personnalisées commémoratives et festival en alliage de tungstène
  - 7.5.4 Étiquettes de gestion industrielle et d'actifs en alliage de tungstène
  - 7.5.5 Étiquettes volantes en alliage de tungstène pour vêtements et articles de luxe
  - 7.5.6 Cartes de visite haut de gamme en alliage de tungstène et cartes de savoir-vivre

## **Chapitre huit : Problèmes courants et solutions pour les tôles en alliage de tungstène**

- 8.1 Problèmes et solutions liés aux matériaux de base pour les tôles en alliage de tungstène
  - 8.1.1 Problèmes liés à la composition et à la structure
    - 8.1.1.1 Problèmes de composition hétérogène dans les alliages de tungstène et méthodes d'homogénéisation

### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

- 8.1.1.2 Types de défauts de structure cristalline et stratégies de réparation
- 8.1.2 Problèmes de déviation des propriétés physiques des tôles en alliage de tungstène
  - 8.1.2.1 Causes et techniques de correction des anomalies de densité et de dureté
  - 8.1.2.2 Problèmes de conductivité thermique et de dilatation thermique inadaptées et solutions d'optimisation
- 8.2 Problèmes et solutions de production et de fabrication des tôles en alliage de tungstène
  - 8.2.1 Problèmes liés aux procédés de métallurgie des poudres
    - 8.2.1.1 Identification et mesures de contrôle des défauts de préparation des poudres
    - 8.2.1.2 Diagnostic et amélioration des procédés en cas de défaillance du procédé de frittage
  - 8.2.2 Problèmes de laminage et de formage
    - 8.2.2.1 Causes et méthodes de prévention des fissures de laminage à chaud
    - 8.2.2.2 Analyse et contrôle de la déformation des problèmes de déformation par écrouissage à froid
  - 8.2.3 Problèmes d'inspection et de contrôle de la qualité
    - 8.2.3.1 Difficultés d'application des techniques de contrôle non destructif et solutions alternatives
    - 8.2.3.2 Gestion des écarts de tolérance dimensionnelle et amélioration de la précision
- 8.3 Problèmes et solutions liés à l'application et aux performances des tôles en alliage de tungstène
  - 8.3.1 Problèmes d'application des tôles en alliage de tungstène dans l'aérospatiale
    - 8.3.1.1 Mécanismes de rupture par fatigue à haute température et traitements de renforcement
    - 8.3.1.2 Problèmes de vibrations et de charges d'impact et conception résistante aux chocs
  - 8.3.2 Problèmes d'application des feuilles d'alliage de tungstène dans le blindage contre les radiations
    - 8.3.2.1 Causes de l'atténuation et de la récupération de l'efficacité du blindage
    - 8.3.2.2 Évaluation des risques de biocompatibilité et des améliorations en matière de sécurité
  - 8.3.3 Problèmes d'application des tôles en alliage de tungstène dans les équipements électroniques et médicaux
    - 8.3.3.1 Dépannage des anomalies de conductivité et de magnétisme et modification des matériaux
    - 8.3.3.2 Protection contre la corrosion et l'oxydation et technologie de revêtement

#### Annexes :

Annexe A Normes chinoises relatives aux tôles en alliage de tungstène

Annexe B Normes internationales pour les tôles en alliage de tungstène

Annexe C Normes relatives aux tôles en alliage de tungstène en Europe, en Amérique, au Japon, en Corée et dans d'autres pays

Annexe D Tableau de terminologie pour les tôles en alliage de tungstène

Références.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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



## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

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

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

**100,000+ customers**

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

**Service commitment**

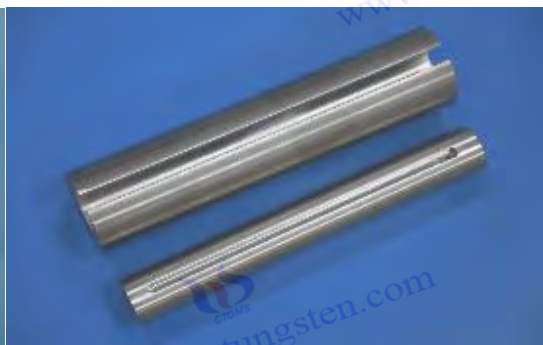
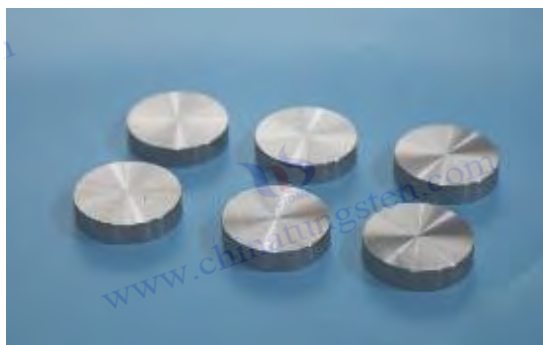
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



## Chapitre 1 : Notions de base sur les tôles en alliage de tungstène

### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

## 1.1 Le concept des feuilles d'alliage de tungstène

Les tôles en alliage de tungstène sont des matériaux dont le tungstène est le composant principal. Ces tôles sont alliées et transformées en feuilles minces. Ce matériau joue un rôle important dans les applications industrielles car il combine la densité et le point de fusion élevés du tungstène avec des performances de mise en œuvre et des propriétés mécaniques améliorées grâce à l'ajout d'autres éléments. L'apparition des tôles en alliage de tungstène a permis d'utiliser le tungstène, un métal auparavant difficile à travailler, sous forme de feuilles dans diverses applications d'ingénierie.

Les tôles en alliage de tungstène sont généralement caractérisées par une forte teneur en tungstène, les autres éléments étant sélectionnés pour optimiser leurs performances globales. Les alliages courants combinent le tungstène avec du nickel, du fer ou du cuivre, qui forment une phase liante lors du frittage, favorisant ainsi l'adhérence des particules de tungstène. L'épaisseur des tôles est souvent contrôlée à quelques millimètres près, voire au micromètre près, selon le procédé de fabrication et les exigences de l'application. Le processus de production débute par le mélange des poudres, suivi du pressage, du frittage, du formage à chaud et du formage à froid, pour obtenir des tôles aux surfaces lisses et aux bords réguliers.

En termes de performances, les tôles en alliage de tungstène présentent une bonne répartition de la densité, ce qui les rend idéales pour les applications exigeant une concentration de poids. Elles possèdent également une certaine ductilité, facilitant les opérations de pliage, d'emboutissage ou de découpe ultérieures. Le traitement thermique est crucial ; en contrôlant la température et la vitesse de refroidissement, on peut ajuster la taille des grains et la distribution des phases du matériau, influençant ainsi l'équilibre entre dureté et ténacité.

Les tôles en alliage de tungstène illustrent parfaitement l'application des techniques d'ingénierie des matériaux. Il ne s'agit pas simplement de laminier le tungstène pour l'amincir ; il faut recourir à l'alliage pour transformer sa fragilité en usinabilité. Ce matériau est de plus en plus utilisé dans l'électronique, les dispositifs médicaux et les instruments de précision car il répond aux exigences de stabilité dimensionnelle et d'adaptabilité environnementale. Grâce aux progrès des technologies de fabrication telles que la découpe laser et le laminage de précision, la gamme de spécifications des tôles en alliage de tungstène ne cesse de s'élargir, répondant ainsi à des besoins de conception variés.

### 1.1.1 Définition des tôles en alliage de tungstène

Les tôles d'alliage de tungstène sont des matériaux minces, en forme de feuilles, composés d'une matrice de tungstène et de faibles quantités d'autres éléments métalliques tels que le nickel, le fer ou le cuivre. Elles sont élaborées par métallurgie des poudres puis laminées. Le tungstène, généralement l'élément majoritaire, confère au matériau ses propriétés fondamentales de haute densité et de haute dureté, tandis que l'ajout d'éléments d'alliage améliore significativement sa plasticité et son aptitude à la mise en œuvre.

Par définition, la principale différence entre les tôles en alliage de tungstène et les autres produits en tungstène réside dans leur forme et leur composition. Lors de la fabrication, la poudre de tungstène est

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



mélangée uniformément à d'autres poudres métalliques, puis frittée en phase liquide à haute température pour former une microstructure dense. Elle est ensuite amincie progressivement jusqu'à l'épaisseur souhaitée par plusieurs passes de laminage, suivies d'un recuit pour éliminer les contraintes internes. Cette définition décrit la chaîne de transformation complète du matériau, de la poudre au produit fini.

En pratique, il convient également de tenir compte de la classification des séries d'alliages. Par exemple, la série tungstène-nickel-fer privilégie l'équilibre des propriétés mécaniques, tandis que la série tungstène-nickel-cuivre met davantage l'accent sur la conductivité électrique. La définition de ces séries repose sur le point de fusion élevé du tungstène, garantissant ainsi la stabilité dimensionnelle du matériau à haute température.

tungstène se distinguent également par leur positionnement fonctionnel : ce sont des matériaux d'ingénierie haute performance adaptés aux applications exigeant à la fois une densité élevée et une bonne formabilité. Cette définition est évolutive ; grâce à l'exploration de nouveaux éléments d'alliage, tels que le molybdène ou le rhénium, elle s'enrichit constamment pour s'adapter aux applications émergentes.

### 1.1.2 Définition et distinction avec les documents connexes

tungstène fabriquées à partir d'autres matériaux nécessitent une analyse multidimensionnelle, notamment en ce qui concerne la composition, la méthode de traitement, les caractéristiques de performance et le positionnement dans l'application, afin d'éviter toute confusion lors du choix des matériaux.

Le principal critère de comparaison est celui des tôles en alliage de tungstène. Ces dernières ne contiennent pratiquement aucun élément d'alliage et leur production repose sur le laminage de poudre de tungstène de haute pureté. Cependant, la fragilité du tungstène à température ambiante impose un traitement à haute température, ce qui rend le produit fini sujet à la fissuration. Les tôles en alliage de tungstène, quant à elles, introduisent une phase liante par alliage, permettant un laminage à plus basse température. Il en résulte une qualité de surface supérieure et une plus grande polyvalence pour les opérations de formage.

Il convient également de distinguer les tôles composites tungstène-cuivre. Ce matériau est principalement un mélange mécanique de particules de tungstène et de phases de cuivre, avec une teneur élevée en cuivre, et est préparé par infiltration en phase fondue plutôt que par frittage d'alliage. En revanche, les tôles en alliage de tungstène forment une structure de solution solide, avec une miscibilité plus uniforme entre le cuivre ou le fer et le nickel, ce qui entraîne des différences de coefficient de dilatation thermique et de conductivité thermique.

Les tôles en alliage de molybdène constituent un autre point de comparaison fréquent. Le molybdène possède une densité et un point de fusion inférieurs à ceux du tungstène, et ses tôles présentent de bonnes performances sous vide. Cependant, leur résistance à haute température est moindre que celle des tôles en alliage de tungstène. Les tôles en molybdène sont plus adaptées aux dispositifs électroniques sous

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

vide, tandis que les tôles en alliage de tungstène sont plus avantageuses pour les applications nécessitant une inertie de masse plus élevée.

Contrairement aux tôles en carbure cimenté, les tôles en alliage de tungstène ne contiennent pas de phases carbures. Les tôles en carbure cimenté sont principalement composées de particules de carbure de tungstène et de liants au cobalt ; elles présentent une dureté extrêmement élevée mais une ténacité limitée et sont principalement utilisées dans la fabrication d'outils de coupe. Les tôles en alliage de tungstène, quant à elles, privilégient un bon compromis entre densité et ductilité, ce qui les rend idéales pour l'équilibrage de composants ou le blindage de pièces.

Ces définitions précisent la place des tôles en alliage de tungstène : ce sont des tôles qui offrent un équilibre optimal entre densité, usinabilité et stabilité, répondant ainsi à des besoins spécifiques en matière de performances dans l'industrie civile. Cette distinction permet aux ingénieurs d'adapter les matériaux aux exigences particulières.

## 1.2 Importance du développement et de la recherche sur les tôles en alliage de tungstène

tungstène ont connu une évolution complète, passant de la recherche de performances individuelles à l'optimisation de performances globales. Leur développement est impulsé par les caractéristiques des ressources en tungstène, les progrès des techniques de transformation et la demande industrielle constante de matériaux haute densité et haute stabilité. Les premiers matériaux en tungstène se présentaient principalement sous des formes simples, comme des filaments et des cibles de pulvérisation cathodique. Avec l'amélioration des procédés de métallurgie des poudres et les exigences croissantes en matière d'usinabilité des matériaux haute densité, les tôles en alliage de tungstène sont progressivement devenues un axe de recherche et de production à part entière. Au milieu et à la fin du XXe siècle, la maîtrise du frittage en phase liquide a permis de densifier efficacement les alliages de tungstène, et l'introduction ultérieure du laminage multipasse et du recuit contrôlé a véritablement concrétisé la transformation des matériaux massifs en tôles minces. Ce procédé a non seulement élargi le champ d'application du tungstène, mais a également jeté les bases de sa fonctionnalisation et de la conception de pièces allégées. Actuellement, la recherche sur les tôles en alliage de tungstène s'est étendue des systèmes traditionnels tungstène-nickel-fer et tungstène-nickel-cuivre à de multiples directions de pointe telles que le dopage aux terres rares, le renforcement nanocristallin et la conception de structures à gradient, reflétant une tendance à une intégration profonde entre la science des matériaux et les besoins de l'ingénierie.

### 1.2.1 Contexte de développement basé sur l'utilisation des ressources en tungstène

Métal stratégique aux réserves relativement limitées mais largement répandu, le tungstène a toujours fait l'objet d'une utilisation efficace, un aspect crucial du développement des matériaux. Les premières ressources en tungstène étaient principalement utilisées pour la production de carbure cimenté, tandis que le minerai restant, de faible teneur, ou les matériaux recyclés étaient difficiles à transformer. L'apparition des tôles d'alliage de tungstène a ouvert une nouvelle voie de conversion pour les ressources en tungstène de moyenne et faible teneur, permettant ainsi à la poudre de tungstène, auparavant considérée comme un déchet, d'être valorisée dans des secteurs à haute valeur ajoutée.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aux alentours des années 1950, des chercheurs ont découvert que l'ajout de ferronickel ou de cupronickel permettait d'abaisser significativement la température de transition fragile du tungstène. Cette découverte a directement conduit au développement de la première génération d'alliages lourds de tungstène, principalement utilisés en masse pour les composants d'équilibrage dans l'industrie civile. Par la suite, grâce aux progrès réalisés dans la précision des équipements de laminage et les procédés de recuit, l'épaisseur a progressivement diminué, passant de quelques centimètres à quelques millimètres, puis à quelques dizaines de micromètres aujourd'hui, ce qui a permis une évolution de l'utilisation des ressources d'une production extensive à une production intensive. Au XXI<sup>e</sup> siècle, l'application industrielle de technologies de frittage avancées, telles que le pressage isostatique à chaud et le frittage par plasma étincelle, a permis d'améliorer encore la densité et l'uniformité de la microstructure des billettes, de réduire le nombre de passes de laminage suivantes et de diminuer la consommation d'énergie et les pertes de tungstène.

Ces dernières années, la production de tôles en alliage de tungstène s'oriente de plus en plus vers le recyclage des ressources tout au long du processus. Par exemple, les chutes de matériaux, la calamine et les pièces mises au rebut lors de la transformation des alliages de tungstène peuvent être reconverties en poudre de tungstène de haute pureté par réduction à l'hydrogène ou fusion au zinc, puis réintroduites dans le processus de fabrication, formant ainsi un système d'utilisation en boucle fermée relativement complet. Parallèlement, face à la diminution de la teneur en tungstène, certains instituts de recherche s'efforcent de réduire cette teneur ou de la remplacer partiellement par du molybdène ou du tantale tout en maintenant les performances, créant ainsi un système d'alliage économe en ressources. On peut dire que l'évolution des tôles en alliage de tungstène illustre parfaitement la transition d'un modèle d'utilisation « haute pureté, forte consommation » vers un modèle « haute efficacité, circulaire ». Ce processus témoigne à la fois du progrès technologique et des exigences du développement durable.

### 1.2.2 Feuilles d'alliage de tungstène du point de vue du génie chimique

Du point de vue du génie chimique, la recherche et le développement de tôles en alliage de tungstène apportent des solutions techniques à des problèmes fondamentaux tels que les réactions multiphasiques, le contrôle des interfaces de phases et l'optimisation des transferts de chaleur et de masse. Le frittage en phase liquide en métallurgie des poudres est une opération unitaire typique du génie chimique, impliquant le réarrangement des particules de tungstène, le mouillage et l'étalement de la phase liante, les mécanismes de dissolution-reprécipitation et la cinétique d'évacuation des gaz. Les chercheurs ont obtenu un contrôle précis de la porosité, de la distribution de la phase liante et de la sphéroïdisation des particules de tungstène en ajustant des paramètres tels que les profils de température de frittage, le point de rosée de l'hydrogène et les méthodes de chargement des billettes. Il s'agit essentiellement d'une application interdisciplinaire du génie des réactions chimiques et de la science des matériaux.

Les étapes de laminage et de recuit impliquent le couplage des champs de contraintes et de diffusion. Les méthodes de simulation par éléments finis et de dynamique des fluides numérique, couramment utilisées en génie chimique, ont été largement appliquées pour analyser la distribution de la température et des contraintes pendant le laminage, ainsi que le comportement de la diffusion des éléments pendant le recuit.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ceci permet d'optimiser la réduction du nombre de passes et les régimes de recuit intermédiaires, réduisant ainsi les défauts tels que le délaminage des bords et la fissuration. De plus, les traitements de surface tels que le dépôt chimique en phase vapeur et le traitement thermique sous vide sont également des opérations unitaires typiques du génie chimique qui influent directement sur la résistance à l'oxydation et la force d'adhérence du matériau en tôle.

De plus, les recherches sur le comportement des tôles d'alliage de tungstène en milieux corrosifs fournissent des données de référence importantes pour le choix des matériaux dans les équipements chimiques. Grâce à des tests électrochimiques et des expériences d'immersion, les chercheurs ont établi des modèles de vitesse de corrosion pour différents systèmes d'alliages en milieux acides, alcalins et salins, offrant ainsi un support théorique pour prolonger la durée de vie et réduire les coûts de maintenance. Du point de vue du génie chimique, les tôles d'alliage de tungstène ne sont pas seulement le produit final, mais aussi le résultat d'une série hautement intégrée de procédés chimiques et physiques précis et contrôlables. Leur intérêt pour la recherche réside dans la possibilité de reproduire ces procédés pour la mise à l'échelle industrielle de matériaux multiphasiques similaires à point de fusion élevé.

### 1.2.3 État des lieux des tôles en alliage de tungstène dans les domaines d'application

Les tôles en alliage de tungstène occupent une place incontournable dans l'industrie moderne, notamment grâce à la nécessité d'un équilibre optimal entre haute densité et bonne usinabilité. Dans le domaine des dispositifs médicaux, leurs excellentes propriétés d'atténuation des rayonnements et leur biocompatibilité en font le matériau de prédilection pour les composants essentiels tels que les collimateurs et les réseaux multilames des équipements de radiothérapie haut de gamme. La précision de leur épaisseur et la qualité de leur surface influent directement sur la précision du positionnement lors du traitement.

Dans l'instrumentation de précision et l'industrie électronique, les tôles d'alliage de tungstène sont utilisées comme composants de contrôle des vibrations et de blindage électromagnétique, tirant parti des avantages inertiels liés à leur haute densité et à leur conductivité modérée. Dans les instruments d'analyse, les balances de haute précision, les systèmes de navigation inertielle et autres équipements, les tôles d'alliage de tungstène contribuent à un équilibre optimal entre miniaturisation et grande stabilité.

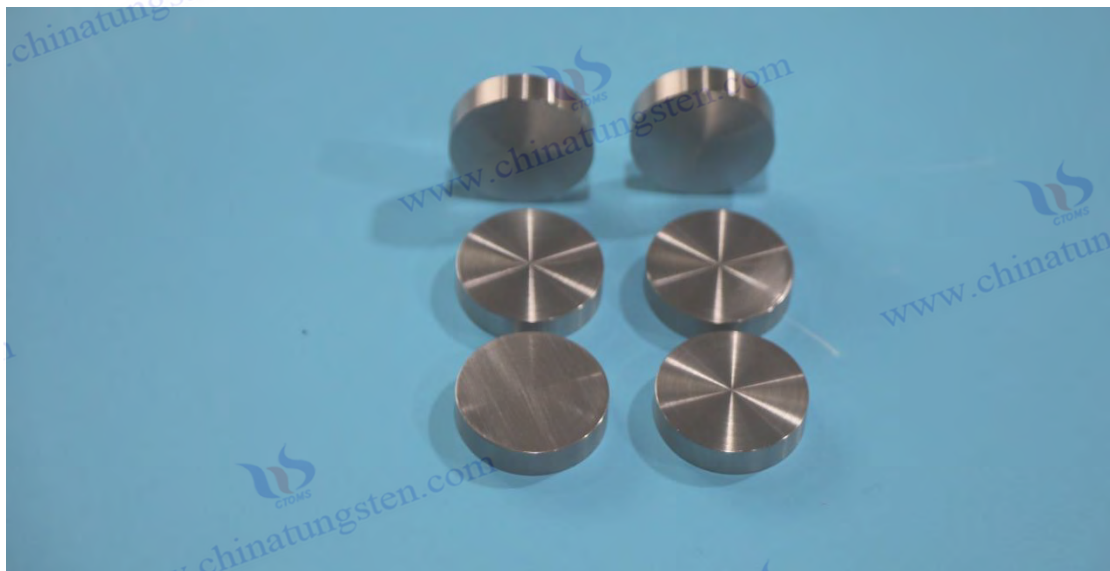
De plus, les tôles en alliage de tungstène occupent progressivement une place importante dans le domaine du revêtement sous vide et de la gestion thermique. Utilisées comme matériau de support ou de dissipateur thermique pour les cibles de pulvérisation cathodique, elles offrent un équilibre optimal entre conductivité thermique élevée et faible dilatation thermique. Ces dernières années, avec le développement rapide des énergies nouvelles et des technologies de l'information de nouvelle génération, la demande en matériaux d'interface thermique et de blindage haute performance n'a cessé de croître. Grâce à leurs propriétés uniques, les tôles en alliage de tungstène trouvent des applications non plus traditionnelles, mais aussi dans des domaines émergents.

Il convient de noter que les tôles en alliage de tungstène ne sont pas utilisées seules, mais en complément d'autres matériaux haute performance. Dans certains cas, elles sont associées à des alliages de titane et à des composites de fibres de carbone afin d'obtenir un équilibre optimal entre légèreté et fonctionnalité.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



C'est cette capacité à remplir des fonctions clés de manière autonome tout en collaborant avec d'autres matériaux qui a assuré la place de choix des tôles en alliage de tungstène dans le paysage des matériaux industriels modernes. Grâce aux progrès continus réalisés en matière de précision d'usinage et de technologies de traitement de surface, leurs domaines d'application offrent encore un potentiel d'expansion considérable.



CTIA GROUP LTD Feuilles d'alliage de tungstène  
Chapitre deux : Système de classification des tôles en alliage de tungstène

2.1 Feuilles d'alliage de tungstène selon leur composition

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](http://www.ctia.com.cn)

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

La classification des tôles en alliage de tungstène selon leur composition est la méthode la plus courante et intuitive. Cette classification reflète les différences de composition chimique de la phase liante, déterminant ainsi les différences systématiques de propriétés mécaniques, thermophysiques, électromagnétiques et d'aptitude à la mise en œuvre. Actuellement, la quasi-totalité des tôles en alliage de tungstène produites industriellement utilisent le nickel comme liant principal, car ce dernier présente une bonne mouillabilité avec le tungstène, une aptitude modérée au frittage par activation et un faible écart de dilatation thermique avec le tungstène. Selon les différents seconds composants, deux grandes séries se sont formées : nickel-fer et nickel-cuivre. On trouve également, en moindre quantité, des alliages nickel- molybdène, nickel- rhénium, ou d'autres systèmes expérimentaux, mais ceux-ci n'ont pas encore atteint le stade de la production de tôles à grande échelle. La teneur en tungstène des deux systèmes principaux se situe généralement entre 90 % et 97 %, et la quantité totale de phase liante est contrôlée entre 3 % et 10 %. En ajustant avec précision le rapport et les paramètres de traitement thermomécanique, les propriétés finales peuvent être contrôlées dans une large gamme.

### 2.1.1 Feuille d'alliage nickel-fer-tungstène

Les tôles en alliage nickel-fer-tungstène ont été les premières à être industrialisées et dominent encore aujourd'hui le marché. Leur composition typique se situe entre 90 % et 97 % de W, 2,5 % et 7 % de Ni et 0,5 % et 3 % de Fe, le rapport massique Ni/Fe étant généralement compris entre 7:3 et 8:2. Ce rapport est le fruit d'une vaste étude expérimentale menée au milieu du XXe siècle, qui a démontré qu'il permet la formation d'une quantité adéquate de phase liquide lors du frittage en phase liquide. Cette phase favorise un réarrangement suffisant des particules de tungstène tout en évitant une agglomération excessive de la phase liante ou l'apparition de phases fragiles.

Le système nickel-fer présente la particularité d'avoir une phase liante constituée d'une solution solide fer-nickel, caractérisée par un ferromagnétisme important, ce qui confère au matériau une forte réponse magnétique globale. Cette propriété lui confère un avantage certain pour les applications nécessitant un blindage magnétique ou une magnéto- actionnement. Parallèlement, l'ajout de fer réduit significativement l'énergie de défaut d'empilement de la phase liante, favorisant le processus de dissolution-reprécipitation lors des dernières étapes du frittage. Il en résulte des particules de tungstène plus sphériques et une meilleure adhérence interfaciale entre le tungstène et la phase liante. Macroscopiquement, cela se traduit par une résistance à la traction et une ténacité à la rupture supérieures.

Lors de la transformation de tôles, les systèmes nickel-fer présentent une bonne thermoplasticité et d'excellentes propriétés de travail à froid. Après frittage à haute température, la billette peut être laminée à chaud à plusieurs reprises entre 1100 °C et 1300 °C, suivie d'un recuit intermédiaire et d'un laminage à froid pour obtenir une épaisseur inférieure à 0,05 mm. Le risque de fissuration des bords est réduit lors du laminage, ce qui permet d'obtenir un rendement élevé. Le traitement thermique influe considérablement sur les propriétés finales : un recuit prolongé à basse température préserve les fines particules de tungstène et la structure fibreuse, ce qui confère une résistance mécanique supérieure ; un recuit court à haute température favorise la croissance des particules de tungstène et l'homogénéisation de la phase liante, améliorant ainsi la ductilité.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En matière de traitement de surface, les tôles en alliage nickel-fer-tungstène se prêtent aisément au nickelage chimique, au placage or ou argent, et peuvent également subir une métallisation par diffusion d'aluminium sous vide afin de former une couche protectrice, améliorant ainsi leur résistance à l'oxydation et à la corrosion. Actuellement, cette gamme de tôles est largement utilisée dans la fabrication de composants civils de précision exigeant à la fois une densité élevée et une grande fiabilité mécanique, tels que les masses pour balances analytiques haut de gamme, les blocs de balance pour instruments inertiels et les plaques d'amortissement des vibrations pour instruments optiques. Grâce aux progrès réalisés dans les équipements de laminage et les techniques de traitement thermique, l'uniformité d'épaisseur et la planéité des tôles en alliage nickel-fer-tungstène ont atteint le micromètre, répondant ainsi aux exigences strictes des instruments haut de gamme en matière de tolérance aux variations de qualité.

### 2.1.2 Feuille d'alliage nickel-cuivre-tungstène

alliages nickel-fer. Leur composition typique est de 90 à 96 % de W, de 3 à 8 % de Ni et de 1 à 5 % de Cu, avec un rapport massique Ni/Cu généralement compris entre 3:1 et 7:3. L'introduction du cuivre élimine complètement le ferromagnétisme macroscopique du matériau, ce qui en fait le choix idéal pour les environnements à champs magnétiques intenses ou exigeant une compatibilité électromagnétique élevée. Parallèlement, la conductivité thermique et électrique élevée du cuivre confère à cette série de tôles d'excellentes performances en matière de diffusion thermique et de contact électrique.

D'un point de vue microscopique, la phase liante du système nickel-cuivre est également une solution solide cubique à faces centrées. Cependant, grâce à la miscibilité infinie du cuivre et du nickel, cette phase présente une meilleure uniformité de composition. La température d'apparition de la phase liquide lors du frittage est légèrement inférieure à celle du système nickel-fer, ce qui permet de réduire la température de frittage et la croissance anormale des particules de tungstène. Le degré de sphéroïdisation des particules de tungstène est généralement plus élevé que dans le système nickel-fer, ce qui assure une meilleure propreté de l'interface. Il en résulte souvent une légère augmentation de l'allongement pour une même teneur en tungstène, mais une légère diminution de la résistance à la traction, illustrant un compromis entre résistance et plasticité.

En termes de caractéristiques de mise en œuvre, les alliages nickel-cuivre sont plus sensibles à l'oxydation. Le laminage à haute température doit être effectué sous atmosphère protectrice ou sous vide ; à défaut, une couche d'oxyde superficielle se forme facilement, ce qui nuit au laminage à froid ultérieur. Le taux d'écrouissage est légèrement inférieur à celui des alliages nickel-fer, ce qui les rend adaptés au laminage à fort taux de réduction et avantageux pour la production de feuilles ultra-minces (jusqu'à 20 µm d'épaisseur). La plage de températures de recuit est large et le matériau est insensible à la surchauffe, ce qui facilite la mise en place de lignes de production en continu.

En matière de traitement de surface, les alliages nickel-cuivre présentent intrinsèquement une bonne résistance à la corrosion et d'excellentes propriétés de contact électrique. Un simple polissage ou un nettoyage chimique léger suffit souvent à répondre aux exigences, évitant ainsi le recours à des procédés

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



de placage complexes. Côté applications, ces tôles sont principalement utilisées dans les lames de collimateur pour équipements de radiothérapie médicale, les blindages électromagnétiques, les supports de cibles de pulvérisation cathodique sous vide, les dissipateurs thermiques et d'autres applications nécessitant des propriétés non magnétiques, une conductivité thermique élevée ou une conductivité électrique élevée. Ces dernières années, face à la demande croissante de dissipation thermique pour les communications 5G et les dispositifs électroniques de puissance, les applications en tôles minces et composites d'alliage nickel-cuivre-tungstène connaissent un essor rapide, témoignant d'un fort dynamisme.

### 2.1.3 Tôle en alliage tungstène-cuivre

Les tôles en alliage tungstène-cuivre occupent une place particulière dans la classification. À proprement parler, elles appartiennent à la catégorie des pseudo-alliages ou des composites à matrice métallique, et non à celle des alliages de tungstène en solution solide au sens traditionnel. Leur composition typique est de 50 % à 90 % de W et de 10 % à 50 % de Cu, les deux phases étant quasiment immiscibles. Le cuivre est réparti en un réseau continu ou semi-continu au sein de la matrice de tungstène. Du fait de l'absence d'une phase liante d'alliage, les tôles en alliage tungstène-cuivre diffèrent fondamentalement des tôles en alliage tungstène-nickel mentionnées précédemment, tant par leur microstructure que par leurs caractéristiques de performance et leurs procédés de fabrication.

des feuilles de tungstène-cuivre repose principalement sur deux méthodes : l'infiltration à l'état fondu et le frittage par activation directe. L'infiltration à l'état fondu consiste à presser et à intersecter une structure poreuse en tungstène, puis à laisser le cuivre fondu s'infiltrer dans les pores à une température légèrement supérieure à son point de fusion. Le frittage par activation, quant à lui, implique le prémélange d'une petite quantité de nickel ou de cobalt à de la poudre de tungstène, suivi d'une densification directe en une seule étape entre 1 300 °C et 1 400 °C. Ces deux procédés permettent d'obtenir des feuilles présentant une conductivité thermique et électrique extrêmement élevée, typiquement de l'ordre de 180 à 220 W/(m · K), et une conductivité électrique atteignant 40 à 55 % IACS, avec un coefficient de dilatation thermique compatible avec celui des matériaux semi-conducteurs.

Lors de la transformation de la tôle, le cuivre-tungstène présente d'excellentes propriétés de travail à chaud et à froid grâce à la présence de cuivre. Les nuances contenant 70 à 80 % de tungstène peuvent être laminées directement à température ambiante avec des taux de réduction importants, permettant d'atteindre facilement une épaisseur finale inférieure à 0,1 mm, un excellent état de surface et quasiment sans recuit intermédiaire. Au-delà de 85 % de tungstène, un laminage à chaud sous atmosphère protectrice est nécessaire. Les principaux avantages des tôles de cuivre-tungstène sont leur caractère amagnétique, leur excellente conductivité thermique et leur forte résistance à l'érosion par arc électrique. De ce fait, elles sont largement utilisées dans les secteurs civil et industriel, notamment pour les contacts électriques haute tension, les électrodes de commutateurs à vide, les électrodes de soudage par résistance, les dissipateurs thermiques pour boîtiers électroniques et les chemises de tuyères de moteurs de fusée, qui exigent une résistance simultanée aux hautes températures, aux arcs électriques et aux chocs thermiques. Ces dernières années, avec la croissance explosive de la demande de dissipation de chaleur dans les modules IGBT haute puissance et les substrats semi-conducteurs de troisième génération, les

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

feuilles de cuivre au tungstène ultra-minces à haute teneur en tungstène (épaisseur  $< 0,3$  mm, teneur en tungstène  $\geq 85$  %) sont devenues un sujet de recherche et de production très en vogue.

#### 2.1.4 Feuille d'alliage tungstène-argent

Les tôles en alliage tungstène-argent appartiennent également à un système de pseudo-alliage, l'argent constituant une phase tendre et hautement conductrice et le tungstène une structure dure ; ces deux éléments sont insolubles l'un dans l'autre. Leur composition est généralement de 50 % à 80 % de W et de 20 % à 50 % d'Ag. Le procédé de fabrication est très similaire à celui des alliages tungstène- cuivre , reposant principalement sur la fusion à haute température et l'infiltration, mais un mélange de poudres suivi d'une solidification sous haute pression peut également être utilisé. L'argent ayant un point de fusion inférieur ( $961^{\circ}\text{C}$ ) à celui du cuivre, la température de fusion et d'infiltration est d'autant plus basse, ce qui élargit la plage de températures de mise en œuvre et réduit les exigences en matière d'équipement.

Les feuilles de tungstène-argent surpassent les feuilles de tungstène-cuivre en termes de conductivité électrique et thermique. Leur conductivité électrique atteint aisément 60 à 80 % de la conductivité thermique nominale (IACS), et leur conductivité thermique se situe entre  $250$  et  $380\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  , tout en conservant la dureté et la résistance à l'ablation élevées du tungstène. Plus important encore, l'oxyde d'argent formé sous l'effet de l'arc électrique possède une pression de vapeur élevée, ce qui facilite l'évacuation des dommages thermiques et confère au matériau une excellente résistance à l'érosion par arc et au soudage. En termes de mise en œuvre, les feuilles de tungstène-argent contenant 30 % d'argent ou plus peuvent être laminées à une épaisseur inférieure à  $0,05$  mm à froid, avec un minimum de fissuration des bords et une surface blanc argenté d'excellente qualité esthétique.

Actuellement, les feuilles d'argent de tungstène sont principalement utilisées dans les contacts électriques basse et moyenne tension, les contacts de relais de précision, les contacts électriques glissants et comme substrats pour le revêtement des parois internes de certains guides d'ondes spéciaux. Dans des domaines tels que les disjoncteurs haut de gamme à usage civil, les relais automobiles et les relais aéronautiques, les feuilles d'argent de tungstène ont progressivement remplacé les matériaux traditionnels argent-cadmium et argent-nickel en raison de leur longue durée de vie, de leur faible résistance de contact et de leurs faibles caractéristiques de transfert de matière.

#### 2.1.5 Autres feuilles d'alliage de tungstène à phase liante

Outre les systèmes classiques mentionnés précédemment, certaines tôles en alliage de tungstène utilisant des phases de liant nouvelles ou composites ont fait leur apparition ces dernières années. Celles-ci sont pour la plupart en phase de transition entre le laboratoire et l'industrialisation, ou sont produites en petites séries pour répondre à des exigences fonctionnelles spécifiques.

Système tungstène-nickel-cobalt : L'ajout de 1 % à 3 % de cobalt à une base nickel-fer ou nickel-cuivre peut améliorer considérablement la résistance de la phase liante et sa capacité à résister au ramollissement à haute température, ce qui la rend adaptée aux dissipateurs thermiques ou aux composants structurels nécessitant des températures de fonctionnement plus élevées.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Système tungstène-nickel-molybdène : le remplacement partiel du tungstène par du molybdène (de 5 % à 20 %) permet de réduire le coefficient de dilatation thermique global tout en conservant une densité élevée, améliorant ainsi l'adaptation thermique avec la céramique ou le verre. Ce système est fréquemment utilisé dans les boîtiers électroniques ou les films de transition pour l'étanchéité sous vide.

Système tungstène-terres rares : L'ajout de traces d'oxydes de terres rares tels que  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  et  $\text{CeO}_2$  améliore la température de recristallisation et la résistance à haute température grâce à un mécanisme de renforcement par dispersion, tout en affinant les grains de tungstène et en améliorant la résistance aux fissures lors du laminage de tôles minces.

TiC, Des particules de ZrC et d'autres carbures sont ajoutées à la phase liante à base de nickel pour former un renfort de troisième phase, ce qui améliore considérablement la dureté et la résistance à l'usure. Ce matériau est principalement utilisé pour les revêtements résistants à l'usure ou les inserts de moules de précision.

Système de liant tungstène-alliage à haute entropie : une nouvelle voie de recherche utilisant des poudres d'alliages à haute entropie comme FeCoNiCrMn et FeCoNiCrAl comme phases liantes pour obtenir une résistance mécanique et une résistance à l'oxydation accrues tout en conservant une densité élevée. Actuellement, ce système n'en est qu'au stade de prototypes en laboratoire.

## 2.2 Tôles en alliage de tungstène par Core Performance

La classification des tôles en alliage de tungstène selon leurs propriétés fondamentales répond directement aux exigences liées à la fonction principale de ce matériau dans les applications d'ingénierie. Actuellement, on peut distinguer trois grandes catégories de tôles en alliage de tungstène, selon leurs propriétés principales : haute densité, haute dureté et résistance à la corrosion/à l'usure. Bien que ces trois catégories présentent un certain chevauchement, leurs fonctions principales diffèrent.

### 2.2.1 Tôle en alliage de tungstène haute densité

Les tôles en alliage de tungstène haute densité sont les plus produites et les plus utilisées. Leur conception vise principalement à maximiser la densité théorique tout en conservant une usinabilité et une fiabilité mécanique suffisantes. Les densités typiques se situent entre 17,0 et 18,8 g/cm<sup>3</sup>, certaines atteignant près de 19,0 g/cm<sup>3</sup>, surpassant largement celles de la plupart des métaux utilisés en ingénierie.

Ces tôles sont composées presque entièrement d'alliages nickel-fer ou nickel-cuivre avec une teneur en tungstène de 93 % à 97 %, la proportion totale de liant étant maintenue entre 3 % et 7 %. Afin d'approcher au mieux la densité théorique, on utilise généralement, lors de la production, une poudre de tungstène fine de haute pureté, un temps de frittage en phase liquide prolongé et un pressage secondaire après pressage isostatique à chaud pour réduire la porosité à moins de 0,1 %. Le laminage consiste principalement en un laminage à chaud avec forte réduction, suivi d'un laminage à froid multipasse,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

couplé à un recuit sous vide intermédiaire rigoureux pour garantir que l'écart d'uniformité de densité dans le sens de l'épaisseur ne dépasse pas 0,5 %.

Les tôles en alliage de tungstène haute densité présentent des avantages considérables pour les applications exigeant une masse concentrée et un volume réduit. En médecine, les collimateurs multilames des appareils de radiothérapie utilisent couramment des tôles de 93W-4,9Ni-2,1Fe d'une épaisseur de 0,15 à 0,5 mm. Leur haute densité améliore l'efficacité du blindage contre les rayonnements et réduit l'encombrement, optimisant ainsi la précision des traitements et la rotation des tables. Dans le domaine des instruments de précision, ce matériau est également largement utilisé pour les contrepoids et les plateaux d'équilibrage des balances analytiques, des gyroscopes et des systèmes de navigation inertielle. L'épaisseur est généralement comprise entre 0,05 et 2 mm, avec une tolérance de densité de  $\pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ .

Ces dernières années, face à la demande croissante de contrepoids locaux pour les véhicules électriques et les dispositifs portables, les tôles d'alliage de tungstène haute densité ont évolué vers des épaisseurs ultra-minces ( $< 0,1 \text{ mm}$ ) et une finition de surface de haute qualité ( $R_a \leq 0,1 \mu\text{m}$ ). Certains produits haut de gamme intègrent des composites laminés avec des polymères ou des alliages d'aluminium, élargissant ainsi leur champ d'application dans le domaine de l'électronique grand public.

### 2.2.2 Tôle en alliage de tungstène à haute dureté

Les tôles en alliage de tungstène à haute dureté privilégient une amélioration significative de la dureté de surface et globale, nécessitant généralement une dureté Vickers comprise entre 380 et 550 HV30, certaines nuances renforcées dépassant 600 HV30. Ce type de tôle atteint l'amélioration de la dureté grâce à trois méthodes : l'optimisation de la composition, le renforcement par déformation et la dispersion de la seconde phase.

Les approches techniques courantes comprennent : l'augmentation de la teneur en tungstène à 95 %–98 % pour réduire la proportion de phase liante molle ; l'utilisation d'une phase liante à haute teneur en cobalt-nickel-fer (teneur en Co de 3 % à 8 %) pour exploiter les effets de renforcement par solution solide et par précipitation du cobalt ; le laminage à froid avec un taux de traitement total supérieur à 70 % pour former une texture fibreuse résistante et des dislocations à haute densité ; l'introduction de particules de carbure telles que TiC, ZrC et WC (fraction volumique de 2 % à 8 %) pour le renforcement par dispersion ; et le vieillissement à long terme à basse température pour précipiter de fins composés intermétalliques à partir de la phase liante.

Les tôles d'alliage de tungstène à haute dureté améliorent considérablement la résistance aux rayures, à l'indentation et à la fatigue, tout en conservant une certaine ductilité. Dans le domaine des moules de précision, utilisées comme inserts en acier inoxydable pour l'emboutissage de châssis de téléphones portables, les tôles d'alliage de tungstène d'une dureté de 450 HV ou plus permettent de multiplier par 3 à 5 la durée de vie des moules par rapport aux aciers rapides traditionnels. Dans les moules de pressage à chaud pour verre optique, les tôles d'alliage de tungstène d'une dureté superficielle de 520 HV, associées

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à des tôles d'alliage de tungstène nitrurées par implantation ionique, offrent une résistance efficace à l'adhérence du verre à haute température et à l'usure abrasive.

En outre, en horlogerie de luxe, des feuilles d'alliage de tungstène à haute dureté sont transformées en rotors ou micro-engrenages. Leur densité élevée permet d'accroître l'inertie, tandis que leur dureté élevée garantit la résistance à l'usure lors d'une utilisation prolongée. Ces dernières années, certains fabricants ont eu recours à un procédé composite de traitement thermique sous vide et de traitement cryogénique profond afin de créer un gradient de dureté superficielle sur les feuilles d'alliage de tungstène, optimisant ainsi l'équilibre entre la résistance à l'usure de surface et la ténacité du cœur.

### 2.2.3 Tôles en alliage de tungstène résistantes à la corrosion et à l'usure

Les tôles en alliage de tungstène résistantes à la corrosion et à l'usure sont principalement conçues pour des environnements de travail tels que les industries chimiques, maritimes et agroalimentaires, où elles sont en contact avec des milieux corrosifs ou abrasifs. Leur objectif principal est d'améliorer la durée de vie des matériaux exposés aux acides, aux bases, aux sels et à l'abrasion.

La principale voie de mise en œuvre comprend : la sélection d'un système de phase liante à base de cuivre à haute teneur en nickel ou de nickel-chrome, l'augmentation de la teneur en nickel à 8–12 % et de la teneur en chrome à 2–5 % pour obtenir une capacité d'autopassivation ; le dépôt chimique de nickel-phosphore ou de nickel-bore sur la surface, ou le dépôt sous vide de revêtements durs tels que CrN, TiAlN et DLC d'une épaisseur de 10–50  $\mu\text{m}$  ; l'ajout de traces d'éléments de terres rares ou de bore et de phosphore pour favoriser la formation d'un film d'oxyde protecteur plus dense dans la phase liante ; et l'utilisation d'un procédé de broyage à billes à haute énergie + frittage par plasma étincelle pour obtenir des structures composites nanocristallines ou amorphes-nanocristallines.

Dans des applications telles que les protections de turbines pour pompes chimiques, les inserts pour agitateurs de qualité alimentaire et les plaques de soupapes pour équipements de dessalement d'eau de mer, les tôles en alliage de tungstène avec un revêtement de surface et un substrat à haute teneur en nickel présentent une excellente résistance à la corrosion par piqûres et à la corrosion caverneuse. Dans des environnements très abrasifs, comme le revêtement des canalisations de boues et des tamis de classement dans les équipements de traitement des minéraux, la perte de masse des tôles en alliage de tungstène renforcées par dispersion de TiC est seulement 5 à 8 fois inférieure à celle de la fonte à haute teneur en chrome.

Il convient de mentionner que certaines tôles en alliage de tungstène résistantes à la corrosion et à l'usure adoptent également une structure à gradient : la couche superficielle est enrichie en phases liantes à haute teneur en chrome-nickel et en phases dures, tandis que le cœur conserve le rapport nickel-fer traditionnel, garantissant ainsi la résistance à la corrosion et à l'usure sans compromettre la ténacité et l'usinabilité globales. Cette conception structurale représente la stratégie la plus récente pour les tôles en alliage de tungstène destinées à des environnements de service complexes.

## 2.3 Classification des tôles en alliage de tungstène par taille et spécifications

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Le classement des tôles d'alliage de tungstène par dimensions constitue le moyen de communication le plus direct entre les fabricants et les utilisateurs finaux. L'épaisseur est le paramètre le plus critique, déterminant la difficulté de transformation, le coût et les applications possibles. Bien que la largeur et la longueur aient également une incidence, elles peuvent généralement être ajustées facilement par cisaillement, découpe laser ou découpe au jet d'eau une fois l'épaisseur définie. Actuellement, l'industrie a établi des classifications d'épaisseur relativement unifiées, qui reflètent à la fois les limites des capacités de transformation et correspondent à différents cas d'utilisation typiques.

### 2.3.1 Tôle en alliage de tungstène ultra-mince (épaisseur < 0,1 mm)

Les feuilles d'alliage de tungstène ultra-minces désignent généralement des feuilles dont l'épaisseur finale se situe entre 0,005 mm et 0,099 mm, les plus fines atteignant moins de 0,008 mm. La fabrication de ces feuilles représente le summum de la technologie de laminage des alliages de tungstène et exige des normes extrêmement élevées en matière de pureté des matières premières, d'uniformité des billettes, de précision des cylindres et de propreté de l'environnement.

La production de feuilles ultra-minces utilise généralement des systèmes nickel-fer ou nickel-cuivre avec une teneur en tungstène de 90 à 95 %, et une proportion légèrement supérieure de liant pour garantir une bonne aptitude au travail à froid. Le lingot doit d'abord être préformé en une plaque de 2 à 5 mm d'épaisseur par pressage isostatique à chaud ou laminage à chaud sous vide, suivi de plusieurs passes de laminage à froid. La réduction à chaque passe est rigoureusement contrôlée entre 5 et 15 %, et le rendement total dépasse souvent 95 %. Un recuit intermédiaire doit être effectué sous vide poussé ou sous atmosphère d'hydrogène de haute pureté afin d'éviter toute rupture fragile due à des inclusions d'oxydation. L'état de surface de la feuille finie peut atteindre une rugosité Ra inférieure à 0,05  $\mu\text{m}$ , et la tolérance d'épaisseur est de  $\pm 0,003$  mm.

Les feuilles ultra-minces en alliage de tungstène sont principalement utilisées dans les lames les plus fines des collimateurs multilames des équipements de radiothérapie médicale, les rideaux de protection contre les radiations flexibles, les films d'amortissement des vibrations pour instruments de précision, les rotors automatiques des montres haut de gamme et certains substrats électroniques flexibles. Ces dernières années, face à la demande croissante de matériaux ultra-minces et haute densité pour les dispositifs médicaux portables et les téléphones à écran pliable, des feuilles ultra-minces à base de nickel-cuivre d'une épaisseur de 0,03 à 0,07 mm ont commencé à être combinées à des polymères pour former de nouveaux films fonctionnels alliant protection et flexibilité.

### 2.3.2 Tôles en alliage de tungstène d'épaisseur conventionnelle (0,1–10 mm)

La gamme d'épaisseurs de 0,1 mm à 10 mm est actuellement la plus vaste et la plus utilisée, représentant plus de 90 % de la production totale de tôles en alliage de tungstène. La technologie de transformation pour cette gamme d'épaisseurs est très aboutie, le coût est relativement maîtrisable et la précision dimensionnelle ainsi que la constance des performances répondent aux exigences de la plupart des industries.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cette gamme d'épaisseurs couvre l'ensemble du processus, du laminage à chaud au laminage à froid. Après plusieurs passes de laminage à chaud entre 1100 et 1300 °C, l'épaisseur de la billette est réduite à 3–8 mm, puis elle est laminée à froid et subit plusieurs recuits intermédiaires pour obtenir les spécifications requises. La tolérance d'épaisseur est généralement de  $\pm 0,01$  à  $\pm 0,05$  mm, et la surface peut être polie, poncée ou traitée chimiquement selon les besoins.

Les tôles d'alliage de tungstène d'épaisseur standard couvrent la quasi-totalité des applications courantes : 0,1 à 0,5 mm pour les lames de collimateur et les plaques de protection ; 0,5 à 2 mm pour les contrepoids, les amortisseurs de vibrations et les dissipateurs thermiques ; 2 à 6 mm pour les inserts de moule et les plaques arrière de cibles ; et 6 à 10 mm sont principalement utilisées comme supports structurels ou ébauches préfabriquées. Cette diversité d'épaisseurs se retrouve également dans les traitements de surface, permettant le nickelage, le dorage, l'argentage, le placage DLC ou l'anodisation directe pour former des couches décoratives colorées, répondant ainsi à divers besoins, des applications industrielles à l'esthétique des produits de consommation.

### 2.3.3 Tôle en alliage de tungstène à parois épaisses (épaisseur > 10 mm)

Les tôles en alliage de tungstène d'une épaisseur supérieure à 10 mm sont généralement appelées tôles épaisses ou tôles à parois épaisses, leur épaisseur maximale pouvant dépasser 50 mm. Bien que ces produits ne représentent qu'un faible pourcentage de la production totale de tôles en alliage de tungstène, leur valeur élevée par tôle et la complexité de leur mise en œuvre en font une capacité de production essentielle que de nombreux fabricants conservent.

Les tôles à parois épaisses sont principalement produites par laminage à chaud, complété par un laminage à froid. Les billettes frittées ont généralement un diamètre de 300 à 500 mm. La température de laminage à chaud est contrôlée entre 1 350 et 1 450 °C, avec une réduction de 20 à 30 % par passe jusqu'à ce que l'épaisseur atteigne 12 à 15 mm. Les pièces sont ensuite laminées à tiède ou à froid pour la finition. Afin d'éviter les fissures en bordure, on utilise couramment les techniques de laminage de revêtement ou de laminage avec retenue latérale. La tolérance d'épaisseur du produit fini est généralement de  $\pm 0,1$  à  $\pm 0,3$  mm, et la surface nécessite un fraisage ou une rectification pour éliminer la couche décarburée et la calamine.

Les tôles d'alliage de tungstène à parois épaisses sont principalement utilisées dans les bases de collimateurs des grands accélérateurs linéaires médicaux, les blindages des détecteurs CT industriels, les disques d'équilibrage des grands instruments inertiels, les contrepoids pour le forage pétrolier et les absorbeurs de chaleur dans les expériences de physique des hautes énergies. Du fait de leurs dimensions importantes et de leur poids élevé, leur transport et leur usinage nécessitent souvent un outillage spécialisé. C'est pourquoi les utilisateurs finaux privilégient généralement des conceptions quasi-finies afin de minimiser les opérations de découpe ultérieures.

### 2.3.4 Feuilles d'alliage de tungstène sur mesure

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Les tôles en alliage de tungstène sur mesure désignent des tôles de formes irrégulières, extra-larges, extra-longues ou composites, dont les dimensions et l'épaisseur dépassent les normes rectangulaires. Fabriquées entièrement selon les plans du client, ces tôles témoignent de l'évolution du secteur, passant d'une production standardisée à une production axée sur les solutions personnalisées.

Les types spéciaux courants comprennent : les tôles préformées avec des emboutissages profonds, les tôles perforées avec des trous traversants ou fraisés, les tôles ultra-larges d'une largeur supérieure à 600 mm, les bandes ultra-longues d'une longueur supérieure à 2 m, les tôles fonctionnelles avec des réseaux de microstructures en surface et les tôles stratifiées directement composées de cuivre, d'aluminium, de molybdène, de céramique, etc. La production nécessite souvent des procédés spéciaux tels que des moules spécialisés, la découpe laser, le fraisage CNC, le brasage sous vide ou l'encapsulation par pressage isostatique à chaud (HIP).

Par exemple, certains dispositifs médicaux haut de gamme nécessitent des feuilles d'alliage de tungstène avec des rainures en queue d'aronde de 500 mm de large, 0,2 mm d'épaisseur et une précision de bord de 0,05 mm ; certains instruments optiques aérospatiaux requièrent des feuilles d'amortissement des vibrations en alliage de tungstène avec des surfaces polies miroir et des courbes complexes. Bien que ces produits spécialisés aient un prix unitaire élevé, le coût global est en réalité inférieur car ils réduisent directement les étapes de transformation secondaires pour les clients.

## 2.4 Tôles en alliage de tungstène selon leurs applications

La classification des tôles en alliage de tungstène selon leurs applications permet de mieux appréhender la valeur réelle de ce matériau dans différents secteurs industriels. Actuellement, les principaux domaines d'application des tôles en alliage de tungstène présentent une répartition relativement stable et couvrent le médical, la production industrielle, l'électronique et d'autres applications spécialisées.

### 2.4.1 Tôles en alliage de tungstène à usage militaire et de défense nationale

Les tôles en alliage de tungstène sont principalement utilisées dans les industries de la défense et militaires en raison de leur densité élevée, de leur résistance élevée et de leur bonne ténacité. Ces applications concernent des composants nécessitant une masse concentrée, une stabilité structurelle ou des fonctionnalités spécifiques. La forte teneur en tungstène des tôles en alliage de tungstène leur confère des avantages inertiels, tandis que la phase liante optimise l'usinabilité, permettant un formage de précision et un traitement de surface adéquat.

Dans les systèmes d'équilibrage de contrepoids, les tôles en alliage de tungstène ajustent la répartition des masses pour assurer la stabilité du système, et leur épaisseur uniforme garantit la précision. Dans les applications de protection structurelle, les tôles en alliage de tungstène exploitent leurs propriétés d'atténuation du rayonnement pour fournir un blindage mince et très efficace, tandis que les conceptions composites renforcent la résistance globale. La stabilité thermique des tôles en alliage de tungstène permet leur utilisation dans des environnements à haute température, et le revêtement de surface améliore la résistance à la corrosion.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les applications privilégient la fiabilité, les systèmes tungstène-nickel-fer étant courants et garantissant une stabilité chimique pour une utilisation à long terme. Le rôle des tôles d'alliage de tungstène dans les industries de la défense et militaires a facilité la miniaturisation des composants, et leur haute densité permet de réduire leur encombrement.

#### 2.4.2 Tôles en alliage de tungstène pour la fabrication industrielle

Dans le secteur industriel, les tôles en alliage de tungstène tirent parti de leur haute densité et de leur excellente résistance à l'usure, ce qui explique leur utilisation répandue dans divers composants d'équilibrage, d'amortissement des vibrations, de revêtements anti-usure et de moules. Dans les instruments de précision, les contrepoids, les masses des balances analytiques et les composants de navigation inertielle utilisent fréquemment des tôles haute densité à base de nickel-fer pour améliorer la stabilité des équipements grâce à un contrôle précis de la répartition des masses. Les plaques anti-vibrations des machines tournantes à grande vitesse exploitent le module d'élasticité élevé et les caractéristiques d'amortissement modérées des tôles en alliage de tungstène pour supprimer efficacement la résonance.

Dans l'industrie du moule, les tôles d'alliage de tungstène sont transformées en inserts de matrices d'emboutissage, en noyaux de moules pour le pressage à chaud du verre ou en bagues d'entrée de filières de tréfilage. Leur dureté élevée et leur résistance au ramollissement à haute température prolongent considérablement la durée de vie des moules. Les revêtements résistants à l'usure, les plaques de soupapes et les buses des équipements pétroliers et miniers utilisent également fréquemment des tôles d'alliage de tungstène renforcées de carbure pour résister aux effets conjugués de l'érosion abrasive et des milieux corrosifs.

#### 2.4.3 Tôles en alliage de tungstène pour applications nucléaires et médicales

Dans les secteurs médical et nucléaire, les feuilles d'alliage de tungstène sont principalement utilisées pour la fabrication de blindages contre les rayonnements et de composants de collimation. Les collimateurs multilames des équipements de radiothérapie utilisent couramment des feuilles à base de nickel-fer ou de nickel-cuivre d'une épaisseur de 0,1 à 2 mm, permettant une mise en forme flexible du faisceau de rayonnement par superposition de couches. Comparées au plomb traditionnel, les feuilles d'alliage de tungstène sont non toxiques, très résistantes et conservent facilement leurs bords nets, ce qui en fait le matériau de choix actuellement. Les collimateurs de détecteurs des équipements d'imagerie en médecine nucléaire et les grilles anti-diffusion des appareils PET/CT utilisent également largement les feuilles d'alliage de tungstène pour améliorer la résolution d'image. Dans le domaine des essais non destructifs industriels, tels que la détection de défauts par rayons X sur les grandes pièces moulées et le contrôle par rayons gamma des soudures de tuyauteries, des boîtiers de blindage ou des fenêtres de collimation en feuilles d'alliage de tungstène sont également nécessaires. Dans l'industrie nucléaire, des plaques d'alliage de tungstène plus épaisses sont parfois utilisées pour le revêtement des conteneurs de blindage contre les rayonnements et pour le renforcement local des réservoirs de stockage de déchets afin d'obtenir un blindage efficace dans des espaces restreints. Avec la prévalence croissante des

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

équipements de protonthérapie et d'ionothérapie lourde, la demande en feuilles d'alliage de tungstène ultra-minces et très uniformes ne cesse de croître.

#### 2.4.4 Tôles en alliage de tungstène pour applications électroniques

Dans l'industrie électronique et informatique, la demande en tôles d'alliage de tungstène se concentre principalement sur trois domaines : la gestion thermique, le blindage électromagnétique et les cibles de pulvérisation cathodique. Les puces haute puissance, les amplificateurs de puissance des stations de base 5G, les lasers et autres dispositifs utilisent fréquemment des tôles d'alliage de tungstène-cuivre ou de nickel-cuivre comme dissipateurs thermiques ou couches d'extension. Leur coefficient de dilatation thermique, similaire à celui des matériaux semi-conducteurs, et leur conductivité thermique élevée permettent de réduire efficacement la température de jonction. Ces tôles sont également souvent utilisées comme plaques arrière pour les cibles de pulvérisation cathodique sous vide. Elles sont liées à des cibles en tungstène pur ou en tungstène-rhénium par brasage ou par soudage explosif, garantissant ainsi la solidité de la liaison tout en maîtrisant les coûts.

Dans le domaine de la compatibilité électromagnétique (CEM), les feuilles d'alliage de tungstène non magnétique servent à fabriquer des blindages, des patchs absorbants ou des ressorts de mise à la terre pour les appareils sensibles aux champs magnétiques, tels que les téléphones portables, l'électronique médicale et l'avionique. Certains équipements audio haut de gamme utilisent des feuilles d'alliage de tungstène haute densité pour créer des anneaux de lestage pour les diaphragmes de haut-parleurs, afin d'améliorer la réponse dans les basses fréquences. Ces dernières années, avec le développement rapide des semi-conducteurs de troisième génération (nitrure de gallium, carbure de silicium), la demande en feuilles de cuivre-tungstène plus fines et plus conductrices thermiquement a fortement augmenté, entraînant une optimisation continue des procédés associés.

#### 2.4.5 Autres tôles en alliage de tungstène spécial

Outre les principales applications mentionnées ci-dessus, les feuilles d'alliage de tungstène jouent également un rôle unique dans certains domaines spécifiques. En horlogerie de luxe, les feuilles d'alliage de tungstène polies servent à la fabrication des rotors de montres automatiques, améliorant ainsi l'efficacité du remontage et offrant une sensation de robustesse au poignet. Dans le secteur des articles de sport, certaines têtes de clubs de golf sont incrustées de feuilles d'alliage de tungstène afin d'ajuster le centre de gravité et d'améliorer la stabilité des coups. En joaillerie et en arts décoratifs, les feuilles d'alliage de tungstène plaquées or ou noir sont utilisées pour les boîtiers de montres, les anneaux intérieurs de bagues ou les fermoirs décoratifs, et sont de plus en plus appréciées pour leur surface résistante aux rayures et leur éclat métallique unique.

En recherche scientifique, les feuilles d'alliage de tungstène sont fréquemment transformées en cibles haute densité, porte-échantillons ou revêtements locaux pour chambres à vide, utilisés dans les sources de rayonnement synchrotron et les expériences d'accélérateurs de particules. En restauration d'œuvres d'art et en conservation du patrimoine culturel, elles servent également, occasionnellement, à la fabrication de masses de précision ou au renforcement de structures. Par ailleurs, certains domaines

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

interdisciplinaires émergents, tels que les masses des moteurs de vibration pour dispositifs portables, les plateaux d'équilibrage de cardan pour drones et les masses de roues pour voitures de course, adoptent progressivement les feuilles d'alliage de tungstène afin d'allier miniaturisation et hautes performances.



CTIA GROUP LTD Feuilles d'alliage de tungstène

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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](http://www.ctia.com.cn)

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



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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

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

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

**100,000+ customers**

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

**Service commitment**

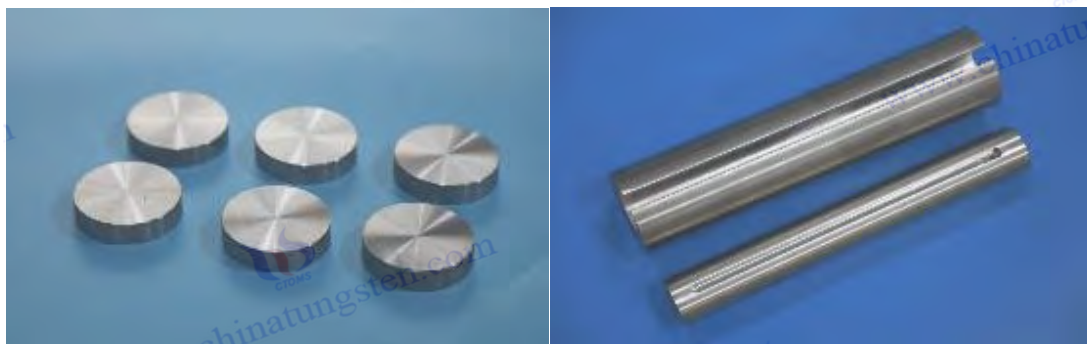
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

## Chapitre trois Principes d'alliage et systèmes de composition des tôles en alliage de tungstène

### 3.1 Principes chimiques de l'alliage des tôles en alliage de tungstène

Les tôles en alliage de tungstène sont obtenues par l'introduction de faibles quantités d'autres métaux ou composés dans le tungstène afin d'améliorer significativement sa plasticité à température ambiante, sa résistance à haute température, sa résistance à l'oxydation et son aptitude à la mise en œuvre, tout en préservant sa densité et son point de fusion élevés. Le tungstène possède une structure cubique centrée et un grand rayon atomique. À température ambiante, le tungstène pur ne présente quasiment aucun système de glissement mobile, et sa température de transition fragile atteint 300 à 400 °C, voire plus, ce qui le rend extrêmement sensible à la fissuration lors du laminage à température ambiante. L'alliage introduit une phase liante cubique à faces centrées ou hexagonale compacte qui offre des canaux de déformation plastique continus aux particules de tungstène. Simultanément, lors du frittage et du formage à chaud, une série de processus physico-chimiques se produisent, notamment la dissolution-reprécipitation, le mouillage interfacial et la régulation des contraintes interfaciales, aboutissant à la formation d'une structure composite biphasée typique dans laquelle les particules de tungstène sont encapsulées par la phase liante. Cette structure conserve la rigidité du tungstène tout en atteignant une plasticité et une ténacité macroscopiques bien supérieures à celles du tungstène pur, créant ainsi les conditions d'un laminage ultérieur à grande déformation en feuilles minces.

#### 3.1.1 Analyse du diagramme de phase du tungstène avec d'autres éléments métalliques

Le tungstène est infiniment miscible avec la plupart des métaux de transition à l'état liquide, mais sa solubilité à l'état solide est extrêmement faible. Ceci constitue la caractéristique fondamentale du diagramme de phase des alliages de tungstène en feuilles. Le diagramme de phase binaire W-Ni montre que la solubilité solide du nickel dans le tungstène ne dépasse pas 2 % atomiques à 1500 °C et est quasi nulle à température ambiante, tandis que la solubilité du tungstène dans le nickel est légèrement supérieure, mais reste limitée. Les systèmes W-Fe, W-Cu, W-Co, W-Mo et autres présentent également des caractéristiques similaires : une large zone de phase liquide existe à haute température, ce qui facilite le frittage en phase liquide ; à basse température, des systèmes eutectiques ou péri-eutectiques quasi totalement immiscibles se forment. C'est cette caractéristique de « miscibilité à haute température et de séparation à basse température » qui permet aux alliages de tungstène d'obtenir une sphéroïdisation et une densification des particules de tungstène grâce au mécanisme de maturation d'Ostwald pendant l'étape de frittage en phase liquide, tout en formant une structure biphasée avec des particules de tungstène et une phase liante clairement séparées après refroidissement à l'état solide.

Les systèmes W-Cu et W-Ag sont plus extrêmes ; même à l'état liquide, ils ne sont que partiellement miscibles et ne forment aucun composé à l'état solide, ce qui en fait des pseudo-alliages typiques. En revanche, les systèmes W-Mo et W-Re permettent au molybdène et au rhénium de former des solutions solides continues avec le tungstène. Cette caractéristique peut être exploitée pour ajuster le coefficient de dilatation thermique ou augmenter la température de recristallisation en remplaçant partiellement le tungstène par du molybdène ou du rhénium. Le diagramme de phase ternaire W-Ni-Fe est le plus couramment utilisé en production. Au voisinage de la température d'apparition du liquidus, on observe

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

une large zone biphasée composée d'une phase liquide et d'une phase solide de tungstène. Lorsque le rapport nickel/fer est compris entre 7:3 et 8:2, la quantité de phase liquide est modérée, suffisante pour mouiller les particules de tungstène sans provoquer l'affaissement du lingot. L'analyse du diagramme de phase fournit une base directe pour la conception de la composition : la quantité totale de phase liante est généralement maintenue entre 3 % et 10 % en volume. Un volume trop faible entraîne un mouillage insuffisant et une faible densité, tandis qu'un volume trop élevé réduit considérablement la densité et la dureté.

### 3.1.2 Mécanismes chimiques du renforcement par solution solide et du renforcement par dispersion

Les tôles en alliage de tungstène proviennent de la phase liante. Des éléments tels que le nickel, le fer, le cuivre et le cobalt sont infiniment miscibles dans la phase  $\gamma$  cubique à faces centrées, formant des solutions solides substitutionnelles. La dissolution du tungstène, du molybdène et du rhénium, éléments de plus grand rayon atomique, dans la phase liante à base de nickel induit une distorsion du réseau cristallin, entravant le mouvement des dislocations et augmentant ainsi la limite d'élasticité de la phase liante elle-même. L'ajout de cobalt est particulièrement efficace car il réduit l'énergie de défaut d'empilement, favorise le glissement dévié et le maclage, et améliore encore la capacité d'écrouissage. Le fer et le cuivre réduisent, dans une certaine mesure, l'énergie de défaut d'empilement de la phase liante, facilitant la coordination de la déformation et améliorant indirectement la plasticité globale.

Le renforcement par dispersion est le mécanisme clé permettant aux tôles d'alliage de tungstène d'atteindre une résistance et des performances à haute température élevées. Lors du frittage, la solubilité du tungstène dans la phase liante diminue fortement avec la température, ce qui provoque la redéprécipitation d'atomes de tungstène sursaturés sous forme de particules extrêmement fines lors du refroidissement. Ces atomes se fixent à l'interface tungstène/liante et forment une couche de renforcement interfaciale. Simultanément, l'ajout artificiel de particules de seconde phase telles que TiC, ZrC, Le HfC et les oxydes de terres rares ne se dissolvent pas lors du frittage et sont uniformément répartis dans la phase liante ou à l'interface, ce qui freine efficacement la migration des dislocations et des joints de grains. Ces dernières années, la taille des particules de tungstène a été encore réduite à moins de 100 nm dans la fabrication de tôles d'alliage de tungstène nanocristallin, ce qui améliore considérablement la résistance grâce à la relation de Hall-Petch. La synergie de ces deux mécanismes de renforcement permet aux tôles d'alliage de tungstène de conserver une résistance élevée même au-delà de 900 °C.

### 3.1.3 Conditions de formation et stabilité des phases d'alliage

Les principales phases d'alliage des tôles d'alliage de tungstène comprennent une solution solide de tungstène, une phase liante  $\gamma$ - (Ni, Fe, Cu) et d'éventuelles phases intermétalliques ou d'oxydes dispersés. La formation de la phase  $\gamma$  dépend de la diffusion et de l'homogénéisation suffisantes des éléments du liant lors du frittage en phase liquide. La température de frittage doit être d'environ 50 à 100 °C supérieure au point eutectique le plus bas et maintenue à cette température pour permettre le réarrangement et la sphéroïdisation des particules de tungstène. Le contrôle des traces de vapeur d'eau dans une atmosphère d'hydrogène influe sur la teneur en oxygène ; une teneur trop élevée conduit à la formation de  $WO_2(OH)$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



2 volatil, entraînant des pertes de tungstène, tandis qu'une teneur trop faible provoque une mauvaise ventilation et la fermeture des pores.

La stabilité à long terme de la phase liante est principalement contrôlée par l'énergie interfaciale et la différence de dilatation thermique entre le tungstène et la phase liante. L'angle de mouillage à l'interface entre le tungstène et le nickel, le fer et le cuivre est proche de  $0^\circ$  à la température de frittage en phase liquide. Après refroidissement, la liaison interfaciale est principalement métallique, ce qui confère une résistance élevée. Les contraintes interfaciales résiduelles dues à la différence des coefficients de dilatation thermique peuvent être partiellement relâchées lors du recuit, mais des températures excessivement élevées peuvent induire des vides de Kirkendall ou des phases interfaciales fragiles (telles que  $Ni_4W$ ). L'ajout de traces de terres rares ou de bore et de phosphore peut entraîner leur ségrégation à l'interface, formant de minces films amorphes ou composites et améliorant ainsi la stabilité de l'interface à haute température. Sous vide ou en atmosphère neutre, les tôles d'alliage de tungstène peuvent être utilisées pendant de longues périodes à plus de  $1000^\circ C$  sans transformation de phase significative ni grossissement de la microstructure. En revanche, à l'air libre, un revêtement de surface est nécessaire pour protéger la phase liante et inhiber l'oxydation préférentielle.

### 3.2 Rôle et proportion des éléments constitutifs dans les tôles en alliage de tungstène

Le rôle et la proportion des éléments constitutifs dans les tôles d'alliage de tungstène sont des aspects fondamentaux de la conception des alliages. En sélectionnant et en contrôlant judicieusement les proportions de tungstène, d'éléments liants et d'additifs en traces, il est possible d'optimiser les performances de mise en œuvre, le comportement mécanique et l'adaptabilité environnementale du matériau, tout en conservant une densité et un point de fusion élevés. Le tungstène, élément principal, confère au matériau sa densité et sa stabilité à haute température, tandis que les éléments liants tels que le nickel, le fer et le cuivre contribuent à améliorer sa résistance à la fragilité et à favoriser sa densification. La conception des proportions repose généralement sur l'analyse des diagrammes de phases, la cinétique de frittage et des essais thermomécaniques afin de garantir que chaque élément exerce pleinement ses effets de mouillage et de diffusion lors du frittage en phase liquide et forme une structure biphasée stable à l'état solide. Une teneur excessive en tungstène peut entraîner une plasticité insuffisante, tandis qu'une trop grande quantité de phase liante réduit la densité globale ; par conséquent, les proportions doivent être ajustées en fonction de l'application. Par exemple, pour les applications exigeant une dureté élevée, la proportion de tungstène peut être augmentée en conséquence, tandis que pour les systèmes où la conductivité thermique est importante, la teneur en éléments tels que le cuivre sera accrue. L'ajout d'éléments traces affine la microstructure, inhibe la croissance des grains ou améliore la résistance interfaciale, mais leurs proportions doivent être strictement contrôlées afin d'éviter l'introduction de phases indésirables. Globalement, le rôle des éléments constitutifs se traduit par une synergie multi-échelle : renforcement par solution solide à l'échelle atomique, régulation de l'interface de phase à l'échelle micrométrique et équilibre des performances à l'échelle macroscopique. Ce principe de dosage s'applique non seulement aux systèmes nickel-fer et nickel-cuivre traditionnels, mais aussi aux nouveaux systèmes composites, permettant ainsi aux ingénieurs des matériaux d'adapter la composition des alliages à des besoins spécifiques.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lors de la formulation, la pureté et la granulométrie de la poudre de tungstène ont un impact significatif sur les performances finales. Une poudre fine de haute pureté favorise une distribution uniforme et réduit la porosité, tandis que les éléments de la phase liante sont généralement ajoutés sous forme de poudre métallique ou de poudre pré-alliée pour garantir un mélange homogène. Le choix de la température de frittage est étroitement lié à la formulation ; une proportion plus élevée de phase liante permet d'abaisser la température de frittage, de réduire la consommation d'énergie et d'inhiber le grossissement des particules de tungstène. L'optimisation de la formulation lors du traitement thermique implique la conception du régime de recuit, le contrôle de la distribution des éléments dans la solution solide par la régulation de la vitesse de refroidissement afin d'obtenir un équilibre entre résistance et ténacité. La formulation doit également être prise en compte lors du traitement de surface ; par exemple, l'ajustement de la concentration des éléments de surface avant le revêtement permet d'améliorer l'adhérence. La composition des tôles d'alliage de tungstène est également influencée par la disponibilité des ressources et les facteurs environnementaux ; le fer ou le cuivre peuvent provenir de matériaux recyclés, mais les impuretés doivent être maîtrisées et rester dans des limites acceptables.

### 3.2.1 Mécanisme synergique des feuilles d'alliage de tungstène dans le système nickel-fer

Le mécanisme synergique du système nickel-fer dans les tôles d'alliage de tungstène repose principalement sur la complémentarité du nickel et du fer dans la phase liante et leur interaction interfaciale avec les particules de tungstène. Dans ce système, le nickel, principal élément liant, assure une bonne mouillabilité et une bonne ductilité, tandis que l'ajout de fer renforce la solution solide et stabilise les phases. Ensemble, ils favorisent le bon déroulement du frittage en phase liquide. Aux premiers stades du frittage, le nickel et le fer forment une phase liquide à bas point de fusion, enrobant rapidement les particules de tungstène, ce qui induit un réarrangement des particules et une densification initiale. La présence de fer réduit la viscosité de la phase liquide, augmente la vitesse de diffusion et facilite la dissolution des atomes de tungstène dans la phase liante, entraînant la précipitation de fines particules lors du refroidissement et renforçant ainsi l'interface. L'effet synergique se reflète également dans l'évolution de la microstructure : la solution solide nickel-fer présente une structure cubique à faces centrées, capable d'absorber efficacement les contraintes de déformation et de réduire le contact direct entre les particules de tungstène, améliorant ainsi la plasticité globale. Lors de la mise en forme à chaud, cette synergie rend le matériau moins sujet à la propagation des fissures pendant le laminage, et la microstructure retrouve son uniformité après recuit.

D'un point de vue chimique, la différence de structure électronique entre le nickel et le fer induit une distorsion du réseau cristallin dans la solution solide, entravant le mouvement des dislocations et renforçant la phase liante. Simultanément, le ferromagnétisme du fer influence les propriétés électromagnétiques sans toutefois modifier la dominance non magnétique du système. À l'interface, le nickel tend à former des liaisons nettes, tandis que le fer favorise la présence stable de petits oxydes, contribuant ainsi à l'augmentation de l'énergie interfaciale. Lors du refroidissement, l'effet synergique des deux inhibe la croissance anormale des particules de tungstène, maintenant une morphologie sphérique fine, avantageuse pour l'écrouissage ultérieur. À l'échelle microscopique, ce mécanisme repose sur une dissolution-reprécipitation : à haute température, le tungstène se dissout partiellement dans la phase nickel-fer, et à basse température, il reprécipite et bloque les joints de grains, améliorant ainsi la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

stabilité à haute température. À l'échelle macroscopique, cela se traduit par une stabilité dimensionnelle du matériau lors de cycles thermiques répétés, le rendant adapté aux applications exigeant une résistance à la fatigue thermique. Le contrôle des proportions est essentiel à l'efficacité de ce mécanisme. Le rapport nickel/fer est généralement ajusté pour équilibrer les effets de mouillage et de renforcement. Une teneur excessive en fer peut engendrer une phase fragile, tandis qu'une quantité appropriée optimise la ténacité.

Une analyse plus approfondie révèle que l'effet synergique s'étend au comportement à la corrosion : le nickel constitue la base du film de passivation, tandis que le fer contribue à sa distribution uniforme, améliorant ainsi la résistance à la corrosion en milieu acide. En termes de performances de traitement, le recuit inter-passes exploite l'effet synergique des deux éléments pour restaurer la microstructure et réduire l'accumulation de contraintes résiduelles. Concernant l'adaptabilité environnementale, ce système permet un réglage précis pour faire face à différentes conditions d'humidité ou de température, garantissant une fiabilité à long terme. En résumé, le mécanisme synergique du système nickel-fer incarne les principes de la science des matériaux que sont la complémentarité inter-éléments et l'interaction multi-échelle, offrant une base solide pour les applications d'ingénierie des tôles en alliage de tungstène.

### 3.2.2 Mécanisme synergique du système nickel-cuivre en tôle d'alliage de tungstène

Le mécanisme synergique du système nickel-cuivre dans les tôles d'alliage de tungstène repose sur la miscibilité infinie du nickel et du cuivre, ainsi que sur le comportement chimique interfacial unique avec le tungstène. Dans ce système, le nickel assure la résistance de la liaison et le mouillage, tandis que l'ajout de cuivre améliore significativement la conductivité thermique et électrique. Ensemble, ils forment une phase liante en solution solide uniforme, favorisant la densification et l'optimisation de la microstructure lors du frittage. Lors de la phase liquide, la phase liquide nickel-cuivre présente une faible tension superficielle, ce qui lui permet de s'étaler et de recouvrir facilement les particules de tungstène, assurant ainsi un réarrangement efficace. La présence de cuivre accroît la fluidité de la phase liquide, accélère la diffusion et la migration des atomes de tungstène et forme une couche interfaciale plus fine lors de la solidification, réduisant ainsi la porosité résiduelle. Cet effet synergique se traduit par des propriétés thermophysiques exceptionnelles : la solution solide nickel-cuivre combine la ductilité du nickel et les caractéristiques de diffusion thermique du cuivre, conférant au matériau une excellente stabilité sous choc thermique. Lors de la transformation, ce mécanisme permet au matériau de coordonner sa déformation lors du laminage à chaud et à froid, évitant ainsi la séparation des couches.

Du point de vue des mécanismes chimiques, la taille atomique similaire du nickel et du cuivre assure une distribution désordonnée dans la solution solide, induisant une légère contrainte du réseau cristallin et une résistance accrue de la phase. Simultanément, le caractère non magnétique du cuivre empêche la magnétisation globale du système, le rendant ainsi adapté aux environnements sensibles aux ondes électromagnétiques. Lors des interactions interfaciales, le nickel favorise la liaison chimique, tandis que le cuivre contribue à l'adsorption physique, formant ensemble une interface à faible énergie et améliorant la durabilité de la liaison. Concernant l'évolution lors du refroidissement, les deux éléments agissent en synergie pour limiter la sphéroïdisation irrégulière des particules de tungstène, préservant ainsi l'homogénéité de la microstructure et facilitant la production de feuilles ultra-minces. À l'échelle

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

micrométrique, ce mécanisme repose sur un équilibre thermodynamique : les atomes de tungstène se dissolvent à haute température et précipitent à basse température, formant des particules de renforcement dispersées qui améliorent la résistance au fluage à haute température. Macroscopiquement, le matériau conserve une conductivité thermique uniforme même en présence de gradients de température, ce qui le rend idéal pour les composants de gestion thermique. En termes de résistance à la corrosion et aux intempéries, le nickel et le cuivre agissent en synergie pour favoriser la formation rapide d'un film de passivation de surface, améliorant ainsi la protection en milieu humide ou en présence de brouillard salin. Lors de l'optimisation par laminage, le recuit exploite les différences de diffusion entre les deux éléments pour corriger les défauts cristallins et améliorer la qualité de surface. En conditions environnementales, ce système permet un ajustement précis des proportions afin de s'adapter à différentes atmosphères oxydantes, garantissant ainsi des variations progressives et maîtrisables des propriétés du matériau lors d'une exposition prolongée.

### 3.2.3 Effet dopant des éléments traces sur les tôles en alliage de tungstène

tungstène influencent principalement la microstructure et les propriétés du matériau par ségrégation aux joints de grains, modification des interfaces de phase et perturbation de la solution solide. Cet effet est particulièrement marqué dans les systèmes traditionnels nickel-fer ou nickel-cuivre. L'ajout de traces de terres rares, de bore, de phosphore, de cobalt, etc., permet d'affiner les particules de tungstène, d'améliorer la ténacité de la phase liante et d'accroître l'homogénéité globale. Lors du frittage, les dopants ont tendance à s'accumuler en phase liquide, réduisant l'énergie de surface, favorisant une distribution uniforme des particules de tungstène et inhibant leur croissance. Après dopage, la microstructure devient plus stable, avec une porosité réduite et une densité accrue. Lors de la mise en forme à chaud, cet effet contribue à réduire l'amorçage des fissures, accélère la relaxation des contraintes lors du recuit et améliore la limite d'élasticité.

D'un point de vue mécanistique, le dopage aux terres rares, comme le lanthane et l'yttrium, forme des phases d'oxyde dispersées qui ancrent les joints de grains, freinent leur migration et augmentent la température de recristallisation. Le bore et le phosphore forment des films minces aux interfaces, ajustant les angles de mouillage et renforçant l'adhérence interfaciale. Le dopage au cobalt consolide la solution solide du liant, accroît l'énergie de défaut d'empilement et améliore la compatibilité avec la déformation. À l'échelle microscopique, le dopage induit des variations localisées de la densité électronique, influençant la cinétique de diffusion et provoquant la précipitation de phases fines à basse température, ce qui renforce davantage le matériau. À l'échelle macroscopique, il en résulte un équilibre des propriétés mécaniques, avec une ténacité et une dureté coordonnées, le rendant adapté aux composants de précision.

En matière de résistance à la corrosion, les éléments dopants favorisent la formation de films de passivation, améliorant ainsi la résistance à l'érosion. Lors du traitement de surface, le dopage améliore l'adhérence du revêtement et prolonge sa durée de vie. En matière d'adaptation environnementale, cet effet permet des ajustements ciblés pour faire face aux variations de température et d'humidité. En résumé, l'effet dopant des éléments traces illustre le principe fondamental selon lequel de faibles ajouts ont un impact significatif, offrant une approche efficace pour optimiser les performances des tôles d'alliage de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



tungstène. La vérification expérimentale montre que cet effet peut orienter les nouvelles stratégies de dopage et stimuler les progrès continus en science des matériaux.

### 3.3 Principes chimiques de la conception de la composition des tôles en alliage de tungstène

de tungstène repose principalement sur l'équilibre de phases, la cinétique de diffusion et le comportement chimique interfacial. Ces principes guident l'ensemble du processus, de la préparation des matières premières au traitement thermique final, garantissant ainsi la stabilité et la reproductibilité des propriétés du matériau. La conception de la composition repose essentiellement sur le contrôle du rapport tungstène/éléments de la phase liante. L'analyse du diagramme de phases permet de prédire les structures de phases potentielles et d'éviter la formation de phases indésirables. Par exemple, dans le système tungstène-nickel-fer, les principes chimiques mettent l'accent sur l'équilibre du rapport nickel/fer afin de maintenir la mouillabilité lors du frittage en phase liquide et la stabilité de la solution solide après refroidissement. Les principes de diffusion nécessitent la prise en compte des vitesses de migration des éléments à haute température. Les atomes de tungstène diffusent plus lentement que le nickel ou le cuivre ; par conséquent, la conception requiert un temps de maintien plus long pour favoriser une distribution uniforme. Les principes chimiques interfaciaux concernent l'énergie de liaison entre les particules de tungstène et la phase liante. Des éléments traces sont souvent introduits lors de la conception pour ajuster la tension superficielle et améliorer la résistance de la liaison interfaciale.

En pratique, les principes chimiques prennent également en compte l'équilibre redox. Le point de rosée de l'hydrogène de l'atmosphère de frittage doit être adapté à la composition afin d'inhiber l'oxydation du tungstène et de favoriser la réduction de la phase liante. Lors de la formulation, une teneur en tungstène plus élevée requiert une augmentation de la phase liante pour compenser la perte de plasticité, tandis qu'une phase liante excessive nécessite des ajustements pour maintenir la densité. Le traitement thermique suit les principes de transformation de phase, en contrôlant la vitesse de refroidissement afin de réguler la taille et la distribution des phases précipitées et d'optimiser les propriétés mécaniques. Les principes de chimie de surface se reflètent dans la conception du revêtement ; la composition doit être compatible avec la solution de placage pour éviter les problèmes d'adhérence dus à la ségrégation des éléments. Dans une optique environnementale, des principes guident l'utilisation d'éléments recyclés, mais la teneur en impuretés telles que l'oxygène et le carbone doit être contrôlée afin d'éviter l'introduction de phases fragiles.

#### 3.3.1 Logique d'optimisation de la composition axée sur la performance pour les tôles en alliage de tungstène

La logique d'optimisation de la composition des tôles d'alliage de tungstène, axée sur la performance, part des exigences de l'application finale et remonte le fil pour déduire les proportions d'éléments et leur ordre d'ajout, garantissant ainsi un équilibre harmonieux des propriétés telles que la densité, la dureté, la conductivité thermique et la ductilité. Cette logique identifie d'abord les propriétés clés ; par exemple, pour obtenir une densité élevée, elle privilégie l'augmentation de la proportion de tungstène tout en ajustant la phase liante afin de préserver la transformabilité. Le processus d'optimisation comprend plusieurs itérations : la proportion initiale est estimée à partir du diagramme de phases pour déterminer

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



la teneur en phase liquide, et des ajustements sont effectués après vérification expérimentale pour correspondre au taux de retrait au frittage. Cette logique met l'accent sur la synergie entre les éléments ; par exemple, le nickel apporte la ductilité, tandis que le fer ou le cuivre renforcent la structure ou améliorent la conductivité thermique, et l'optimisation de leur proportion permet d'améliorer la stabilité thermique. Le microdopage sert de méthode d'ajustement fin ; les terres rares affinent la microstructure, et le bore et le phosphore modifient l'interface pour améliorer la résistance à la corrosion.

La logique intègre également la prise en compte des compromis de performance. Pour une dureté élevée, la teneur en tungstène est augmentée et des carbures sont ajoutés, mais la diminution de la ténacité doit être surveillée et l'équilibre rétabli par une optimisation du recuit. Pour la conductivité thermique, la proportion de cuivre est augmentée, mais elle doit éviter une phase liquide excessive qui engendrerait une microstructure poreuse. Lors de l'optimisation, des outils de simulation chimique aident à prédire les trajectoires de formation des phases, contribuant ainsi à réduire le nombre de cycles expérimentaux. Le retour d'information sur le traitement thermomécanique est intégré à la logique ; l'analyse des défauts de laminage guide l'ajustement précis de la composition, par exemple par l'ajout de cobalt pour améliorer la coordination de la déformation. Pour la performance environnementale, l'optimisation se concentre sur la formation de phases résistantes à la corrosion, et le taux d'ajout de chrome ou de molybdène est ajusté en fonction du type de milieu. La logique globale forme une boucle fermée : définition des exigences – conception des proportions – vérification de la préparation – essais de performance – ajustement itératif, assurant une corrélation étroite entre la composition et la performance. Grâce à cette logique, les tôles d'alliage de tungstène peuvent répondre à diverses exigences dans des domaines tels que l'instrumentation de précision et la gestion thermique, démontrant ainsi l'orientation pratique de la conception des matériaux.

### 3.3.2 Méthodes de contrôle chimique de l'homogénéité de composition des tôles en alliage de tungstène

Le contrôle chimique de l'homogénéité de composition des tôles d'alliage de tungstène est principalement assuré par le mélange des poudres, l'ajustement des paramètres de frittage et la diffusion lors du traitement thermique. Ces méthodes garantissent un contrôle qualité à chaque étape, de la matière première au produit fini, en évitant les fluctuations de performance dues à la ségrégation et à l'hétérogénéité. Lors du mélange des poudres, on utilise notamment l'alliage mécanique ou le séchage par atomisation pour garantir une distribution uniforme d'éléments tels que le tungstène, le nickel et le fer à l'échelle micrométrique. Des additifs chimiques, comme des tensioactifs, facilitent la dispersion des poudres. Au frittage, la régulation de la quantité de phase liquide est cruciale. La conception d'un gradient de température favorise un mouillage uniforme, et le flux d'hydrogène élimine les impuretés volatiles, réduisant ainsi l'enrichissement local. L'ajustement de la vitesse de refroidissement limite la diffusion inégale des éléments, et un refroidissement rapide permet d'obtenir un état homogène.

Les méthodes de traitement thermique comprennent un recuit sous vide pour favoriser la diffusion à l'échelle atomique, éliminer les gradients de concentration et homogénéiser davantage le matériau par cycles de recuit successifs. Les méthodes de traitement chimique de surface, telles que l'implantation ionique ou le dépôt chimique en phase vapeur, permettent de déposer une couche uniforme sur la surface

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la tôle, améliorant ainsi son homogénéité globale. En matière de contrôle qualité, les analyses chimiques permettent d'optimiser les méthodes, par exemple en ajustant les proportions après la détection de zones de ségrégation par spectroscopie. Les méthodes respectueuses de l'environnement utilisent des poudres pré-alliées afin de réduire les risques de mélange hétérogène.

### 3.3.3 Influence des éléments d'impuretés sur les performances des tôles en alliage de tungstène

Les impuretés présentes dans les tôles d'alliage de tungstène proviennent principalement de la poudre de tungstène brute, de la poudre de liant, des gaz introduits lors de la transformation et des résidus d'équipement. Même des concentrations extrêmement faibles peuvent affecter significativement la microstructure, les propriétés mécaniques et l'adaptabilité environnementale. Parmi les impuretés courantes, on trouve l'oxygène, le carbone, l'azote, le phosphore, le soufre, le silicium, le potassium, le sodium et le calcium, l'oxygène et le carbone ayant l'impact le plus important.

Lorsque l'oxygène est présent sous forme libre ou d'oxyde, il forme facilement un film d'oxyde mince à la surface des particules de tungstène, réduisant ainsi la mouillabilité lors du frittage en phase liquide, affaiblissant la liaison interfaciale et provoquant des micropores ou des inclusions localisées. Ceci, à son tour, diminue la ténacité à la rupture et augmente la tendance à la fissuration par laminage. L'oxygène réagit également avec le tungstène à haute température pour former des oxydes volatils, rugosifiant la surface des particules, entravant leur réarrangement et affectant la densité finale. La présence de carbone est plus complexe : des traces de carbone peuvent former de fins carbures avec le tungstène, assurant un certain renforcement par dispersion, mais un excès de carbone se ségrège aux joints de grains ou aux interfaces, formant du WC ou du  $W_2C$  fragiles, affaiblissant considérablement la résistance interfaciale et augmentant la tendance à la rupture intergranulaire sous contrainte. L'azote est généralement réduit et éliminé sous atmosphère d'hydrogène à haute température, mais l'azote résiduel forme des phases aciculaires de nitrure avec le tungstène, constituant également des sites d'amorçage de fissures. Même des traces d'éléments comme le phosphore et le soufre s'accumulent facilement dans la phase liante ou à l'interface, formant des composés à bas point de fusion, ce qui réduit la résistance à haute température et induit une fragilisation à chaud. Les métaux alcalins tels que le potassium et le sodium, ainsi que le calcium et le silicium, proviennent principalement des résidus du procédé de fabrication du tungstate pour la préparation de la poudre de tungstène. Ils se volatilisent ou forment des pores pendant le frittage, perturbant la continuité de la structure et provoquant, dans les cas les plus graves, des bulles ou un délaminage.

Les impuretés ont également un effet synergique sur les performances. Par exemple, la présence simultanée d'oxygène et de phosphore facilite la formation d'une phase vitreuse phosphatée qui encapsule les particules de tungstène, entrave le processus de dissolution-reprécipitation et provoque des irrégularités de forme des particules, réduisant ainsi leur sphéricité. Lors d'une utilisation à haute température, les zones riches en impuretés deviennent souvent des sites privilégiés d'oxydation ou de corrosion, accélérant la dégradation du matériau. Lors de la production de tôles ultra-minces, les défauts infimes causés par les impuretés peuvent s'amplifier et amorcer l'apparition de fissures en bordure ou de défauts de surface de type « peau d'orange ». Par conséquent, la production moderne de tôles en alliage de tungstène exige une pureté des matières premières et une propreté des procédés toujours plus

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rigoureuses, et la maîtrise des impuretés est devenue un facteur déterminant pour l'utilisation d'un matériau dans des applications de pointe.

### 3.3.4 Procédés d'élimination des impuretés des tôles en alliage de tungstène

des feuilles d'alliage de tungstène est réalisé tout au long de la chaîne, de la préparation des matières premières au traitement thermique du produit fini. Il met en œuvre diverses méthodes telles que la purification chimique, le raffinage physique, la purification sous atmosphère contrôlée et le post-traitement, formant ainsi un système de purification en plusieurs étapes.

L'étape d'élimination des impuretés dès la matière première est primordiale. La poudre de tungstène est généralement obtenue à partir de tungstate d'ammonium de haute pureté. Grâce à de multiples recristallisations et à une réduction poussée à l'hydrogène, les impuretés telles que l'oxygène, les métaux alcalins et le phosphore sont réduites à de faibles concentrations. Les poudres de nickel, de fer et de cuivre utilisées comme liant sont préparées par des procédés au carbonyle ou électrolytiques, suivis d'un dégazage sous vide afin de réduire davantage les teneurs en carbone, oxygène et soufre. Avant le mélange, la poudre de tungstène subit souvent un second traitement de purification à l'hydrogène à haute température. Ce traitement exploite la réaction de réduction de l'hydrogène avec les oxydes pour générer de la vapeur d'eau, qui est ensuite évacuée, entraînant simultanément les impuretés volatiles résiduelles telles que le potassium et le sodium.

L'étape de frittage est cruciale pour l'élimination des impuretés gazeuses et volatiles. Une atmosphère d'hydrogène humide (avec un point de rosée strictement contrôlé) réduit efficacement les oxydes à la surface des particules de tungstène et évacue la vapeur d'eau du four ; un frittage sous hydrogène sec ou sous vide poussé est utilisé pour éliminer l'azote et les hydrocarbures résiduels. Afin d'éviter la recondensation des impuretés à bas point de fusion, telles que le phosphore et le soufre, après volatilisation, un chauffage par paliers est souvent mis en œuvre : le dégazage est d'abord effectué à basse température, puis la température est rapidement portée à la température de frittage en phase liquide. Le coussin isolant entre la charge du four et le lingot doit être constitué de graphite ou d'alumine de haute pureté afin d'éviter toute contamination secondaire.

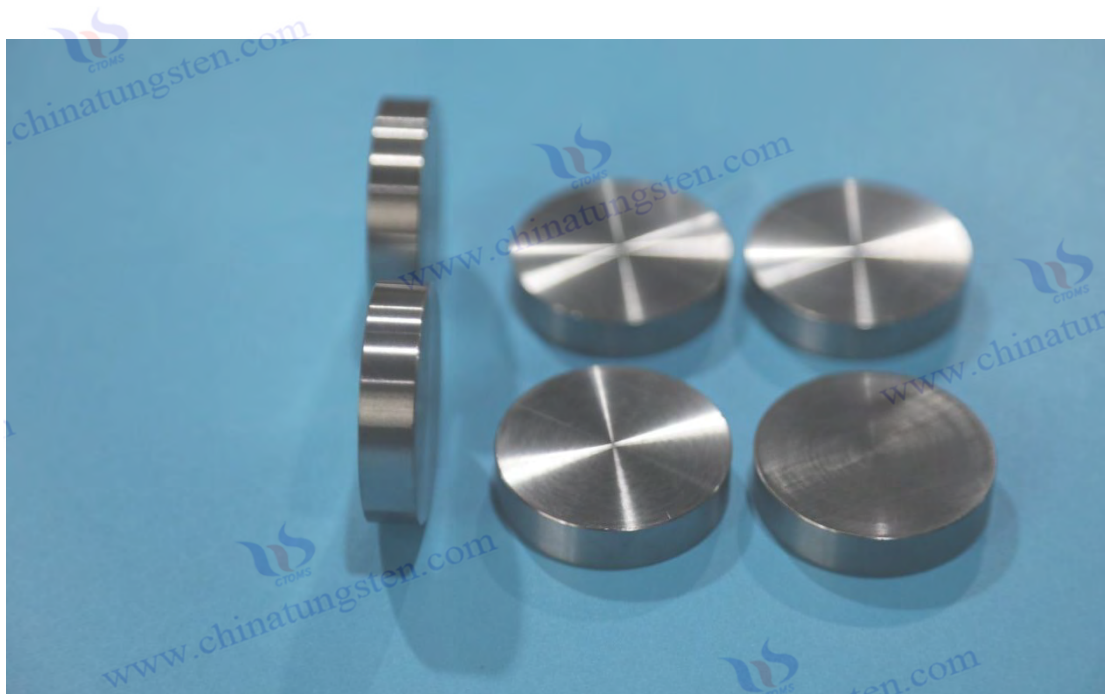
L'élimination des impuretés lors du travail à chaud et du traitement thermique repose principalement sur le vide poussé ou l'utilisation d'hydrogène de haute pureté. Le préchauffage avant laminage à chaud ou tiède est effectué dans un four sous vide afin de volatiliser davantage les métaux alcalins résiduels ; plusieurs recuits intermédiaires après laminage à froid sont également réalisés sous vide poussé, permettant ainsi l'évacuation des gaz résiduels par diffusion. Lors de la production de feuilles ultra-minces, un recuit de dégazage sous vide spécifique est souvent ajouté afin de garantir l'absence de microporosités dans le sens de l'épaisseur.

d'élimination post-impression vise à éliminer les impuretés de surface ou de subsurface. Le décapage chimique permet de dissoudre sélectivement les couches riches en oxygène et en phosphore présentes en surface ; l'électropolissage ou le nettoyage plasma permettent d'éliminer efficacement les matières organiques adsorbées et les ions métalliques ; le traitement thermique sous vide avec des absorbeurs de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

titane permet de capturer en profondeur l'oxygène et l'azote résiduels. Certaines tôles haut de gamme font également l'objet d'un affinage par fusion de zone ou par fusion par faisceau d'électrons pour la purification finale du lingot.

En résumé, l'élimination des impuretés dans les tôles d'alliage de tungstène suit une stratégie en trois étapes : « contrôle à la source – élimination par le procédé – raffinage du produit fini ». Grâce à l'effet synergique de ces méthodes, la teneur en oxygène est maintenue stablement à un niveau extrêmement bas, et les autres impuretés nocives sont également considérablement réduites, garantissant ainsi la haute fiabilité et la longue durée de vie du matériau.



CTIA GROUP LTD Feuilles d'alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Chapitre 4 La relation entre la structure et les propriétés des tôles en alliage de tungstène

### 4.1 Microstructure de la tôle en alliage de tungstène

La microstructure des tôles en alliage de tungstène présente généralement une structure composite biphasée, avec des particules de tungstène constituant la phase dure, encapsulées par des phases liantes à base de nickel ou de cuivre, formant une microstructure de type cermet. Cette structure est issue de la métallurgie des poudres et évolue après frittage par traitement thermomécanique. Les particules de tungstène sont majoritairement quasi sphériques ou polyédriques, et leur distribution granulométrique influe sur l'uniformité structurale. La phase liante remplit les espaces interparticulaires, créant des canaux de déformation continus. Des défauts tels que la porosité et les dislocations sont inévitables, mais peuvent être minimisés par une maîtrise du procédé. La microstructure comprend également des couches d'interface, où des zones de transition, formées par diffusion des éléments, renforcent la liaison interphase. Des méthodes d'observation comme la microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie électronique en transmission (MET) révèlent les détails structuraux, contribuant à l'analyse de l'origine des propriétés. L'évolution structurale varie selon les étapes de traitement : les particules se sphéroïdisent lors du frittage et deviennent fibreuses lors du laminage.

#### 4.1.1 Structure granulaire et composition chimique des joints de grains

tungstène sont principalement constituées de cristaux cubiques centrés (CC) de la phase tungstène et de cristaux cubiques à faces centrées (CFC) de la phase liante. Les premiers occupent la majeure partie du volume, conférant au matériau une dureté et une densité élevées, tandis que les seconds constituent une matrice continue, améliorant la plasticité globale. Lors du frittage, les grains de tungstène se sphéroïdisent progressivement par un mécanisme de dissolution-reprécipitation. Initialement polygonales, les particules tendent à présenter une courbure de surface uniforme sous l'influence de la phase liquide, formant ainsi des agrégats de taille relativement homogène. Cette évolution structurale est influencée par la mouillabilité de la phase liante ; une bonne mouillabilité favorise le réarrangement des particules, réduit les angles de contact et forme des joints de grains à faible énergie. La taille des grains est généralement contrôlée par la granulométrie de la poudre et la température de frittage. Une poudre fine et un temps de maintien long sont bénéfiques pour les structures à grains fins, améliorant la résistance mais pouvant réduire la ductilité. Le laminage introduit une recristallisation induite par la déformation, allongeant les grains dans le sens du laminage et formant des textures fibreuses, optimisant ainsi davantage les propriétés anisotropes.

La composition chimique des joints de grains joue un rôle crucial dans les tôles d'alliage de tungstène, notamment en ce qui concerne la distribution des éléments à l'interface tungstène-liant. Cette interface accumule souvent de faibles quantités d'atomes de tungstène, qui précipitent de la phase liante, formant une fine zone de solution solide qui renforce la liaison. Dans les systèmes nickel-fer, le fer a tendance à se ségréger aux joints de grains, régulant la densité électronique et influençant les trajectoires des dislocations. Les systèmes cuivre présentent une distribution uniforme du cuivre à l'interface, favorisant la continuité des canaux de conductivité thermique. Des impuretés à l'état de traces, telles que l'oxygène et le phosphore, s'accumulent aux joints de grains, pouvant former des films composés qui modifient les

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



énergies intergranulaires ; leur contrôle par des procédés de purification est indispensable pour éviter la fragilisation. L'analyse de la composition chimique utilise généralement la spectroscopie dispersive en énergie (EDS) ou la microanalyse par sonde atomique pour révéler les variations de gradient à l'interface. Ce gradient contribue à amortir les contraintes et à réduire la propagation des fissures.

De plus, la stabilité de la structure granulaire est étroitement liée à la composition des joints de grains. Le frittage sous vide poussé permet de limiter la formation d'oxydes d'oxygène à l'interface, de maintenir une interface propre et d'améliorer la fiabilité en service à haute température. Le recuit ajuste la composition par diffusion, dilue les éléments ségrégés et rétablit l'équilibre structural. Il existe différents types de joints de grains : les joints à grand angle facilitent la migration des éléments, tandis que les joints à petit angle sont plus stables. Les paramètres de traitement, tels que la réduction, influencent la densité des joints ; une densité élevée de joints peut bloquer les dislocations et accroître la dureté. Exposée à l'environnement, la composition des joints de grains détermine le chemin de corrosion, et l'enrichissement en éléments passivants permet la formation d'un film protecteur.

#### 4.1.2 Distribution et état chimique des phases de l'alliage

Les phases d'alliage des tôles en alliage de tungstène comprennent principalement des solutions solides de tungstène et des solutions solides de liant. Les premières sont constituées d'éléments d'alliage partiellement dissous au sein des grains de tungstène, tandis que les secondes sont constituées d'atomes de tungstène dissous dans une matrice à base de nickel ou de cuivre. Du point de vue de la distribution, la phase de tungstène est uniformément dispersée dans la phase de liant sous forme de particules discrètes, formant un réseau composite. L'espacement entre les particules est déterminé par la fraction volumique de la phase de liant ; un espacement plus faible favorise un transfert de contraintes uniforme. Chimiquement, la phase de tungstène conserve un haut degré de pureté et une fine zone de transition d'oxyde ou de solution solide peut exister en surface. La phase de liant présente un état chimique plus complexe. Dans le système nickel-fer, il s'agit d'une solution solide de phase  $\gamma$ , où les atomes de fer remplacent certains atomes de nickel, formant un arrangement désordonné. Cet état est stable, mais une phase ordonnée peut précipiter sous l'effet des variations de température. Le système cuivre est similaire ; le cuivre et le nickel sont parfaitement miscibles, garantissant un état uniforme et l'absence de tendance à la séparation de phases.

L'optimisation de la distribution des phases dépend de la cinétique de frittage. Le réarrangement des particules en phase liquide induit une distribution plus aléatoire, empêchant l'agglomération. Le traitement thermique homogénéise davantage la distribution ; l'ajustement des joints de grains par diffusion réduit les différences de densité locales. L'état chimique est influencé par la vitesse de refroidissement ; un refroidissement rapide fige un état de sursaturation, tandis qu'un refroidissement lent favorise la précipitation, formant des phases fines et renforçantes. L'état chimique à l'interface est unique, avec des régions à gradient élémentaire ; le tungstène passe progressivement des particules à la phase liante, améliorant la compatibilité. Des techniques d'observation telles que la diffraction des rayons X confirment cet état, ne révélant aucun pic de composés indésirables. Une distribution non homogène peut engendrer des gradients de performance, nécessitant un contrôle initial de l'homogénéité par agitation et

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mélange. Lors du recuit, l'évolution de l'état inclut la recristallisation, réduisant les défauts cristallins et améliorant la conductivité.

De plus, l'interaction entre la distribution des phases et l'état influence le comportement environnemental. Une phase liante uniformément répartie assure une protection continue, tandis qu'un état chimiquement stable résiste à l'oxydation. Lors de la transformation, le laminage et l'étréage répartissent les phases, formant une structure orientée. L'état est maintenu, mais la déformation induit une accumulation de dislocations.

#### 4.1.3 Analyse de l'origine chimique des structures défectueuses

de tungstène présentent principalement des défauts ponctuels, linéaires, de surface et volumiques. Leur origine chimique provient d'une diffusion inégale des éléments, de réactions interfaciales et de l'introduction d'impuretés. Les défauts ponctuels, tels que les lacunes et les atomes interstitiels, sont souvent générés par la dissolution et la précipitation d'atomes de tungstène dans la phase liante lors du frittage ; une sursaturation en tungstène entraîne une augmentation de la concentration en lacunes. Les défauts linéaires, c'est-à-dire les dislocations, sont liés à la déformation par laminage ; le renforcement par solution solide dans la phase liante augmente la densité de dislocations et, chimiquement, les atomes de fer ou de cuivre bloquent les dislocations, affectant leur mouvement. Les défauts de surface, tels que les joints de grains et les interfaces de phases, sont d'origine chimique et résultent de la ségrégation d'impuretés ; l'oxygène et le phosphore s'accumulent à l'interface pour former des composés, modifiant ainsi leurs états énergétiques. Les défauts volumiques, tels que la porosité et les inclusions, sont causés par un frittage incomplet, dû à la présence de gaz résiduels ou d'oxydes non éliminés.

L'analyse a révélé que la formation de défauts est également régie par la thermodynamique : la diffusion à haute température favorise la migration des lacunes, tandis que la solidification à basse température forme des amas. Les impuretés ont un effet chimique significatif, le carbone et l'azote formant des composés interstitiels qui augmentent le volume des défauts. Le recuit réduit les défauts, comble les lacunes par diffusion et redistribue les impuretés à l'équilibre chimique. Les défauts d'interface ont des causes spécifiques : les différences de dilatation thermique induisent des microfissures et les gradients élémentaires atténuent les contraintes. Des méthodes d'observation, telles que la microscopie électronique, révèlent ces causes, tandis que la spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie met en évidence les corrélations entre les impuretés. L'impact des défauts sur les performances doit être maîtrisé ; la purification chimique réduit l'intensité de leur formation.

#### 4.2 Propriétés et mécanismes des tôles en alliage de tungstène

tungstène doivent leurs propriétés à la conception unique de leur structure composite. L'interaction entre la phase tungstène et la phase liante confère à ces tôles diverses caractéristiques telles que la densité, la conductivité thermique et la stabilité thermique. Le mécanisme de ces performances repose sur des processus chimiques comme l'empilement atomique, le transport électronique et le support interfacial. Par exemple, la densité élevée est due à l'agencement compact des atomes de tungstène, tandis que la conductivité thermique et électrique dépend des trajectoires des électrons libres. La stabilité thermique

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

est assurée par l'équilibre thermodynamique de la structure de phase, la liaison interfaciale inhibant la déformation à haute température. L'analyse mécanistique permet de comprendre l'origine des performances, notamment l'influence du laminage sur la diffusion des électrons et, par conséquent, sur la conductivité. Sous l'effet de facteurs environnementaux, le mécanisme inclut également l'oxydation, l'état chimique de surface affectant la stabilité.

#### 4.2.1 Principe de l'empilement atomique chimique à haute densité dans les tôles en alliage de tungstène

Le principe d'empilement atomique à haute densité des tôles d'alliage de tungstène repose principalement sur la masse atomique élevée des atomes de tungstène et l'agencement compact de leur structure cristalline cubique centrée. Cette structure permet aux atomes d'occuper efficacement un espace limité, et le procédé d'alliage optimise davantage cet empilement. En métallurgie des poudres, la poudre de tungstène subit un réarrangement particulière lors du frittage, et le liant en phase liquide favorise le rapprochement des atomes de tungstène, formant un réseau dense. Le principe d'empilement atomique repose sur la synergie des forces de van der Waals et des liaisons métalliques. Les atomes de tungstène possèdent un rayon relativement important mais une constante de maille modérée, garantissant des espaces interatomiques minimaux au sein de l'unité cubique centrée. L'ajout d'éléments d'alliage tels que le nickel et le fer ne modifie pas directement l'empilement de la phase tungstène, mais ajuste le volume global par la formation d'une solution solide, réduisant ainsi les défauts de lacunes.

Le principe d'empilement se reflète également dans l'interaction interfaciale. Les atomes de la phase liante combler les espaces entre les particules de tungstène, à la manière d'un liquide mouillant une surface solide, et la liaison chimique renforce la cohésion. Lors du frittage, l'énergie de surface induit la migration atomique, et les atomes de tungstène en surface diffusent dans les zones en retrait, assurant un empilement régulier. Au cours du refroidissement, la contraction thermique comprime davantage l'espacement interatomique, et les phases précipitées, à l'équilibre chimique, contribuent à stabiliser la structure. À l'échelle microscopique, ce principe se traduit par l'ordre du réseau cristallin du tungstène ; la solution solide substitutionnelle limite la dilatation du réseau, maintenant un facteur de remplissage élevé. À l'échelle macroscopique, la haute densité découle de cette compacité atomique, rendant ce matériau adapté aux applications exigeant une masse concentrée.

Une analyse plus poussée révèle que le principe d'empilement est influencé par l'électronégativité des éléments. La différence d'électronégativité entre le tungstène et les éléments de la phase liante favorise le partage d'électrons, formant un réseau de liaisons stable. L'empilement atomique unique à l'interface, avec sa zone de gradient, permet aux atomes de tungstène de s'intégrer progressivement dans la phase liante, améliorant ainsi la cohérence globale. Les paramètres du procédé, tels que les gradients de température, contrôlent le processus d'empilement, tandis que les hautes températures prolongent le temps de diffusion et optimisent l'uniformité du remplissage. Les impuretés interfèrent ; les composés formés par l'oxygène et d'autres éléments occupent de l'espace et doivent être éliminés sous atmosphère réductrice. Le recuit restaure l'ordre d'empilement et la diffusion comble les vides. En matière d'adaptation environnementale, ce principe garantit une densité relativement stable malgré les variations de température, permettant une utilisation à long terme.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.2.2 Mécanisme de transport chimique de la conductivité thermique et électrique des feuilles d'alliage de tungstène

tungstène reposent principalement sur le transport d'électrons libres et de phonons. La phase tungstène assure une densité électronique élevée, tandis que la phase liante optimise le chemin de transport, formant un système porteur composite. Le mécanisme de conductivité implique le partage d'électrons au sein des liaisons métalliques ; les électrons externes des atomes de tungstène se détachent facilement, formant un gaz d'électrons, et l'introduction d'atomes de nickel ou de cuivre par alliage augmente la concentration de porteurs. La conductivité thermique est obtenue par les vibrations des phonons, les vibrations du réseau cristallin se propageant efficacement dans la phase tungstène et la phase liante amortissant la diffusion. La base chimique de ce mécanisme réside dans la configuration électronique de valence ; la couche d'électrons d du tungstène s'hybride avec les électrons sp de la phase liante, améliorant la mobilité des porteurs.

Le mécanisme de transport des porteurs se reflète également dans la distribution des phases ; la phase continue liée forme un réseau conducteur, réduisant la résistance interfaciale, et la stabilité chimique assure une circulation électronique sans entrave. Le frittage optimise ce mécanisme, la phase liquide favorisant une interface propre et abaissant la barrière de potentiel. Bien que les précipités refroidis puissent disperser les porteurs, un renforcement approprié améliore la conductivité thermique. À l'échelle microscopique, le mécanisme implique la forme de la surface de Fermi ; les éléments d'alliage ajustent la structure électronique, influençant la masse effective des porteurs. À l'échelle macroscopique, ce mécanisme contribue à la gestion thermique et aux applications électroniques, en assurant un équilibre entre conductivité thermique et électrique.

De plus, le mécanisme est influencé par la chimie des défauts, les dislocations et les lacunes diffusant les porteurs de charge ; il est nécessaire de réduire ce phénomène par recuit. Les impuretés telles que l'oxygène forment des pièges, capturant les électrons et réduisant la conductivité ; les procédés de purification atténuent cet effet. En fonction de la température, le mécanisme présente un couplage électron-phonon ; les hautes températures augmentent la diffusion, mais la stabilité de la phase tungstène reste faible. Les états chimiques de surface affectent le mécanisme ; les couches d'oxyde bloquent les porteurs de charge, tandis que les revêtements protègent et restaurent les performances. Lors de la fabrication, le laminage induit une texture, et les mécanismes d'orientation améliorent la conductivité anisotrope. Sous l'effet des facteurs environnementaux, la corrosion modifie le trajet des porteurs de charge, et les films de passivation contribuent à la préservation des propriétés du matériau.

#### 4.2.3 Structure chimique assurant la stabilité thermique des tôles en alliage de tungstène

tungstène résultent principalement de l'équilibre thermodynamique de leur structure biphasée. Le point de fusion élevé de la phase tungstène assure le soutien structurel, tandis que la solution solide de la phase liante régule la distribution des contraintes et limite les déformations à haute température. Le principe chimique de ce soutien repose sur la liaison interphase, un mélange de composants métalliques et covalents garantissant la stabilité du réseau de liaisons à haute température. La couche interfaciale formée lors du frittage crée une structure à gradient par diffusion élémentaire, amortissant les différences de

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



dilatation thermique et préservant l'intégrité globale. Le refroidissement fixe le soutien, et les phases précipitées bloquent les joints de grains, empêchant leur migration.

Le mécanisme de support se reflète également dans la stabilité de la microstructure : la sphéroïdisation des particules de tungstène réduit la concentration des contraintes, et la distribution uniforme de la phase liante disperse la charge thermique. Chimiquement, le renforcement par solution solide augmente le point de fusion de la phase, tandis que les éléments d'alliage ajustent l'énergie libre et réduisent la force motrice de la transformation de phase. À l'échelle microscopique, le support repose sur des vibrations atomiques harmonieuses et des modes de phonons coordonnés entre les phases, empêchant ainsi un ramollissement localisé. À l'échelle macroscopique, ce support convient aux applications à haute température, et sa stabilité est démontrée lors de cycles de chauffage.

Une analyse plus poussée révèle que le mécanisme est influencé par la chimie d'oxydation, formant un film protecteur en surface qui bloque la diffusion de l'oxygène tout en préservant la structure interne. Les impuretés perturbent la structure du support ; le phosphore et d'autres éléments induisent des phases fragiles, éliminées par des procédés de haute pureté. Le recuit optimise la structure du support, la diffusion ajuste la composition et rétablit l'équilibre. Sous un gradient de température, le support présente une réponse progressive : la phase tungstène domine à basse température, tandis que la phase liante intervient à haute température. L'historique de fabrication influence également le mécanisme ; une déformation antérieure introduit un réseau de dislocations, renforçant la résistance à haute température. Lors d'une exposition environnementale, des tests de corrosion démontrent la fiabilité du support, et la phase chimiquement inerte prolonge sa durée de vie.

#### 4.3 Corrélation entre les propriétés mécaniques et chimiques des tôles en alliage de tungstène

Les propriétés des tôles d'alliage de tungstène se manifestent principalement par l'influence de leur microstructure sur leur comportement macroscopique, via les liaisons chimiques et la distribution des éléments. Cette corrélation permet de comprendre l'origine de propriétés telles que la dureté, la résistance à l'usure et la résistance à la corrosion. Les propriétés mécaniques, comme la résistance et la ténacité, découlent souvent de l'agencement du réseau cristallin et des interactions interfaciales, tandis que les propriétés chimiques, comme la résistance à la corrosion, impliquent des réactions de surface et le comportement électrochimique des éléments. Ces deux aspects sont étroitement liés par la chimie interfaciale. Par exemple, la structure rigide de la phase tungstène assure le support mécanique, tandis que la solution solide de la phase liante module la stabilité chimique, contribuant ainsi à un équilibre des performances. Le mécanisme de corrélation inclut la contribution de la force des liaisons à l'échelle atomique : les liaisons métalliques déterminent la dureté dans la phase tungstène, tandis que les liaisons covalentes renforcent la liaison à l'interface, influençant la résistance à la déformation. Les réactions chimiques lors du frittage façonnent la structure ; la phase liquide favorise la diffusion des éléments, formant des zones de gradient, réduisant mécaniquement la concentration des contraintes et améliorant chimiquement la résistance à l'oxydation.

Le traitement thermique renforce encore cette corrélation ; le recuit ajuste la position des éléments par diffusion, optimisant ainsi la plasticité mécanique et l'inertie chimique. Sous l'effet de facteurs

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

environnementaux, cette corrélation se manifeste par une réponse synergique des performances ; l'humidité ou les milieux acides peuvent simultanément affaiblir l'intégrité mécanique et la couche protectrice chimique. L'historique de fabrication influe sur cette corrélation ; le réseau de dislocations induit par le laminage accroît la résistance mécanique et modifie la distribution électronique, influençant ainsi le potentiel de corrosion. Le rôle des impuretés ne peut être négligé ; la ségrégation d'oxygène ou de phosphore crée des zones de liaison chimiquement faibles et constitue un site d'amorçage de fissures, nécessitant une purification pour atténuer ces effets.

#### 4.3.1 Relation entre la dureté et la résistance de la liaison chimique des tôles en alliage de tungstène

de tungstène repose sur la diversité et la distribution des types de liaisons au sein du matériau. Cette relation illustre comment l'interaction entre la phase tungstène et la phase liante contribue conjointement à la résistance du matériau à la déformation. La dureté, en tant qu'indicateur mécanique, provient de la force des interactions interatomiques, tandis que la résistance des liaisons chimiques est influencée par l'énergie de liaison et le degré de partage des électrons. Dans les tôles d'alliage de tungstène, la structure cubique centrée de la phase tungstène est dominée par des liaisons métalliques, qui présentent une résistance élevée et confèrent la dureté de base. La solution solide cubique à faces centrées de la phase liante introduit davantage de composantes covalentes, régulant ainsi le réseau de liaisons global. L'élément central de cette relation réside dans le mélange des liaisons à l'interface. La liaison des atomes de tungstène avec le nickel ou le fer forme une zone de transition avec une distribution graduelle de la résistance des liaisons, contribuant à amortir les contraintes externes.

Le renforcement des liaisons chimiques est souvent obtenu par le biais d'un renforcement par solution solide. Les éléments d'alliage se dissolvent dans le réseau cristallin, provoquant des distorsions et augmentant la résistance au mouvement des dislocations, ce qui améliore la dureté. Dans la phase tungstène, la résistance des liaisons dépend de la pureté ; à l'état de haute pureté, les liaisons métalliques sont uniformément réparties, assurant une dureté stable. L'introduction d'impuretés affaiblit les liaisons, formant des zones molles localisées. Dans la phase liante, l'interpénétration nickel-fer renforce les liaisons, et les atomes de fer ajustent la densité du nuage électronique, favorisant ainsi la stabilité des liaisons. Le frittage influence cette relation ; la recombinaison des liaisons se produit en phase liquide, et les précipités renforcent davantage le réseau de liaisons lors du refroidissement, entraînant des variations de dureté. La déformation par laminage induit une contrainte de liaison, enrichissant chimiquement les dislocations en éléments environnants et augmentant localement la dureté, mais nécessite un recuit pour atteindre l'équilibre.

Cette relation s'étend à la dépendance à la température ; à haute température, les vibrations des liaisons augmentent, entraînant une diminution de la dureté. Cependant, la résistance des liaisons de la phase tungstène reste relativement stable, ce qui permet des applications en environnements thermiques. La résistance des liaisons chimiques de surface influe sur les essais de dureté ; les couches d'oxyde forment des liaisons faibles, nécessitant des revêtements protecteurs pour les restaurer. L'ajout d'impuretés telles que le carbone peut former des liaisons carbures, qui sont fortes mais requièrent une distribution uniforme pour éviter la fragilisation. Sous l'effet de facteurs environnementaux, l'humidité favorise les liaisons hydrogène, affaiblissant les liaisons de surface et réduisant indirectement la dureté.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.3.2 Mécanisme de résistance à la corrosion chimique des tôles en alliage de tungstène

Les tôles en alliage de tungstène doivent leur résistance à la conception composite de leur structure et à la synergie des réactions chimiques de surface. Ce mécanisme leur permet de conserver leur intégrité sous l'effet du frottement et de l'action des milieux. La résistance à l'usure, propriété mécanique, résulte d'un équilibre entre dureté et ténacité superficielles, tandis que la résistance à la corrosion chimique inhibe l'érosion grâce à des films de passivation et au comportement électrochimique des éléments ; ces deux phénomènes interagissent pour former un système protecteur. Dans les tôles en alliage de tungstène, la phase tungstène constitue la structure résistante à l'usure, la phase liante module l'activité chimique et la distribution des éléments à l'interface optimise le mécanisme de résistance. Le cœur de ce mécanisme réside dans la transformation chimique qui se produit lors du frottement : les atomes de surface se réorganisent sous l'effet des contraintes pour former une couche d'oxyde ou un film d'adsorption, réduisant ainsi le taux d'usure.

Les mécanismes de résistance à la corrosion sont obtenus par passivation électrochimique, où le nickel ou le cuivre favorise la formation d'un film d'oxyde stable en surface, bloquant la pénétration des agents corrosifs. L'adhérence mécanique du film dépend de la force de liaison. En milieu d'usure, le mécanisme implique le couplage de l'usure oxydative et corrosive ; des réactions chimiques génèrent des produits protecteurs, réduisant mécaniquement le coefficient de frottement. Les procédés de frittage façonnent la structure, la phase liquide favorisant une microstructure uniforme et réduisant les zones sensibles à la corrosion. La texture de surface après laminage influe sur le mécanisme : le lissage chimique de la surface réduit la rétention des agents corrosifs et répartit mécaniquement les contraintes de manière uniforme. Les mécanismes d'interférence des impuretés, notamment l'enrichissement en phosphore et en soufre, induisent une corrosion localisée, nécessitant une purification et un contrôle.

Le mécanisme présente une forte dépendance à la température ; l'oxydation s'accélère à haute température, mais la phase tungstène reste stable. Les traitements de revêtement renforcent ce mécanisme ; le nickelage chimique forme une barrière supplémentaire, améliorant la résistance à l'usure. Les milieux environnementaux tels que les acides et les bases modifient le mécanisme, et l'adaptabilité du film de passivation détermine les performances à long terme.

#### 4.3.3 Effet de barrière chimique de surface des tôles en alliage de tungstène sur la résistance à la corrosion

La résistance à la corrosion des tôles en alliage de tungstène repose principalement sur la formation de films d'oxyde et de couches d'adsorption. Ce mécanisme assure la stabilité du matériau en empêchant le contact direct entre le milieu et le substrat. La résistance à la corrosion, en tant que propriété chimique, provient du comportement électrochimique des éléments de surface, tandis que l'effet barrière résulte de la formation d'une structure multicouche. Mécaniquement, la couche de film doit présenter une bonne adhérence pour résister au décollement. Dans les tôles en alliage de tungstène, la surface de la phase tungstène s'oxyde facilement pour former une couche de  $WO_3$ , mais les éléments liants tels que le nickel favorisent la formation d'un film composite, renforçant ainsi l'effet barrière. Le principe sous-jacent est la stabilité thermodynamique et la faible énergie libre du film, qui inhibent les réactions ultérieures.

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'effet barrière est obtenu par auto-passivation ; le film s'auto-répare après une oxydation initiale et sa composition chimique inclut de l'oxyde de nickel ou de cuivre. Mécaniquement, la flexibilité du film empêche la fissuration. L'état de surface après frittage influence les performances de la barrière ; une surface propre favorise la formation d'un film uniforme. La rugosité de surface lors du laminage contrôle l'efficacité de la barrière et, chimiquement, les microtextures augmentent les points d'adhérence. La teneur initiale en impuretés, telles que l'oxygène, détermine la qualité de la barrière ; un excès d'oxygène conduit à un film poreux. Sous l'effet des conditions environnementales, la barrière s'adapte à différents milieux ; en milieu acide, le film se dissout et se restructure. De plus, la température affecte significativement les performances de la barrière ; les hautes températures accélèrent la diffusion mais maintiennent la stabilité du film composite et sa fonction barrière. Les techniques de revêtement étendent l'efficacité de la barrière ; le chromage sous vide forme une couche supplémentaire, améliorant la résistance globale.

#### 4.4 Analyse de corrélation procédé-structure-performance des tôles en alliage de tungstène

L'analyse de corrélation procédé-structure-performance des tôles d'alliage de tungstène se concentre sur la chaîne logique allant de la préparation à la performance finale. Cette analyse permet de comprendre comment les paramètres de procédé influencent la microstructure et, par conséquent, le comportement macroscopique. Les étapes de procédé telles que le frittage, le laminage et le traitement de surface agissent chacune à différentes échelles : le frittage établit la structure initiale, le laminage optimise la déformation et le traitement de surface cible l'interface chimique. La structure, jouant un rôle intermédiaire, inclut la distribution des grains, les liaisons interphases et les défauts ; ces éléments sont liés à la performance par le biais de liaisons chimiques et de la diffusion des éléments. La performance englobe les aspects mécaniques, thermiques et chimiques ; par exemple, la dureté découle de la résistance du réseau cristallin et la résistance à la corrosion dépend des barrières de surface. La corrélation se manifeste par une conduction à plusieurs niveaux : les procédés modifient l'arrangement atomique, la structure ajuste le réseau de liaisons et la performance s'adapte en conséquence. Le cadre analytique met l'accent sur les boucles de rétroaction ; les résultats des essais de performance guident les ajustements de procédé, garantissant ainsi l'adéquation du matériau aux applications industrielles. Grâce à cette analyse, la conception des tôles d'alliage de tungstène devient plus systématique, favorisant leur utilisation dans les domaines de précision. En pratique, la corrélation prend également en compte l'équilibre entre thermodynamique et cinétique. La température du procédé influe sur la vitesse de diffusion, et la stabilité structurale détermine la durabilité des performances. Les rapports élémentaires jouent un rôle de liaison dans la corrélation ; une teneur élevée en tungstène engendre une structure dense et des performances orientées vers une densité élevée, mais nécessite une compensation du procédé pour tenir compte de la plasticité. Les facteurs environnementaux sont intégrés à l'analyse ; les variations d'humidité ou de température permettent de tester la robustesse de la corrélation.

##### 4.4.1 Effet du frittage sur la microstructure des tôles en alliage de tungstène

Le frittage contrôle la microstructure des tôles d'alliage de tungstène principalement par des paramètres tels que la température, l'atmosphère et la durée, en maîtrisant la formation des phases, l'évolution des particules et l'adhérence interfaciale. Ce contrôle est fondamental pour les étapes de traitement ultérieures



et les performances du matériau. Lors du frittage, le mélange de poudres subit une transformation, passant d'une diffusion en phase solide à une formation en phase liquide. Les particules de tungstène se réorganisent sous l'effet du liant, formant une structure biphasée uniformément répartie. Le contrôle de la température est crucial : les températures élevées favorisent la formation de la phase liquide, et les liants tels que le nickel ou le cuivre fondent et enrobent les particules de tungstène, réduisant chimiquement l'énergie de surface et favorisant la sphéroïdisation des particules. Des températures plus basses sont utilisées pour le frittage en phase solide afin d'éviter un excès de phase liquide qui conduirait à une structure poreuse. L'atmosphère influe également sur le contrôle : l'hydrogène réduit les oxydes, maintenant une interface propre, tandis que l'azote ou le vide suppriment la porosité due aux gaz résiduels. Les paramètres temporels permettent une diffusion suffisante. Un temps de maintien prolongé favorise une dissolution limitée des atomes de tungstène dans la phase liante, et le refroidissement ultérieur précipite des phases fines, renforçant ainsi la structure.

L'effet régulateur se manifeste également dans l'ajustement de la taille des grains. Un chauffage rapide permet de conserver les particules fines, tandis qu'un processus lent favorise leur croissance. Le mécanisme chimique repose sur la maturation d'Ostwald, où les particules les plus grosses enrobent les plus petites, aboutissant à une taille uniforme. La distribution des phases est contrôlée par le dosage ; à mesure que la proportion de la phase liante augmente, la structure tend vers un réseau continu, améliorant ainsi la cohérence. La chimie interfaciale se forme progressivement pendant le frittage, des zones de gradient élémentaire apparaissent et l'interdiffusion du tungstène et du nickel crée une couche de transition, renforçant l'adhérence. Le contrôle des défauts est un point essentiel ; la porosité est réduite par remplissage en phase liquide, les dislocations se résorbent à haute température et les impuretés chimiques se volatilisent et sont expulsées, empêchant l'agglomération. La structure frittée constitue une base pour le laminage ; la microstructure uniforme facilite la déformation sans fissuration.

De plus, l'effet régulateur s'étend à l'étape de traitement thermique. Le recuit post-frittage homogénéise davantage la structure, diffuse et ajuste la position des éléments, et optimise la composition des joints de grains. La combinaison des paramètres de procédé permet une régulation ciblée ; par exemple, pour obtenir une structure à grains fins, on utilise des températures plus basses et des temps de maintien plus longs afin d'inhiber chimiquement la migration des joints de grains. La pureté de l'atmosphère influe sur l'effet régulateur ; un environnement de haute pureté réduit les inclusions d'oxyde et préserve l'intégrité structurale. Le traitement des impuretés se reflète dans le frittage ; le phosphore et le soufre sont éliminés par volatilisation, et leurs faibles quantités résiduelles garantissent la stabilité structurale. En termes d'adaptabilité environnementale, cette régulation assure une stabilité relative de la structure face aux variations de température, la rendant ainsi adaptée aux applications de cyclage thermique.

#### 4.4.2 Mécanisme d'influence du processus de laminage sur les propriétés mécaniques des tôles en alliage de tungstène

Le laminage influence les propriétés mécaniques des tôles d'alliage de tungstène principalement par des modifications structurales induites par la déformation, régulant ainsi la résistance, la ténacité et la dureté. Ce mécanisme fait intervenir des interactions à plusieurs niveaux, notamment l'accumulation de dislocations, l'affinage du grain et la coordination interphase. Lors du laminage, qu'il soit à chaud ou à

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

froid, la phase tungstène supporte la contrainte principale, tandis que la phase liante favorise la propagation de la déformation, entraînant une reconstruction du réseau de liaisons chimiques, une augmentation de la densité de dislocations et une amélioration de la limite d'élasticité. Le laminage à chaud, grâce à sa température plus élevée, induit une restauration dynamique, où la diffusion favorise la réparation des défauts cristallins et prévient la fragilité. Le laminage à froid induit un écrouissage plus important, impliquant l'activation des systèmes de glissement, l'allongement des particules de tungstène dans le sens du laminage, la formation d'une texture fibreuse et l'amélioration des propriétés de traction.

Le mécanisme d'influence se reflète également dans l'ajustement de la ténacité. Le laminage multipasse, accompagné d'un recuit intermédiaire, permet la diffusion chimique, ce qui ajuste la distribution des contraintes et réduit la tendance à la fissuration due aux contraintes résiduelles. Le mécanisme de contrôle de la réduction est crucial ; des réductions importantes induisent des germes de recristallisation, affinent les grains et améliorent l'équilibre entre résistance et ténacité. Dans le mécanisme interfacial, la phase liante agit comme une couche tampon, absorbant l'énergie de déformation, et la force de liaison chimique détermine l'efficacité de la coordination. L'évolution des défauts est également une composante du mécanisme ; le laminage génère des parois de dislocations et, chimiquement, la ségrégation et le blocage des éléments stabilisent la structure. Les effets de surface se reflètent également dans le mécanisme ; la finition de laminage affecte la tenue à la fatigue et réduit chimiquement les points d'amorçage de l'oxydation.

Une analyse plus poussée révèle une forte dépendance du mécanisme à la température, combinant les avantages du laminage à tiède et du laminage à chaud. Ce mécanisme présente à la fois une restauration et un durcissement, optimisant ainsi les propriétés mécaniques. Les paramètres du procédé, tels que la vitesse de laminage, influencent le mécanisme, réduisant rapidement le temps de restauration et augmentant la dureté. Les impuretés perturbent le mécanisme ; l'oxygène et d'autres éléments induisent des fissures, nécessitant une purification préalable pour atténuer ces effets.

#### **4.4.3 Voie d'optimisation du traitement de surface sur les propriétés chimiques des tôles en alliage de tungstène**

Le traitement de surface optimise les propriétés chimiques des tôles d'alliage de tungstène, principalement par des méthodes telles que le placage, l'oxydation ou la modification chimique, afin de créer une interface protectrice. Cette approche améliore les propriétés chimiques comme la résistance à la corrosion et à l'oxydation, ainsi que l'affinité chimique. Le procédé comprend un nettoyage de surface suivi du dépôt d'un film, formant une nouvelle couche de phase chimique qui empêche la pénétration des agents chimiques. La galvanoplastie est courante : des couches de nickel ou d'or sont déposées électrochimiquement, optimisant la formation d'un film dense par réduction ionique, l'adhérence dépendant de la diffusion des éléments de la matrice. Le placage sous vide est utilisé dans les environnements à haute température ; le dépôt d'aluminium par évaporation forme une barrière d'alumine, assurant une grande stabilité chimique. Le polissage chimique élimine les défauts de surface ; en milieu acide, la phase tungstène est légèrement dissoute, lissant l'interface et améliorant l'inertie chimique.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Le procédé d'optimisation comprend également des traitements composites, une diffusion thermique post-revêtement, une liaison chimique renforcée et une interpénétration des éléments au sein du procédé afin de former des zones à gradient, améliorant ainsi l'adhérence. L'implantation ionique introduit de l'azote ou du carbone, durcissant la surface tout en optimisant sa chimie ; ce mécanisme repose sur l'insertion atomique dans le réseau cristallin, modifiant la structure électronique et améliorant la résistance diélectrique. L'oxydation anodique génère un film d'oxyde ; en conditions électrolytiques, une couche d'oxyde de tungstène se forme spontanément ; le procédé contrôle la tension pour ajuster l'épaisseur ; et la couche de passivation chimique passive le substrat. Un prétraitement de nettoyage est fondamental ; un traitement par ultrasons ou plasma élimine les contaminants afin de garantir une adhérence uniforme ultérieure.

De plus, la maîtrise de la température est cruciale lors du dépôt ; un traitement à basse température préserve la structure du substrat, tandis qu'une diffusion à haute température optimise l'interface. Les impuretés affectent le dépôt et les résidus de surface nuisent à la formation du film, ce qui nécessite un nettoyage en plusieurs étapes. Les procédés de dépôt adaptés à l'environnement impliquent la sélection de revêtements spécifiques pour les milieux acides et alcalins, la compatibilité chimique déterminant l'efficacité. Un recuit ultérieur stabilise davantage la couche de film, assurant une diffusion uniforme et améliorant la tenue chimique à long terme.

#### **4.5 Réponse structurelle et comportementale des tôles en alliage de tungstène dans des environnements spécifiques**

de tungstène soumises à des environnements spécifiques reflètent principalement l'adaptation du matériau aux conditions extérieures. Cette réponse implique l'évolution de la microstructure et l'ajustement du comportement macroscopique, permettant de comprendre comment les matériaux conservent leurs propriétés sous des conditions telles que les hautes températures, les radiations ou la pression. Les réponses structurales incluent les modifications de la taille des grains, les interactions interphases et la dynamique des défauts, tandis que les performances se manifestent par des aspects mécaniques, thermiques et chimiques, comme la stabilité thermique à haute température, la résistance chimique sous radiations et l'évolution mécanique sous pression. Le mécanisme de réponse découle de l'équilibre entre l'élasticité des liaisons chimiques et la structure de phase : la phase tungstène assure le soutien squelettique, tandis que la phase liante module l'effet tampon. La superposition des facteurs environnementaux complexifie la réponse : une température élevée peut induire la diffusion, les radiations affectent la structure électronique et la pression modifie l'espacement interatomique. L'analyse de corrélation met l'accent sur une perspective multi-échelle, de la reconstruction des liaisons à l'échelle atomique à la dégradation des performances macroscopiques. Les prétraitements, tels que l'optimisation de l'alliage, peuvent améliorer la réactivité, et les ajustements des rapports élémentaires contribuent à la stabilisation progressive de la structure dans l'environnement.

En pratique, l'interaction entre la structure et les performances forme une boucle de rétroaction. La structure initiale détermine le point de départ de la réponse, tandis que son évolution ultérieure influe sur la durabilité des performances. Le rôle des impuretés doit être pris en compte ; l'oxygène, par exemple, peut accélérer les modifications négatives de la réponse, un phénomène qui peut être atténué par

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

purification. En cas de variations progressives du gradient de température ou de la dose de rayonnement, la réponse présente une non-linéarité : elle se stabilise initialement puis s'accélère. Les réponses à la pression impliquent une compression volumétrique, et la compression des liaisons chimiques renforce la résistance.

#### 4.5.1 Modifications de la stabilité structurelle des tôles en alliage de tungstène sous hautes températures

de tungstène à haute température résultent principalement de processus de diffusion thermoactivés et de la coordination de la dilatation thermique interfaciale. Ces modifications affectent l'intégrité globale et la continuité fonctionnelle du matériau. À haute température, le réseau cubique centré de la phase tungstène reste relativement stable, mais une migration atomique débute dans la solution solide de la phase liante. Les atomes de tungstène se dissolvent des bords des particules dans la phase liante, formant un état de sursaturation. Avec l'augmentation de la température, cette dissolution s'intensifie, modifiant la courbure de surface des particules et entraînant un rétrécissement progressif des petites particules et une légère augmentation de la taille des grandes, aboutissant à une structure à gros grains. Le mécanisme fait intervenir la chimie interfaciale : l'énergie thermique induit la diffusion des éléments, les atomes de nickel ou de cuivre pénétrant dans la phase tungstène pour former de fines zones de solution solide, régulant la distribution des contraintes et empêchant la séparation interfaciale. Lors du refroidissement, le tungstène sursaturé précipite en fines phases, ancrant les joints de grains et restaurant partiellement la structure initiale ; cependant, des cycles répétés peuvent engendrer des modifications résiduelles.

Les changements structuraux se reflètent également dans la dynamique des défauts. À haute température, la montée des dislocations est active, la concentration de lacunes augmente et des impuretés chimiques telles que l'oxygène s'accumulent aux joints de grains, formant des films composés qui affectent les vitesses de migration. La distribution des phases évolue progressivement ; la phase liante peut se dilater légèrement, mais le faible coefficient de dilatation de la phase tungstène amortit la déformation globale. L'ampleur de ces changements dépend de la durée d'exposition à l'environnement ; une exposition de courte durée favorise une meilleure restauration structurale, tandis qu'une exposition de longue durée peut induire la formation de germes de recristallisation, créant de nouveaux grains et optimisant la stabilité. Les liaisons chimiques se reconstituent au cours de ces changements ; les liaisons métalliques maintiennent la résistance de la phase tungstène, tandis que les liaisons covalentes améliorent la résistance thermique à l'interface. Le recuit permet de contrôler ces changements ; la maîtrise de la vitesse de refroidissement stabilise une structure favorable et évite un grossissement excessif des grains.

Une analyse plus poussée révèle que le seuil de température variable est lié à l'alliage. Le système nickel-fer présente un grossissement progressif des grains à haute température, tandis que le système nickel-cuivre réagit uniformément grâce à la conductivité thermique du cuivre. La teneur en impuretés influe sur ces changements ; des éléments comme le phosphore induisent un ramollissement localisé, nécessitant une purification préalable. En présence d'humidité ambiante, l'humidité peut favoriser l'oxydation superficielle, provoquant des modifications structurales se propageant de l'extérieur vers l'intérieur et formant des zones de gradient. La réponse mécanique est corrélée aux modifications structurales ; sous fluage à haute température, les particules glissent et la phase liante se déforme de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



manière coordonnée. En environnement de cyclage thermique, ces changements indiquent une accumulation de fatigue, et l'affaiblissement des joints de grains doit être atténué par dopage.

#### 4.5.2 Résistance chimique et structurale des tôles en alliage de tungstène sous rayonnement.

tungstène sous rayonnement repose principalement sur la réponse de leur microstructure composite au dépôt d'énergie. Cette tolérance permet au matériau de maintenir l'intégrité de son réseau de liaisons chimiques et de sa structure de phase sous l'influence des rayonnements ou des particules. Sous l'effet de rayonnements tels que les rayons X ou les faisceaux d'électrons, le numéro atomique élevé de la phase tungstène absorbe l'énergie, provoquant des déplacements en cascade. Chimiquement, les liaisons atomiques se rompent brièvement puis se reforment, formant des amas de défauts ponctuels. Le mécanisme de tolérance structurale implique des ajustements de la structure électronique : le rayonnement induit une excitation électronique, provoquant le saut des électrons de valence des atomes de tungstène, qui se relaxent rapidement et retrouvent leur état d'équilibre. La solution solide de la phase liante amortit l'impact, et la distribution uniforme des atomes de nickel ou de cuivre disperse l'énergie, empêchant les dommages localisés. La chimie interfaciale joue un rôle dans la tolérance : l'interpénétration des éléments dans les régions à gradient renforce les liaisons, et les atomes déplacés par le rayonnement s'auto-réparent.

La tolérance se reflète également dans l'évolution des défauts : le rayonnement génère des paires lacune-interstitiel, la diffusion chimique favorise la recombinaison et réduit l'accumulation. La distribution des phases reste stable ; les particules de tungstène protègent la phase liante, réduisant ainsi le flux de rayonnement. La dépendance de ces changements à la dose est significative : les faibles doses permettent un ajustement précis de la structure, tandis que les fortes doses peuvent induire un gonflement, avec de légères variations de volume atténuées par dopage. L'état chimique réagit au rayonnement ; des films d'oxyde peuvent se former et la passivation de surface améliore la tolérance. Le recuit contribue également à l'amélioration de la tolérance ; l'énergie thermique favorise la migration des défauts, restaurant ainsi l'ordre du réseau cristallin.

Les systèmes d'alliages présentent des différences significatives de durabilité. Le système nickel-fer montre une réponse coordonnée sous rayonnement magnétique, tandis que le système nickel-cuivre répartit l'énergie uniformément grâce à sa conductivité. Les impuretés affectent la durabilité ; l'oxygène et d'autres éléments captent les produits de rayonnement, formant des composés qui nécessitent une purification et un contrôle. Dans des conditions environnementales telles que le chauffage radiatif, la durabilité présente une synergie, la diffusion thermique accélérant la réparation des défauts. Sur le plan mécanique, le durcissement par irradiation améliore la résistance, mais les variations de ténacité doivent être surveillées. Lors d'une exposition prolongée, la durabilité évolue progressivement, la structure s'adaptant au champ de rayonnement et assurant un fonctionnement continu.

#### 4.5.3 Évolution des performances des tôles en alliage de tungstène sous pression extrême

de tungstène présentent un comportement principalement dû à la réponse en compression de leur structure et à la dynamique de coordination interfaciale. Ce processus dynamique influence les propriétés

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mécaniques et la stabilité chimique du matériau, contribuant ainsi à la compréhension du mécanisme d'adaptation sous haute pression. Lorsque la pression est appliquée, le réseau cristallin de la phase tungstène se comprime, l'espacement interatomique diminue, la force des liaisons chimiques augmente et la dureté s'accroît. Cette évolution s'accompagne de variations de volume et d'un retrait global du matériau, mais la ductilité de la phase liante atténue la fragilité de la phase tungstène, empêchant sa fragmentation. Dans ce mécanisme, le mouvement des dislocations est actif, le système de glissement est activé sous haute pression, la distribution des éléments chimiques est ajustée et la concentration des contraintes est dispersée. L'interface joue un rôle crucial ; la coordination des déformations dans la zone de gradient empêche la séparation.

L'évolution des performances se reflète également dans l'équilibre entre ténacité et résistance : la résistance augmente initialement, la ténacité diminue progressivement, et une récupération partielle se produit après la décompression. La dynamique des défauts est mise en évidence de manière systématique : la compression des lacunes réduit la résistance, des parois de dislocations se forment et la diffusion chimique favorise la stabilisation. La distribution des phases réagit à la pression ; les particules de tungstène sont plus compactes et la phase liante remplit les espaces, optimisant ainsi la cohérence. Le seuil de pression pour l'évolution dépend du système ; les systèmes nickel-fer présentent un durcissement progressif, tandis que les systèmes nickel-cuivre réagissent uniformément en raison de leur conductivité thermique. Un traitement à haute pression après recuit permet de réguler l'évolution et de rétablir l'équilibre structural.

L'effet de superposition des températures est significatif ; la diffusion est accrue sous haute pression et l'évolution est accélérée, mais ce phénomène peut être contrôlé par refroidissement. Les impuretés perturbent la régularité ; le phosphore et d'autres éléments induisent des zones de faiblesse locales qui nécessitent une purification. Les facteurs environnementaux, tels que les cycles de pression, provoquent une fatigue lors de l'évolution, et les modifications structurelles progressives requièrent une optimisation du dopage. Du point de vue des propriétés chimiques, la compression des liaisons sous haute pression améliore la résistance à la corrosion et densifie la barrière de surface. Sous haute pression prolongée, l'évolution reflète une adaptation et les performances tendent à se stabiliser, permettant de supporter des charges continues.

#### 4.6 Fiche de données de sécurité (FDS) des feuilles d'alliage de tungstène de CTIA GROUP LTD

Groupe CTIA LTD La fiche de données de sécurité (FDS) de la tôle en alliage de tungstène est conforme à des normes telles que la norme GB/T 16483-2008 « Contenu et ordre des éléments dans les fiches de données de sécurité des produits chimiques ». Elle décrit en détail les propriétés physico-chimiques, l'identification des dangers et les mesures d'intervention d'urgence, en tenant compte des composants spécifiques du produit, comme les proportions de tungstène, de nickel, de fer ou de cuivre.

Les alliages de tungstène sont composés principalement de tungstène, qui leur confère une densité et une dureté élevées. Le nickel, le fer ou le cuivre y sont ajoutés comme liants, leurs proportions étant ajustées selon la série. Par exemple, dans le système tungstène-nickel-fer, le rapport nickel/fer assure un bon équilibre entre mouillage et renforcement. Les teneurs en éléments traces tels que le carbone et l'oxygène

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sont maintenues à de faibles niveaux afin d'éviter la formation de phases fragilisantes. La présente section utilise les numéros CAS pour identifier les éléments : tungstène CAS 7440-33-7 et nickel CAS 7440-02-0. Les impuretés mentionnées incluent les contaminants potentiels tels que le phosphore et le soufre, provenant des matières premières. L'accent est mis sur les procédés de purification permettant de réduire leur teneur.

Les informations relatives à la composition comprennent également une description de la structure de phase de l'alliage. Dans ce composite biphasé, les particules de tungstène présentent une structure cubique centrée, tandis que la phase liante est une solution solide cubique à faces centrées. Le matériau est chimiquement stable et ne contient aucun composant volatil. L'analyse de solubilité montre qu'il est insoluble dans l'eau.



CTIA GROUP LTD Feuilles d'alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

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

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Chapitre 5 Méthodes d'essais de performance et de caractérisation des tôles en alliage de tungstène

### 5.1 Techniques d'analyse de la composition chimique des tôles en alliage de tungstène

L'analyse des tôles en alliage de tungstène vise principalement à déterminer leurs caractéristiques composites multi-éléments. Des méthodes spectroscopiques, de fluorescence et de chimie en solution sont utilisées pour la détection qualitative et quantitative des éléments majeurs tels que le tungstène, le nickel, le fer et le cuivre, ainsi que des impuretés à l'état de traces. Ces techniques contribuent au contrôle qualité des matériaux, permettant de vérifier les proportions, la pureté et l'homogénéité de l'alliage. La spectroscopie d'absorption atomique et la spectroscopie d'émission atomique conviennent à la détermination élémentaire d'échantillons dissous, la spectroscopie de fluorescence X offre une analyse non destructive et rapide, et le titrage chimique est utilisé pour des éléments traces spécifiques. La préparation des échantillons avant analyse comprend la découpe, la dissolution ou le nettoyage de surface ; la dissolution utilise généralement un mélange d'acide nitrique et d'acide fluorhydrique pour traiter la phase réfractaire du tungstène. Le choix de la technique dépend du type et de la teneur en élément ; les méthodes de fluorescence conviennent aux éléments majeurs tels que le tungstène en forte proportion, tandis que des méthodes spectroscopiques très sensibles sont nécessaires pour les éléments traces. Les résultats analytiques permettent d'ajuster les procédés, garantissant ainsi la fiabilité des matériaux dans les applications industrielles.

Ces techniques tiennent également compte des effets de matrice ; la densité élevée de la matrice de tungstène peut interférer avec le signal, ce qui est atténué par un étalonnage avec des échantillons standards. Les méthodes non destructives, telles que la spectroscopie de fluorescence, facilitent la détection en ligne, tandis que les méthodes destructives, telles que la spectroscopie d'absorption, offrent une plus grande précision. L'analyse des impuretés porte sur l'oxygène, le carbone, le phosphore, etc., qui affectent la stabilité des tissus. Les techniques peuvent être combinées pour former un système complet, par exemple un criblage par fluorescence suivi d'une analyse spectrale précise. En raison des facteurs environnementaux, l'analyse doit être effectuée dans un laboratoire propre afin d'éviter toute contamination.

#### 5.1.1 Analyse spectrale d'absorption et d'émission atomiques de feuilles d'alliage de tungstène

de tungstène sont couramment utilisées pour la quantification élémentaire après dissolution de l'échantillon. La spectrométrie d'absorption atomique (SAA) repose sur l'absorption d'une lumière caractéristique par les atomes, tandis que l'émission atomique (EA) exploite les raies spectrales caractéristiques émises par les atomes excités. La combinaison de ces deux méthodes permet d'analyser les éléments majeurs tels que le tungstène, le nickel, le fer et le cuivre, ainsi que les impuretés à l'état de traces. En SAA, l'échantillon est dissous dans un acide pour former une solution, qui est ensuite nébulisée et introduite dans une flamme ou un four à graphite. Les atomes de l'élément absorbent la lumière caractéristique émise par une lampe à cathode creuse ; l'intensité d'absorption dépend de la concentration et la teneur est calculée à l'aide d'une courbe d'étalonnage. Cette méthode est particulièrement adaptée aux feuilles d'alliage de tungstène, notamment pour le dosage de faibles concentrations de nickel ou de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fer, car le mécanisme d'absorption atomique à l'état fondamental garantit la sélectivité. La préparation de l'échantillon doit tenir compte de la faible solubilité du tungstène ; un mélange d'acide nitrique et d'acide fluorhydrique est couramment utilisé pour sa dissolution. L'ajout d'acide borique pour la complexation permet d'éviter les interférences des ions fluorure. La spectrométrie d'absorption atomique à flamme (AAS) convient aux éléments présents en concentrations plus élevées, tandis que la spectrométrie d'absorption atomique avec four graphite (AAS) améliore la sensibilité pour la détection des éléments traces.

La spectroscopie d'émission optique (OES) introduit des échantillons dissous dans un plasma ou un arc électrique pour l'excitation, détectant les raies spectrales caractéristiques émises par les atomes ou les ions. L'intensité est enregistrée par spectroscopie à réseau et un détecteur, permettant la détermination simultanée de plusieurs éléments. Dans les tôles d'alliage de tungstène, le point de fusion élevé du tungstène requiert une source d'excitation à haute énergie telle qu'un plasma à couplage inductif (ICP-OES), où les transitions d'états chimiquement excités fournissent de riches informations spectrales. Une correction de la matrice est nécessaire, car la matrice de tungstène peut induire des interférences de fond, optimisées par des méthodes d'étalonnage interne ou par soustraction du bruit de fond. L'avantage de l'OES réside dans sa rapidité d'analyse multi-élémentaire, la rendant adaptée à la validation des lots de production. Les deux technologies sont complémentaires : la spectroscopie d'absorption atomique (AAS) est plus précise pour des éléments spécifiques, tandis que l'OES couvre un large spectre.

Le processus analytique comprend également l'étalonnage des instruments, l'établissement de courbes à l'aide de solutions étalons certifiées et la garantie d'un échantillonnage uniforme des échantillons de tôles d'alliage de tungstène afin d'éviter la ségrégation. Les interférences chimiques, telles que l'ionisation, sont atténuées en spectroscopie d'émission optique (OES) par l'ajout d'inhibiteurs. Pour des raisons de sécurité, la dissolution acide nécessite une aération. Les résultats sont généralement exprimés en pourcentages massiques afin d'évaluer l'équilibre stœchiométrique des systèmes d'alliages tels que le nickel-fer ou le nickel-cuivre.

### 5.1.2 Méthode quantitative pour la spectroscopie de fluorescence X de la composition des feuilles d'alliage de tungstène

La spectroscopie de fluorescence X (XRF) est une technique d'analyse de surface non destructive pour l'analyse quantitative des tôles d'alliage de tungstène. Elle utilise les rayons X pour exciter les atomes de l'échantillon, produisant une fluorescence caractéristique dont l'intensité est corrélée à la composition élémentaire, permettant ainsi une détermination rapide d'éléments tels que le tungstène, le nickel, le fer et le cuivre. La méthode se divise en deux catégories : la fluorescence X à dispersion de longueur d'onde (WD-XRF) et la fluorescence X à dispersion d'énergie (ED-XRF). La première offre une haute résolution, adaptée aux analyses de laboratoire précises, tandis que la seconde est portable et convient aux applications de terrain. La préparation de l'échantillon est simple ; la surface de la tôle d'alliage de tungstène nécessite uniquement un polissage et un nettoyage pour éliminer les interférences dues à la couche d'oxyde. Chimiquement, les rayons X caractéristiques proviennent de transitions électroniques internes, garantissant la spécificité élémentaire. Une source d'excitation, telle qu'un tube à rayons X,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

génère des rayons X primaires qui sont absorbés par les atomes de l'échantillon, émettant une fluorescence secondaire, laquelle est collectée par un détecteur.

L'analyse quantitative repose soit sur la méthode des paramètres fondamentaux, soit sur la méthode de correction empirique. La première calcule l'effet de matrice, tandis que la seconde établit des courbes à partir d'échantillons standards. La forte teneur en tungstène des tôles d'alliage de tungstène induit une absorption importante, nécessitant l'utilisation d'étalons adaptés à la matrice pour la corriger. La fluorescence X à dispersion de longueur d'onde (WD-XRF) sépare précisément les raies spectrales par spectroscopie cristalline, ce qui la rend adaptée à la quantification des éléments majeurs. La fluorescence X à dispersion d'énergie (ED-XRF), bien que présentant une résolution énergétique inférieure, est très efficace pour la détection simultanée de plusieurs éléments. L'avantage de cette méthode réside dans son caractère non destructif, préservant l'intégrité de l'échantillon et facilitant la répétabilité des mesures. L'analyse en profondeur est limitée aux surfaces de quelques micromètres et convient aux tôles uniformes.

Les interférences chimiques, telles que le chevauchement des raies spectrales, sont résolues par une analyse spectrale logicielle. Le chevauchement potentiel des raies L du tungstène et K du nickel nécessite une correction algorithmique. Le vide ou l'hélium améliorent la détection des éléments légers, tandis que les éléments lourds sont facilement disponibles sous atmosphère ambiante pour les tôles d'alliage de tungstène. La technologie XRF portable est désormais utilisée pour le contrôle rapide en production. La fiabilité des résultats a été vérifiée à l'aide de matériaux de référence certifiés, les écarts étant maîtrisés dans des limites acceptables. Le système offre une sécurité élevée et ne requiert aucun réactif chimique.

### 5.1.3 Analyse par titrage chimique des éléments traces dans les tôles d'alliage de tungstène

de tungstène est une méthode classique. Elle consiste à dissoudre l'échantillon et à le faire réagir avec des réactifs standard ; le point final est déterminé par le changement de couleur ou de potentiel d'un indicateur. Cette méthode convient à la recherche d'impuretés à l'état de traces spécifiques telles que le phosphore, le soufre ou certains ions métalliques. L'échantillon doit être complètement dissous avant l'analyse. Les feuilles d'alliage de tungstène sont souvent traitées thermiquement avec un mélange d'acide nitrique et d'acide fluorhydrique, ce qui forme un complexe soluble de tungstène et évite les interférences dues à la précipitation. Les éléments traces tels que le phosphore sont souvent titrés après complexation avec du bleu phosphomolybdique, tandis que le soufre est séparé par précipitation avant dosage. Les types de titrage comprennent les titrages redox, de complexation et acido-basiques, choisis en fonction des propriétés de l'élément.

Le titrage complexométrique utilise généralement l'EDTA comme titrant pour déterminer de faibles variations de la teneur en nickel ou en fer, l'équilibre chimique contrôlant la réaction. Le titrage redox convient au soufre ou à certains éléments de transition, et le titrage au permanganate de potassium ou le titrage iodométrique sont couramment utilisés. Le choix de l'indicateur est crucial ; un changement de couleur net signale le point d'équivalence. Le volume et la concentration de l'échantillon doivent être précis ; la microanalyse amplifie les erreurs et les réduit par des analyses parallèles multiples. Un prétraitement de séparation chimique est nécessaire ; par exemple, le phosphore doit être extrait de la matrice de tungstène pour éviter toute interférence de l'élément principal.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les avantages de cette méthode résident dans la simplicité du matériel requis, son faible coût et sa capacité à permettre la vérification en laboratoire des résultats spectraux. La sensibilité peut être améliorée par amplification de la réaction, notamment par détermination spectrophotométrique du point final. Les précautions de sécurité comprennent la mise en place d'une ventilation adéquate lors de la manipulation d'acides et la prévention des risques liés au fluorure d'hydrogène.

## 5.2 Méthodes de caractérisation de la microstructure des tôles en alliage de tungstène

tungstène repose principalement sur la microscopie électronique à balayage (MEB), l'analyse spectrale et la diffraction. Ces méthodes révèlent la distribution des grains, la composition de phase et les caractéristiques des défauts du matériau à différentes échelles, contribuant ainsi à la compréhension de la relation entre structure et propriétés. La microscopie électronique à balayage (MEB) est utilisée pour l'étude de la morphologie de surface et de la distribution de la composition, la diffraction des rayons X (DRX) analyse les phases et les structures cristallines, et la microscopie électronique en transmission (MET) se concentre sur les défauts internes. La préparation des échantillons avant caractérisation comprend la découpe, le polissage et l'aminicissement ionique afin d'éviter toute contamination. Le choix de la méthode dépend de l'objectif de la recherche : la MEB est privilégiée pour l'analyse de surface, la diffraction pour l'information cristalline et la MET pour les défauts à l'échelle nanométrique. La combinaison de ces méthodes permet une caractérisation multidimensionnelle ; par exemple, la combinaison de la MEB et de la diffraction permet de confirmer la structure de phase. Le principe chimique de ces méthodes repose sur l'interaction entre les électrons et la matière, les signaux d'excitation reflétant l'arrangement atomique. Le contrôle de l'environnement, notamment le vide, est crucial pour prévenir l'oxydation.

### 5.2.1 Cartographie de la morphologie et de la composition par microscopie électronique à balayage de feuilles d'alliage de tungstène

de tungstène est une méthode courante pour la caractérisation de la microstructure. Le balayage de la surface de l'échantillon par un faisceau d'électrons, générant des signaux d'électrons secondaires et rétrodiffusés, révèle la morphologie des particules de tungstène, la distribution de la phase liante et les caractéristiques de l'interface. Simultanément, la spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS) cartographie la distribution spatiale des éléments. Cette méthode repose sur l'interaction entre les électrons et les atomes. Les électrons incidents excitent les atomes de l'échantillon, générant des signaux caractéristiques ; les électrons secondaires reflètent la morphologie de surface ; et les électrons rétrodiffusés dépendent des différences de numéro atomique. Le numéro atomique élevé du tungstène rend ses particules plus brillantes que la phase liante, facilitant ainsi leur différenciation. La préparation de l'échantillon comprend un polissage mécanique suivi d'un polissage électrolytique ou ionique. La surface doit être recouverte d'une couche conductrice de carbone ou d'or pour éviter les effets de charge. L'imagerie est réalisée sous vide, avec un ajustement de la tension d'accélération afin d'optimiser la résolution et la profondeur de pénétration : une basse tension est adaptée aux détails de surface, tandis qu'une haute tension permet une observation plus profonde.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



L'observation morphologique révèle clairement la structure biphasée de la tôle d'alliage de tungstène. Les particules de tungstène sont sphériques ou polyédriques, la phase liante comblant les interstices pour former un réseau continu. Le grossissement peut être ajusté pour examiner les fissures ou les pores aux joints de grains. La cartographie de la composition chimique utilise un détecteur à rayons X pour collecter les pics caractéristiques, et un logiciel de traitement génère des cartes de distribution des éléments. Les zones riches en tungstène présentent des signaux denses, tandis que le nickel ou le fer sont enrichis dans la phase liante, révélant des zones de ségrégation ou de gradient. La résolution de la cartographie dépend de l'efficacité du détecteur et du temps d'acquisition ; des acquisitions plus longues améliorent le rapport signal/bruit. L'avantage de cette méthode réside dans sa combinaison intuitive d'informations morphologiques et chimiques, facilitant l'analyse des défauts structuraux causés par l'inhomogénéité du frittage. Des modes auxiliaires, tels que la diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD), permettent de caractériser plus précisément l'orientation cristalline ; chimiquement, les éléments ségrégeant aux joints de grains affectent le diagramme de diffraction.

De plus, cette méthode permet de suivre les modifications structurales après traitement thermique ; la comparaison d'échantillons recuits révèle une sphéroïdisation des particules et une liaison interphase améliorées. Les modes de balayage environnemental permettent l'observation d'échantillons humides, mais les tôles d'alliage de tungstène sont généralement analysées à sec. Un logiciel de traitement d'images contribue à la quantification de la distribution granulométrique et de la fraction volumique des phases ; les données de cartographie chimique peuvent être superposées aux images morphologiques pour obtenir une vue d'ensemble. La cartographie des impuretés, comme l'oxygène, révèle la localisation des inclusions d'oxyde, orientant ainsi les procédés de purification. La principale limite de cette méthode réside dans sa sensibilité de surface ; une observation en coupe transversale est nécessaire pour évaluer la structure profonde. En résumé, la cartographie morphologique et compositionnelle par microscopie électronique à balayage offre une approche de caractérisation microscopique complète pour les tôles d'alliage de tungstène, permettant la visualisation de la chimie structurale par le biais de mécanismes de signalisation électronique et contribuant à l'évaluation de la qualité des matériaux dans les applications de précision. Cette méthode permet également l'identification efficace de l'hétérogénéité structurale, optimisant ainsi les paramètres de traitement.

### 5.2.2 Analyse de la phase et de la structure cristalline par diffraction des rayons X de tôles en alliage de tungstène

X est une technique non destructive. Elle exploite l'interaction des rayons X avec les plans atomiques d'un cristal pour générer des pics de diffraction, permettant ainsi d'identifier la composition de phase et de déterminer les paramètres de maille. Ces informations contribuent à la compréhension de l'équilibre de phase et de la stabilité structurale de l'alliage. Cette analyse repose sur la loi de Bragg : les rayons X incidents sont réfléchis par le cristal, la position des pics correspond à l'espacement interplanaire et leur intensité reflète l'arrangement atomique. Les échantillons peuvent être des feuilles entières ou des poudres, à surface lisse afin d'éviter les interférences dues à la diffusion. La source de rayons X est généralement la  $K\alpha$  du cuivre ( $Cu-K\alpha$ ). Des détecteurs collectent les signaux de diffraction et un logiciel compare les spectres à des fiches de référence pour identifier les phases, telles que les pics de structure cubique centrée du tungstène et ceux de structure cubique à faces centrées de la phase liante. Lors de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'analyse de phase, les feuilles d'alliage de tungstène présentent des pics de tungstène intenses et fins, tandis que les pics de la phase liante sont plus faibles. La dissolution des éléments d'alliage provoque des décalages de pics, révélant le degré de solution solide.

L'analyse de la structure cristalline repose sur l'ajustement des pics pour calculer les paramètres de maille. Le paramètre  $\alpha$  de la phase tungstène varie peu avec la température, tandis que la phase liante se dilate ou se contracte selon le rapport fer/cuivre. L'influence de la composition chimique sur la diffraction se traduit par la largeur des pics : l'affinage des grains entraîne un élargissement, tandis que les échantillons recristallisés présentent un rétrécissement. L'analyse quantitative des phases estime les fractions volumiques à partir des rapports d'intensité intégrée, contribuant ainsi à la compréhension de la formation des phases frittées. Cette méthode présente l'avantage d'un balayage rapide de lots d'échantillons et est utilisable aussi bien en laboratoire que sur des appareils portables. Des modes avancés, comme la diffraction par chauffage in situ, permettent de suivre les transitions de phase à haute température et d'observer chimiquement la dissolution du tungstène. Le traitement des données comprend la soustraction du bruit de fond et la séparation des pics ; les spectres complexes nécessitent un ajustement multi-pics.

De plus, cette analyse permet d'évaluer efficacement les structures de déformation par laminage ; les variations d'intensité des pics de texture reflètent la distribution d'orientation et, chimiquement, la contrainte induite par la déformation affecte le déplacement des pics. Les phases impures, telles que les oxydes, présentent des pics faibles mais détectables, guidant la purification. Le contrôle environnemental par le vide ou un gaz inerte évite les interférences des pics d'oxydation. Les résultats de diffraction sont confirmés par la combinaison de ces méthodes avec d'autres techniques de caractérisation, telles que la microscopie électronique.

### 5.2.3 Observation des défauts microscopiques dans les tôles en alliage de tungstène par microscopie électronique à transmission

de tungstène est une technique de caractérisation à haute résolution. Grâce à un faisceau d'électrons de haute énergie qui pénètre des échantillons minces et génère des images en champ clair et en champ sombre ainsi que des diagrammes de diffraction, elle révèle des défauts nanométriques tels que des dislocations, des lacunes, des joints de grains et des précipités, contribuant ainsi à l'analyse de l'influence de la structure sur les performances. Cette observation repose sur l'interaction entre les ondes électroniques et le cristal ; la microscopie électronique en transmission révèle les contrastes des défauts, tandis que la diffraction électronique fournit des informations locales sur le cristal. Les échantillons doivent être amincis par pulvérisation ionique à quelques dizaines de nanomètres afin d'éviter toute déformation ou contamination. Des tensions d'accélération élevées sont utilisées pour pénétrer la forte densité du tungstène. Chimiquement, la diffusion des électrons dépend du numéro atomique, et le tungstène présente un contraste relativement élevé avec la phase liante. Lors de l'observation des défauts, les lignes de dislocation apparaissent courbées sur l'image en champ clair, et la ségrégation des éléments du cœur des dislocations affecte leur migration.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'observation des joints de grains révèle la structure interfaciale ; l'imagerie à haute résolution met en évidence l'arrangement atomique ; chimiquement, des éléments ségrégants tels que le bore s'accumulent à l'interface, renforçant la liaison. Les phases précipitées, comme les fines particules de tungstène, sont visualisées dans un réseau au sein de la phase liante, permettant d'observer leur forme et leur distribution. L'imagerie en champ sombre met en évidence des défauts spécifiques, et les comparaisons de diffraction analysent les types de dislocations. L'avantage de cette méthode réside dans sa résolution atomique, combinée à un filtrage énergétique pour éliminer les effets d'épaisseur. Le chauffage in situ est utilisé pour observer la dynamique des défauts, en comblant chimiquement les lacunes par diffusion à haute température. Le traitement des données comprend le filtrage d'images et la simulation pour confirmer le modèle de défaut.

De plus, cette observation permet de suivre efficacement les défauts de déformation par laminage ; les échantillons écrouis présentent des réseaux de dislocations à haute densité qui diminuent après recuit. Les défauts induits par des impuretés, tels que les composés aciculaires, peuvent être visualisés pour optimiser le contrôle. Un vide poussé est utilisé pour éviter toute contamination par le carbone. La méthode combine la cartographie élémentaire par microscopie électronique à transmission à balayage (STEM) afin d'obtenir des informations chimiques plus complètes sur les défauts.

### 5.3 Spécifications d'essai des indicateurs de performance pour les tôles en alliage de tungstène

tungstène sont principalement conformes aux normes nationales, aux normes industrielles et aux spécifications internes de l'entreprise. Ces spécifications définissent les méthodes de détermination des paramètres clés tels que la densité, la dureté, la résistance mécanique, la conductivité thermique et la conductivité électrique, garantissant ainsi la constance et la fiabilité du matériau dans les applications industrielles. Le processus d'essai met l'accent sur la représentativité des échantillons, l'étalonnage des instruments et le contrôle environnemental, notamment le fonctionnement sous humidité et température ambiante constantes. La densité et la densité de tassement sont mesurées par la méthode de déplacement d'eau ou la méthode de déplacement de gaz, tandis que la dureté est déterminée par les méthodes Brinell, Vickers ou Rockwell. Les spécifications incluent également des exigences de répétabilité, avec des valeurs moyennes issues de plusieurs échantillons afin de garantir l'uniformité. La composition chimique influe sur les performances lors des essais ; une correction des erreurs de mesure doit être appliquée lorsque la teneur en tungstène est élevée. Les rapports d'essai doivent mentionner le modèle de l'instrument, le numéro de l'étalon et l'analyse des écarts.

#### 5.3.1 Méthodes d'essai de la masse volumique et de la densité de tassement des tôles en alliage de tungstène

de tungstène peut être déterminée par la méthode d'Archimède par déplacement d'eau ou par déplacement de gaz. La première est adaptée aux analyses de routine en laboratoire, tandis que la seconde convient aux échantillons de haute précision ou à ceux ne pouvant être immergés dans un liquide. Cette méthode calcule la densité du matériau selon le principe du déplacement de volume et évalue la densité de tassement en la comparant à la densité théorique. Dans la méthode par déplacement d'eau, l'échantillon est d'abord séché et pesé, puis immergé dans de l'eau distillée ou de l'éthanol et pesé à nouveau pour

déterminer sa masse humide. Le choix du liquide doit être adapté afin d'éviter toute réaction avec l'alliage et toute dissolution superficielle. La formule de calcul tient compte de la densité du liquide et de la correction de température pour garantir une mesure précise. Lorsque l'échantillon est de forme régulière, le volume est mesuré directement ; pour les tôles de forme irrégulière, elles sont suspendues et immergées à l'aide d'un fil fin. Plusieurs mesures sont effectuées et moyennées afin de réduire les interférences dues aux bulles d'air.

La méthode de déplacement de gaz utilise de l'hélium ou de l'azote. L'échantillon est placé dans un récipient de volume connu, et les variations de pression du gaz reflètent le volume de l'échantillon. Les gaz chimiquement inertes empêchent l'oxydation. L'avantage de cette méthode réside dans son fonctionnement à sec, ce qui la rend adaptée aux feuilles minces ou aux surfaces facilement oxydables. Le calcul de la densité nécessite une densité théorique de référence, basée sur une moyenne pondérée des composants ; lorsque le tungstène est majoritaire, la valeur théorique est proche de celle du tungstène pur. Les spécifications des essais exigent des échantillons propres, exempts d'huile ou de calamine, et des mesures effectuées après polissage de la surface. La température ambiante est maintenue à température ambiante standard et l'humidité est faible afin d'éviter l'influence de l'eau adsorbée.

De plus, cette méthode est largement utilisée pour la vérification des lots de production, avec un échantillonnage multipoint permettant d'évaluer l'uniformité et de retracer le processus de frittage en cas d'écarts importants. La pureté chimique influe sur les résultats ; les impuretés et la porosité réduisent la densité mesurée. Des blocs étalons sont utilisés pour le calibrage de l'instrument et une vérification périodique est nécessaire. Lors des essais sur des sections minces, un empilement ou un pliage est requis afin d'éviter les erreurs de flexion. Les résultats sont exprimés en grammes par centimètre cube, en pourcentage de la densité. Les spécifications insistent sur la sécurité ; pour la méthode de déplacement d'eau, il convient de surveiller l'évaporation du liquide, et pour la méthode de déplacement de gaz, l'étanchéité doit être vérifiée.

### 5.3.2 Méthode d'essai de dureté des tôles en alliage de tungstène

de tungstène sont soumises à des essais de dureté Brinell, Vickers et Rockwell. Le choix de l'essai dépend de l'épaisseur du matériau et de la valeur attendue. La dureté Brinell est adaptée à la dureté globale, tandis que les deux autres essais sont utilisés pour l'analyse de surface ou pour les tôles minces. Ces méthodes évaluent la résistance à la déformation plastique en fonction de la taille ou de la profondeur de l'empreinte. L'essai de dureté Brinell utilise un pénétrateur en acier ou en carbure cémenté, pressé contre la surface de l'échantillon sous une charge déterminée. Après un temps de maintien précis, le diamètre de l'empreinte est mesuré pour calculer la valeur de dureté. Chimiquement, le matériau du pénétrateur doit être résistant à l'usure afin d'éviter les rayures dues à la phase tungstène. La surface de l'échantillon doit être polie et d'une épaisseur suffisante pour éviter toute déformation sur sa face arrière. Le choix de la charge tient compte de la dureté élevée de l'alliage et est généralement important pour obtenir une empreinte nette.

L'essai de dureté Vickers utilise un pénétrateur pyramidal en diamant à large plage de charge, adapté aux mesures de micro-surfaces. Les mesures de la diagonale de l'indentation sont effectuées sous microscope,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



et l'inertie chimique du diamant garantit la précision. De faibles charges sont utilisées pour les essais sur tôles minces afin d'éviter la pénétration. L'essai de dureté Rockwell est rapide : une précharge est appliquée, suivie de la charge principale. Les différences de profondeur sont mesurées directement, et les échelles HRA ou HRC conviennent aux tôles en alliage de tungstène. Les spécifications exigent des essais multipoints, un moyennage sur une grille et une évaluation de l'uniformité. La maîtrise des vibrations environnementales et le positionnement horizontal de l'instrument sont essentiels.

De plus, cette méthode permet un suivi efficace des performances après traitement thermique, démontrant une récupération de la dureté initialement diminuée sur les échantillons recuits. La composition chimique influe sur les résultats : une proportion plus élevée de la phase liante entraîne une dureté plus faible. Les traitements de surface, tels que les revêtements, doivent être éliminés du substrat avant la mesure. Des blocs étalons sont utilisés pour l'étalonnage et la vérification périodique de l'instrument. Des essais de pliage et de fixation sur tôles minces sont réalisés afin d'éviter les effets de bord. Les résultats sont exprimés en unités HB, HV ou HR, la charge étant spécifiée. Les spécifications mettent l'accent sur la sécurité ; une protection de l'indenteur est prévue pour éviter toute rupture.

### 5.3.3 Méthodes d'essai de la résistance à la corrosion des tôles en alliage de tungstène

La résistance à la corrosion des tôles en alliage de tungstène est évaluée par des essais d'immersion, des essais électrochimiques et des essais au brouillard salin. Ces méthodes simulent différents environnements corrosifs afin d'évaluer la résistance du matériau aux milieux acides, alcalins et salins, contribuant ainsi à optimiser la protection de surface et la composition. Les essais d'immersion constituent la méthode la plus simple. Les échantillons sont placés dans un milieu corrosif spécifique, et les variations de masse, la morphologie de surface et la composition de la solution sont observées périodiquement. Sur le plan chimique, des milieux tels que l'acide sulfurique, l'acide chlorhydrique ou des solutions de chlorure de sodium sont sélectionnés, et la température et la durée sont définies conformément aux normes. Après l'essai, l'échantillon est nettoyé, la perte de masse est mesurée pour calculer la vitesse de corrosion, et l'observation métallographique de surface permet de déceler les caractéristiques de corrosion par piqûres ou uniforme. L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité et son caractère intuitif, la rendant particulièrement adaptée aux études de comportement à la corrosion à long terme.

Les essais électrochimiques fournissent des informations dynamiques sur la corrosion, principalement grâce aux courbes de polarisation et à l'analyse par spectroscopie d'impédance. L'échantillon sert d'électrode de travail, immergé dans un électrolyte au sein d'un système à trois électrodes. Le balayage de potentiel enregistre les variations de courant et la densité de courant de corrosion est calculée par la méthode d'extrapolation de Tafel. Le potentiel d'autocorrosion reflète la stabilité thermodynamique. La spectroscopie d'impédance en courant alternatif mesure la résistance et la capacité interfaciales, et un modèle de circuit équivalent est ajusté pour évaluer l'effet protecteur du film de passivation. En raison de la forte réactivité de la phase liante dans les tôles d'alliage de tungstène, la stabilité de l'électrode de référence doit être soigneusement prise en compte lors des essais. Les essais au brouillard salin simulent un environnement marin, une solution de chlorure de sodium étant pulvérisée dans une chambre de brouillard salin neutre. La rouille superficielle ou la formation de piqûres sont observées périodiquement ;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chimiquement, la pénétration des ions chlorure induit une corrosion localisée, et les critères d'évaluation sont basés sur la surface corrodée.

Les spécifications des essais exigent que les échantillons présentent un état de surface homogène ; les essais réalisés après polissage ou revêtement doivent être signalés. Le contrôle environnemental doit garantir une température et une humidité constantes, en évitant toute interférence extérieure. Plusieurs essais en parallèle doivent être menés et la valeur moyenne utilisée pour l'analyse statistique de la profondeur ou de la vitesse de corrosion. Les produits de corrosion doivent être analysés chimiquement et les phases d'oxyde identifiées par diffraction des rayons X. Une combinaison de méthodes doit être employée, incluant l'immersion qualitative, l'analyse électrochimique quantitative et l'essai accéléré au brouillard salin. Les mesures de sécurité comprennent une ventilation adéquate des brouillards acides et la neutralisation des effluents liquides.

#### 5.3.4 Méthode d'essai de la résistance à l'usure des tôles en alliage de tungstène

Les principales méthodes d'essai de la résistance à l'usure des tôles en alliage de tungstène comprennent les essais d'usure par frottement disque-broche, les essais d'usure par rectification et les essais de frottement alternatif. Ces méthodes simulent le comportement à l'usure en conditions de frottement sec ou lubrifié, évaluent la perte de volume et le coefficient de frottement du matériau sous contrainte de contact et contribuent à optimiser la dureté et le traitement de surface. Lors de l'essai d'usure disque-broche, l'échantillon est fixé sous forme de disque et une charge est appliquée à la broche en rotation. La chaleur de frottement chimique induit une usure par oxydation, et le taux d'usure est calculé en enregistrant la perte de masse ou la profondeur de la trace d'usure. La charge et la vitesse de rotation sont ajustables pour simuler différentes conditions de fonctionnement. Le frottement sec met en évidence l'usure adhésive, tandis que la lubrification permet d'examiner l'effet des particules abrasives.

Le test d'usure par rectification utilise une meule standard pour rectifier la surface de l'échantillon et mesurer la perte de masse par unité de temps. Chimiquement, l'enrobage des grains abrasifs induit une usure par coupe, adaptée aux tôles d'alliage de tungstène à haute dureté. Les spécifications du test contrôlent la granulométrie de la meule et la pression afin d'assurer la reproductibilité. Le test de frottement alternatif simule un mouvement linéaire, une bille ou un axe glissant d'avant en arrière sur l'échantillon. Des capteurs enregistrent la force de frottement en temps réel et calculent le coefficient moyen. Chimiquement, la fatigue de surface entraîne un écaillage, et la microstructure de la trace d'usure est observée pour analyser le mécanisme. La microscopie confocale laser ou la profilométrie quantifie le volume de la trace d'usure.

Les spécifications d'essai exigent un polissage uniforme de la surface des échantillons et des essais multidirectionnels pour évaluer l'anisotropie. L'environnement doit être contrôlable, en tenant compte de facteurs tels que l'influence de l'humidité sur l'usure par oxydation. Un nettoyage chimique élimine les débris d'usure, garantissant une grande précision de pesée. La microscopie électronique à balayage est utilisée pour analyser la surface usée et la spectroscopie à dispersion d'énergie pour identifier le film de transfert. Une combinaison de méthodes est employée, incluant la quantification de la perte de volume

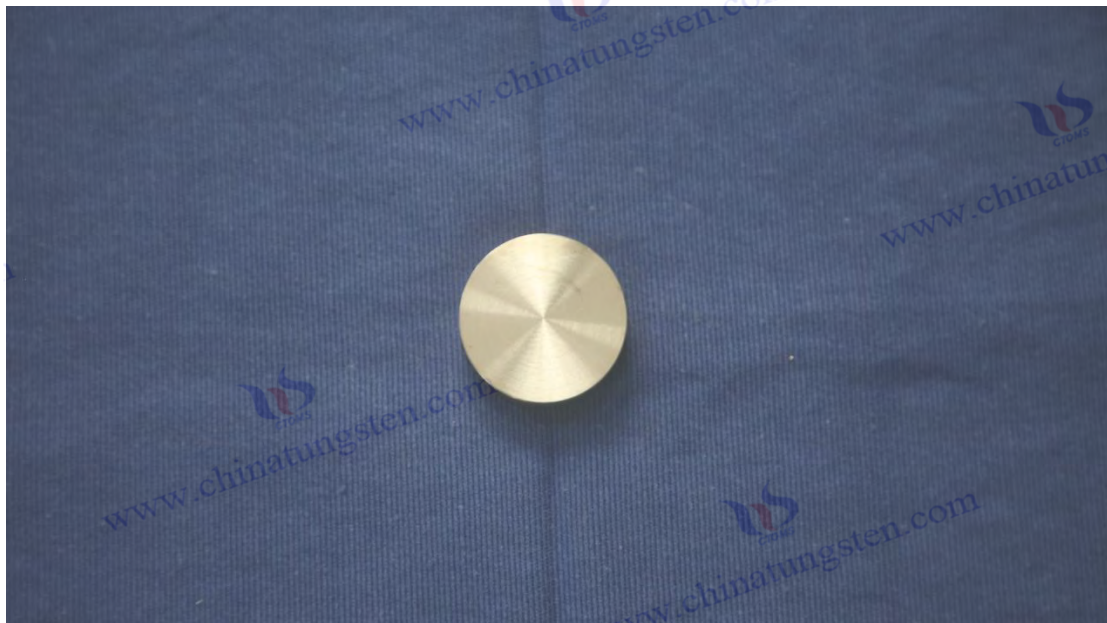
#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

par la méthode du disque à pointe et le calcul des coefficients dynamiques alternatifs. Des mesures de sécurité comprennent la collecte des poussières afin d'éviter leur inhalation.

### 5.3.5 Méthode d'essai de la résistance des tôles en alliage de tungstène

de tungstène sont soumises à des essais de traction, de flexion et de compression. Ces méthodes permettent de mesurer la résistance à la traction, la limite d'élasticité et le comportement à la rupture du matériau, contribuant ainsi à évaluer sa fiabilité mécanique et son aptitude à la mise en œuvre. L'essai de traction est la méthode la plus couramment utilisée. Les échantillons sont usinés sous forme de bandes rectangulaires ou en haltère et soumis à une traction uniaxiale sur une machine d'essai universelle. La courbe charge-déplacement est enregistrée et le glissement des dislocations chimiques domine la déformation plastique. La résistance à la traction et l'allongement sont calculés. Des extensomètres sans contact sont utilisés pour les essais sur tôles afin d'éviter les dommages liés au serrage. La vitesse de déformation est contrôlée lentement pour capturer un comportement quasi statique.

Les essais de flexion conviennent aux tôles minces ; on applique des charges de flexion en trois ou quatre points pour mesurer la résistance à la flexion et la flèche. L'analyse chimique évalue la compression de surface et la compatibilité en traction des couches internes, permettant ainsi d'évaluer l'adhérence intercouche. Les essais de compression sont destinés aux tôles ou blocs épais ; la compression axiale d'échantillons cylindriques courts permet d'enregistrer la courbe contrainte-déformation. Les tôles en alliage de tungstène présentent une plasticité limitée à haute densité. Les spécifications des essais exigent des dimensions d'échantillon normalisées et une surface exempte de défauts. La température ambiante est ajustable afin d'étudier la dégradation de la résistance à haute température. La propagation des fissures est surveillée en temps réel pendant l'essai, grâce à l'émission acoustique. L'analyse chimique de la surface de rupture et l'observation au microscope électronique à balayage des cupules ou des clivages permettent de différencier les modes de rupture.



CTIA GROUP LTD Feuilles d'alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Chapitre six : Procédé de préparation des feuilles d'alliage de tungstène

### 6.1 Procédé de préparation et classification des tôles en alliage de tungstène

fabrication de tôles en alliage de tungstène repose principalement sur le procédé de métallurgie des poudres. Ce procédé comprend plusieurs opérations unitaires, de la poudre de matière première à la tôle finie : mélange des poudres, pressage, frittage, traitement thermomécanique et post-traitement. La classification des tôles est basée sur le système d'alliage, les propriétés recherchées et les spécifications d'épaisseur. La méthode de préparation principale est le frittage en phase liquide, complété par des variantes en phase solide ou par frittage activé. La conception du procédé tient compte des caractéristiques réfractaires et de haute densité du tungstène afin de garantir une densification et une microstructure uniforme. Un procédé typique commence par le mélange homogène de poudre de tungstène de haute pureté et de poudre de liant, suivi d'un pressage isostatique à froid pour former une billette, d'un frittage à haute température pour réorganiser et lier les particules, puis d'un amincissement progressif par laminage à chaud, à tiède et à froid, avec un recuit intermédiaire pour relâcher les contraintes, et enfin d'une finition de surface. En matière de classification, les tôles haute densité privilégient la teneur en tungstène et la densité, tandis que les tôles non haute densité peuvent contenir des pseudo-alliages ou des structures composites. L'épaisseur influe sur le choix du procédé : les tôles minces nécessitent un laminage de précision, tandis que les tôles épaisses requièrent un découpage initial plus précis.

La flexibilité du procédé de préparation permet des ajustements en fonction de l'application ; par exemple, les plaques de protection médicale privilégient l'uniformité, tandis que les plaques industrielles résistantes à l'usure privilégient le renforcement par une phase dure. Les principes chimiques imprègnent l'ensemble du procédé : le mouillage par la phase liquide induit la densification lors du frittage, et la coordination de la déformation pendant la transformation repose sur la plasticité de la phase liante. La maîtrise de l'environnement, notamment l'utilisation d'une atmosphère d'hydrogène pour prévenir l'oxydation, et le contrôle de la pureté pour éviter l'introduction de défauts dus aux impuretés, sont essentiels. L'optimisation du procédé, en particulier l'intégration du pressage isostatique à chaud et du frittage par plasma étincelle ces dernières années, améliore la qualité des ébauches initiales et simplifie les étapes de transformation ultérieures. La classification peut également reposer sur la méthode de frittage : frittage traditionnel au four à hydrogène et frittage sous vide. Le premier est moins coûteux, tandis que le second offre un meilleur contrôle des impuretés.

#### 6.1.1 Procédé principal de préparation des tôles en alliage de tungstène

tungstène sont fabriquées par métallurgie des poudres et se déclinent en trois procédés : le frittage en phase liquide traditionnel, le frittage activé et le procédé composite par infiltration en phase fondue. Le choix du procédé dépend de la nature de l'alliage et des performances recherchées, afin de garantir une transformation complète de la poudre en tôle. Le frittage en phase liquide traditionnel est la méthode la plus aboutie. La poudre de tungstène est d'abord mélangée mécaniquement ou broyée à billes avec de la poudre de nickel, de fer ou de cuivre dans des proportions spécifiques. Le mélange est ensuite pressé isostatiquement à froid pour former un lingot de grande taille. Sous protection d'hydrogène, la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



température est ensuite portée au-dessus de la température d'émergence de la phase liquide et maintenue afin de favoriser la fusion et le mouillage de la phase liante ainsi que la densification des particules de tungstène, induisant un réarrangement et une dissolution-reprécipitation. Après frittage, le lingot est forgé à haute température ou laminé à chaud pour réduire progressivement son épaisseur jusqu'à une valeur intermédiaire, puis soumis à des laminages à chaud et à froid, suivis de plusieurs recuits sous vide pour éliminer les contraintes. Enfin, il est décapé ou poli en feuilles.

Le procédé de frittage activé est conçu pour les systèmes difficiles à densifier. Une petite quantité d'activateurs, tels que le palladium et le nickel, est ajoutée à la poudre afin d'abaisser la température de frittage et de favoriser la diffusion en phase solide. Chimiquement, les activateurs s'agglomèrent à l'interface, réduisant ainsi l'énergie de surface. Ce procédé convient aux tôles en tungstène-cuivre ou à haute teneur en tungstène. Ses avantages incluent une faible consommation d'énergie et une microstructure fine, mais les résidus d'activateurs nécessitent un traitement ultérieur. Le procédé composite par infiltration en phase fondue consiste d'abord à presser et à fritter une structure poreuse en tungstène, puis à infiltrer sous vide du cuivre ou de l'argent liquide. Chimiquement, le métal liquide remplit les pores, formant une structure pseudo-alliée. Le laminage ultérieur facilite l'ultra-aminçissement, ce qui rend ce procédé adapté aux tôles thermiquement et électriquement conductrices.

Le choix du procédé de fabrication tient compte de l'extensibilité et du coût. Les procédés traditionnels conviennent à la production en série des systèmes nickel-fer et nickel-cuivre, tandis que les procédés d'infiltration en fusion sont conçus pour les systèmes tungstène-cuivre. Des procédés auxiliaires, tels que le pressage isostatique à chaud, peuvent être intégrés à n'importe quel procédé afin d'améliorer la densité initiale et de réduire les fissures de laminage. Un contrôle chimique est mis en œuvre tout au long du procédé, la gestion du point de rosée de l'atmosphère prévient l'oxydation et l'homogénéité du mélange est assurée par une granulométrie adaptée. Des traitements de surface, tels que le placage chimique, sont intégrés aux extrémités du procédé pour améliorer la résistance à la corrosion. Pour des raisons environnementales, les déchets de matériaux recyclés sont broyés et réutilisés.

### **6.1.2 Différences de procédé entre les tôles en alliage de tungstène haute densité et les tôles non haute densité**

La différence entre les tôles en alliage de tungstène haute densité et les tôles non haute densité réside dans leur composition, leurs paramètres de frittage et leurs procédés de fabrication. Les premières visent à maximiser la teneur en tungstène et la densité, tandis que les secondes privilégient des fonctions spécifiques telles que la conductivité thermique ou l'équilibre à basse densité. Les tôles haute densité présentent généralement une teneur en tungstène plus élevée et une proportion de phase liante plus faible. Le procédé utilise un maintien prolongé en phase liquide et un pressage isostatique à chaud secondaire pour minimiser la porosité et réduire chimiquement le volume de la phase molle afin d'approcher la densité théorique. La température de frittage est contrôlée avec précision dans la plage de température appropriée de la phase liquide pour éviter un écoulement excessif susceptible d'entraîner un affaissement. Le procédé de fabrication privilégie un laminage à chaud à forte réduction suivi d'un recuit intermédiaire rigoureux pour garantir une microstructure uniforme et une grande régularité d'épaisseur du produit fini.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Pour les tôles de densité moyenne, comme les pseudo-alliages tungstène-cuivre, la teneur en tungstène peut être réduite et le procédé s'oriente vers l'infiltration en phase fondue. Dans un premier temps, la structure en tungstène est frittée, créant une porosité intentionnelle, puis du cuivre est infiltré pour combler les vides. Chimiquement, la phase cuivre ne forme pas de solution solide, assurant ainsi une conductivité thermique élevée. La température de frittage est plus basse et le procédé privilégie l'adaptabilité au laminage à froid. Grâce à la bonne plasticité du cuivre, il est aisé d'obtenir des épaisseurs ultra-minces sans recuits fréquents. Les variantes de frittage activé sont courantes pour les tôles de densité moyenne, avec des additifs favorisant la densification à basse température, et conviennent aux systèmes tungstène-argent ou composites. Les différences résident également dans le traitement de surface : les tôles de haute densité sont souvent nickelées pour protéger la phase liante, tandis que les tôles de densité moyenne exploitent directement la résistance à la corrosion du cuivre.

De plus, les différences de procédés influent sur la consommation d'énergie et le rendement. Les procédés haute densité nécessitent des équipements sophistiqués et des délais de production longs, mais offrent des performances stables ; les procédés non haute densité sont plus flexibles et adaptés à la production de petites séries de plaquettes fonctionnelles. La gestion de la pureté chimique est plus rigoureuse dans les procédés haute densité, car les impuretés peuvent facilement amplifier la porosité. En matière de contrôle environnemental, les procédés haute densité requièrent de l'hydrogène de haute pureté, tandis que les procédés non haute densité utilisent l'infiltration sous vide pour prévenir l'oxydation.

### 6.1.3 Plage d'épaisseur typique et sélection du procédé correspondant (0,05 mm à 50 mm)

L'épaisseur des tôles en alliage de tungstène varie généralement de 0,05 mm (feuilles ultra-minces) à 50 mm (plaques). Le choix du procédé de fabrication doit trouver un équilibre entre la complexité de la mise en œuvre et la maîtrise de la microstructure. Pour les tôles minces, le laminage de précision est privilégié, tandis que pour les tôles épaisses, la préparation des billettes et le forgeage sont essentiels. Pour les tôles ultra-minces de 0,05 mm à 0,5 mm, le laminage à froid multipasse est le procédé principal, garantissant un rendement global élevé. Une légère augmentation de la proportion de liant permet d'améliorer la ductilité et de prévenir les fissures en bordure. Un recuit intermédiaire sous vide poussé est souvent réalisé pour éliminer les contraintes, et des lubrifiants sont utilisés pour limiter les dommages de surface. Enfin, un polissage chimique ou une finition électrolytique assure une surface lisse.

Le procédé est particulièrement bien maîtrisé pour les tôles d'une épaisseur de 0,5 à 10 mm, depuis le laminage à chaud jusqu'à la finition par laminage à froid. Le laminage à chaud implique d'importantes réductions d'épaisseur à chaque passe, avec des transitions à chaud et des recuits optimisés permettant d'obtenir une microstructure fibreuse. Pour les tôles d'une épaisseur de 10 à 50 mm, le procédé se concentre sur la mise en forme initiale, suivie d'un forgeage ou d'un laminage à chaud pour obtenir des billettes minces de grande taille, pressées isostatiquement à froid. Une atmosphère protectrice à haute température est utilisée pour prévenir la décarburation, et la vitesse d'usinage est réduite afin de préserver la résistance. La surface est principalement enlevée par fraisage pour éliminer la couche d'oxyde.

Le choix du procédé tient compte des capacités des équipements : les tôles minces nécessitent des laminoirs de haute précision et un contrôle de la tension, tandis que les tôles épaisses requièrent de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

grandes presses à forger. Les principes chimiques se reflètent dans l'épaisseur : les tôles minces dissipent rapidement la chaleur et présentent un écrouissage important ; les tôles épaisses subissent des effets thermiques cumulatifs, ce qui impose un contrôle du gradient de température. La gestion de l'uniformité devient de plus en plus complexe avec l'épaisseur, nécessitant des contrôles de densité multipoints pour les tôles épaisses. Les facteurs environnementaux jouent également un rôle ; les tôles minces sont sensibles à l'oxydation et requièrent un emballage sous gaz inerte.

## 6.2 Préparation de la poudre de matière première

La préparation des poudres de matières premières est une étape fondamentale de la production de tôles en alliage de tungstène, influençant directement l'uniformité, la densité et les propriétés finales de la structure frittée. Cette préparation comprend la réduction et la purification de la poudre de tungstène, la sélection et le prétraitement des poudres d'éléments d'alliage, ainsi que leur homogénéisation par mélange. La poudre de tungstène, matière première principale, exige une pureté élevée et une granulométrie adaptée pour garantir le mouillage et le réarrangement des particules lors du frittage en phase liquide. Les poudres d'éléments d'alliage, tels que le nickel, le fer et le cuivre, constituent une phase liante et doivent présenter une granulométrie et une réactivité compatibles avec celles de la poudre de tungstène. Le processus de préparation met l'accent sur le contrôle de la pureté chimique et des propriétés physiques afin d'éviter l'introduction d'impuretés dans les phases fragiles ou les pores. Un processus typique débute par la réduction à l'hydrogène du tungstate d'ammonium, se poursuit par l'atomisation de la poudre d'alliage ou la décomposition du carbonyle, puis par le tamisage et le mélange pour obtenir un dosage homogène. La distribution granulométrique et le tamisage selon la méthode de Fisher sont des points clés du contrôle qualité pour garantir la fluidité de la poudre et ses performances de pressage.

Le principe chimique de la préparation repose sur des réactions de réduction et la régulation de l'énergie de surface. De l'hydrogène de haute pureté est utilisé pour réduire et éliminer l'oxygène, et la poudre d'alliage est prétraitée afin de prévenir l'oxydation. Les procédés modernes intègrent le séchage par atomisation ou l'alliage mécanique pour améliorer l'efficacité du mélange et affiner la microstructure. En raison des facteurs environnementaux, la poudre doit être stockée sous atmosphère sèche et inerte pour éviter l'absorption d'humidité. La qualité des matières premières influe directement sur l'uniformité de l'épaisseur du produit fini et sur son taux de défauts ; une poudre fine est préférable pour la production de tôles minces, tandis qu'une poudre grossière convient aux plaques épaisses.

### 6.2.1 Exigences de préparation et de qualité de la poudre de tungstène de haute pureté

La préparation de poudre de tungstène de haute pureté repose principalement sur la réduction à l'hydrogène du tungstate d'ammonium ou de l'oxyde de tungstène. Ce procédé permet d'obtenir une purification élevée et un contrôle précis de la granulométrie du tungstène grâce à une réduction en plusieurs étapes, garantissant ainsi l'activité et la propreté de la poudre lors du frittage des tôles d'alliage. Le processus de préparation débute par la dissolution et la recristallisation du tungstate d'ammonium, suivies d'une calcination pour produire du tungstène jaune ou de l'oxyde de tungstène bleu. Ce dernier subit ensuite une réduction à l'hydrogène par étapes dans un four tubulaire ou un four à poussée. La première étape consiste en une réduction à basse température pour éliminer l'eau de cristallisation et une

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

partie de l'oxygène, tandis que la seconde étape consiste en une réduction à haute température pour produire la poudre de tungstène métallique. Chimiquement, la réaction de réduction implique la réaction du  $WO_3$  avec  $H_2$  pour produire  $W$  et  $H_2O$ . La vapeur d'eau est rapidement éliminée par contrôle du point de rosée afin d'éviter la réoxydation de la poudre de tungstène. Les paramètres du procédé, tels que la vitesse du four à poussée, le débit d'hydrogène et le gradient de température, régulent la granulométrie de la poudre. Des températures plus basses et des vitesses plus lentes favorisent la formation d'une poudre plus fine.

Les exigences de qualité portent sur la pureté, la granulométrie et la morphologie. La pureté requiert une faible teneur en oxygène et des traces de métaux alcalins et de phosphore/soufre afin de prévenir les défauts de frittage. La granulométrie est généralement déterminée par la méthode de Fisher ; une poudre fine favorise la densification, tandis qu'une poudre grossière confère une meilleure résistance. La morphologie exige des formes quasi sphériques ou polyédriques avec des surfaces propres et agglomérées pour faciliter le mélange et l'écoulement. Les tests comprennent l'analyse chimique des impuretés, l'observation de la morphologie par microscopie électronique à balayage et l'analyse de la distribution granulométrique par laser. Lors de la préparation, le tungstate d'ammonium, matière première, subit plusieurs recristallisations pour éliminer le sodium et le calcium, puis est séché sous hydrogène de haute pureté. Des procédés alternatifs, tels que la réduction par plasma ou la fusion au zinc, sont utilisés pour récupérer le tungstène et améliorer encore sa pureté.

Les exigences de qualité de cette préparation sont liées à l'application de la tôle d'alliage. Les tôles de blindage médical requièrent des impuretés extrêmement faibles afin d'éviter la diffusion des rayonnements, tandis que les tôles industrielles résistantes à l'usure tolèrent des grains légèrement plus grossiers pour améliorer la dureté. Le stockage nécessite un conditionnement sous vide ou sous gaz inerte pour prévenir l'humidité et l'oxydation. La stabilité chimique est une exigence fondamentale ; la poudre est sujette à la passivation à l'air, formant une fine couche d'oxyde qui affecte le mouillage, ce qui impose une activation préalable par réduction.

### 6.2.2 Sélection et prétraitement des poudres d'éléments d'alliage (Ni, Fe, Cu, Co, Mo, etc.)

Les poudres d'éléments d'alliage, comme le nickel, le fer, le cuivre, le cobalt et le molybdène, sont essentielles à la formulation des tôles en alliage de tungstène. Le choix de l'élément repose sur la mouillabilité du diagramme de phase et la compatibilité fonctionnelle, tandis que le prétraitement garantit l'activité et la pureté de la poudre, évitant ainsi un frittage irrégulier. La poudre de nickel est généralement préparée par décomposition du carbonyle, ce qui permet d'obtenir une granulométrie fine, une activité élevée et une bonne ductilité. La poudre de fer est préparée par électrolyse ou réduction, offrant des propriétés magnétiques modérées facilitant le mélange. La poudre de cuivre est préparée par atomisation ou électrolyse, assurant une excellente conductivité thermique pour les systèmes non magnétiques. La poudre de cobalt renforce la phase liante. Enfin, la poudre de molybdène remplace partiellement le tungstène pour réguler la dilatation. Les critères de sélection incluent une pureté élevée, une faible teneur en oxygène et une granulométrie compatible avec celle de la poudre de tungstène, généralement avec des tailles de particules de Fisher similaires afin d'éviter la ségrégation.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Le prétraitement comprend une réduction par l'hydrogène pour éliminer la couche d'oxyde superficielle. Chimiquement, l'hydrogène réagit avec les oxydes pour générer de l'eau, qui est ensuite évacuée, augmentant ainsi l'angle de mouillage. Le dégazage sous vide réduit davantage les impuretés gazeuses, et le tamisage élimine les agglomérats et les corps étrangers. Le broyage à billes ou l'activation mécanique pré-allient certains éléments, tels que le nickel-fer prémélangé, pour former une poudre en solution solide, améliorant ainsi l'homogénéité. La température de traitement est contrôlée avec précision afin d'éviter le frittage de la poudre. Un nettoyage chimique, tel qu'un lavage à l'acide, élimine les taches d'huile, mais les poudres d'alliage de tungstène sont souvent traitées à sec pour prévenir la corrosion.

De plus, les différences de sélection et de prétraitement reflètent les exigences du système : la poudre de fer du système nickel-fer nécessite une protection antirouille, tandis que la poudre de cuivre du système nickel-cuivre présente une forte résistance à l'oxydation. Une poudre de molybdène de haute pureté est sélectionnée pour l'atomisation afin d'obtenir une densité similaire à celle du tungstène. Les contrôles qualité comprennent l'analyse chimique de l'oxygène, du carbone et la granulométrie.

### **6.2.3 Contrôle de la distribution granulométrique des poudres et détection de la taille des particules par la méthode de Fisher**

Les principales méthodes de contrôle qualité lors de la préparation des matières premières pour tôles d'alliage de tungstène reposent sur l'optimisation de la distribution granulométrique. Celle-ci est obtenue par l'ajustement des paramètres de réduction et le tamisage, tandis que la méthode Fisher permet d'évaluer la taille moyenne des particules afin de garantir les performances de pressage et de frittage. Le contrôle de la distribution granulométrique se reflète dans la réduction de la poudre de tungstène : des températures élevées et des vitesses de rotation rapides produisent une poudre grossière, tandis que des températures basses et des vitesses lentes produisent une poudre fine. Sur le plan chimique, la cinétique de réduction influence la croissance des germes cristallins, et l'ajustement du débit d'hydrogène et de la concentration en vapeur d'eau permet de limiter le grossissement anormal des particules. L'atomisation ou le broyage de la poudre d'alliage contrôle le resserrement de la distribution, évitant ainsi l'agglomération due à une poudre extrêmement fine ou la porosité due à une poudre grossière. Les analyseurs de taille de particules laser ou les méthodes de tamisage permettent de contrôler la courbe de distribution ; idéalement, celle-ci devrait être log-normale, une large distribution facilitant le resserrement et la densification.

La distribution granulométrique de Fisher repose sur le principe de la perméation d'air. La résistance de la couche de poudre reflète la taille moyenne des particules, et l'adsorption chimique des gaz en surface influence la perméation. La reproductibilité est bonne dans des conditions standard. L'échantillon est séché et tassé uniformément, et le diamètre du sous-tamis est calculé à partir de la différence de pression. Simple et rapide, cette méthode est adaptée au contrôle de production et couvre une gamme typique de poudres de tungstène, des plus fines aux plus grossières, afin de répondre aux exigences d'épaisseur. Le contrôle est associé à des ajustements de mélange : la poudre de tungstène fine est mélangée à une poudre d'alliage grossière pour optimiser la fluidité.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Ce contrôle et cette détection sont liés à l'uniformité du produit fini ; une distribution étroite est préférable pour des feuilles minces sans défaut, tandis qu'une distribution large permet d'obtenir des feuilles épaisses à haute résistance. La pureté chimique influe sur la détection ; des niveaux d'oxygène élevés et l'agglomération de la poudre entraînent des valeurs plus élevées. Le contrôle de l'humidité ambiante est crucial pour éviter que l'échantillon n'absorbe d'eau.

#### 6.2.4 Méthodes de mélange et d'alliage des poudres

Le mélange et l'alliage des poudres sont des étapes d'homogénéisation essentielles à la préparation des tôles d'alliage de tungstène. Une distribution uniforme des éléments est obtenue par mélange mécanique, broyage à billes ou séchage par atomisation afin d'éviter la ségrégation au frittage. Le mélange mécanique utilise généralement des mélangeurs en V ou à double cône à faible vitesse de rotation pour prévenir la séparation des particules. Chimiquement, les forces électrostatiques ou de van der Waals à la surface des poudres influencent l'uniformité, et des additifs tels que l'alcool favorisent la dispersion. La durée de mélange peut être prolongée jusqu'à plusieurs heures pour garantir un mélange homogène. L'alliage par broyage à billes utilise un broyage à haute énergie, où l'impact induit des réactions mécanochimiques, pré-alliant certains éléments, affinant la granulométrie et améliorant l'activité. Toutefois, une protection par gaz inerte est nécessaire pour prévenir l'oxydation.

Le séchage par atomisation consiste à atomiser et sécher une suspension de poudre en particules sphériques, en les liant temporairement avec un liant chimique afin d'améliorer leur fluidité et leur compressibilité. L'avantage de cette méthode réside dans l'homogénéité de la poudre composite, ce qui la rend adaptée à une production à grande échelle. Après mélange, des échantillons sont prélevés pour analyse chimique ou microscopie électronique afin de vérifier la distribution ; l'homogénéité est définie par une faible variation de la composition élémentaire.

Les différences entre ces méthodes reflètent l'échelle de production : le mélange mécanique est simple et économique, le broyage à billes convient au raffinement des microstructures et le séchage par atomisation permet d'obtenir une uniformité de haute qualité. Les principes chimiques sous-jacents reposent sur la diffusion et l'adsorption, et le mélange favorise le contact entre les surfaces. Le stockage est crucial pour éviter la séparation des particules, et les vibrations doivent être proscrites.

#### 6.3 Procédé de moulage par poudre

Le moulage par poudre est une étape cruciale de la production de tôles en alliage de tungstène, assurant la liaison entre la poudre brute et les ébauches frittées. Il transforme la poudre en ébauches crues présentant une forme, une résistance et une densité spécifiques, par application de pression ou à l'aide d'agents de mélange. Ce procédé influe directement sur l'uniformité du retrait lors du frittage ultérieur et sur la régularité de la microstructure du produit fini. Les méthodes de moulage comprennent le pressage isostatique à froid, le moulage par compression et le moulage par injection, choisies en fonction des caractéristiques de la poudre, des dimensions de l'ébauche et de l'épaisseur souhaitée. Les poudres d'alliage de tungstène présentent une faible fluidité et une faible compressibilité, ce qui impose de prendre en compte la densité élevée du tungstène et l'effet mouillant du liant lors du moulage. Les principes du

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

procédé reposent sur le réarrangement des particules, la déformation plastique et les effets de friction ; l'uniformité de la répartition de la pression détermine le gradient de densité de l'ébauche crue. Une résistance suffisante de l'ébauche crue est nécessaire pour faciliter sa manipulation et son déliantage , et éviter les fissures et les déformations. Des additifs chimiques, tels que la paraffine ou les polymères, renforcent temporairement la liaison avant d'être éliminés.

Ces dernières années, l'optimisation des procédés de moulage s'est concentrée sur l'écologisation et l'automatisation. Le pressage isostatique à froid convient aux ébauches de grandes dimensions, le moulage par compression aux pièces de petites et moyennes dimensions, et le moulage par injection s'étend désormais aux ébauches minces de formes complexes. La maîtrise de l'environnement, notamment le maintien d'une atmosphère sèche pour prévenir l'oxydation des poudres et une décompression lente pour éviter le retour élastique , est essentielle. La densité de l'ébauche crue après moulage correspond généralement à un certain pourcentage de la valeur théorique, et son optimisation permet de réduire les variations dues au retrait de frittage. La maîtrise des défauts porte sur le délaminage et l'hétérogénéité de densité, qui sont atténués par l'ajustement des paramètres de procédé.

### 6.3.1 Pressage isostatique à froid

Le pressage isostatique à froid (PIC) est une méthode de préparation d'ébauches de tôles en alliage de tungstène. Elle utilise un fluide caloporteur pour transmettre une pression uniforme, comprimant la poudre dans un moule flexible afin de former une ébauche crue de haute densité. Cette méthode convient aux ébauches de grandes dimensions ou de formes complexes, garantissant une pression isotrope. Le procédé consiste à remplir un moule en caoutchouc ou en plastique avec la poudre mélangée, à le sceller, puis à le placer dans une enceinte haute pression. L'eau ou l'huile sert de fluide de transmission de la pression, et celle-ci est augmentée progressivement jusqu'au niveau souhaité. Après maintien de cette pression pendant une durée déterminée, l'ébauche est dépressurisée et extraite. Chimiquement, la pression uniforme favorise un réarrangement compact des particules, réduisant les gradients de densité dus au frottement. La dureté élevée de la poudre de tungstène comble efficacement les interstices lors du pressage isostatique, et la poudre de la phase liante contribue à une déformation coordonnée.

Les avantages de ce procédé de moulage résident dans la distribution uniforme de la densité de l'ébauche brute, la rendant ainsi apte au laminage ultérieur et évitant les zones de faible densité en bordure, fréquentes en moulage. La conception flexible de la matrice permet la production d'ébauches cylindriques, plates ou de formes irrégulières, et l'ajout d'une petite quantité de lubrifiant améliore le remplissage. Un contrôle précis de la dépressurisation prévient les microfissures dues au retour élastique. La résistance de l'ébauche brute est optimisée par l'adéquation de la granulométrie de la poudre ; les poudres plus fines offrent de bonnes propriétés de remplissage mais nécessitent une protection contre l'agglomération. L'optimisation des paramètres du procédé porte sur la vitesse de pressurisation et le temps de maintien ; des temps de maintien plus longs favorisent la fixation des particules.

Ce procédé de formage est largement utilisé pour la production de tôles en alliage de tungstène haute densité. Les billettes de grande taille, après pressage isostatique à froid, sont laminées à chaud avec un rendement élevé. La maîtrise de la pureté chimique est cruciale ; un milieu propre est indispensable pour

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

éviter toute contamination. La surface de la billette brute est lisse après démoulage, ce qui réduit les surépaisseurs d'usinage ultérieures. Des variantes, comme la méthode du sac sec, simplifient les opérations, tandis que la méthode du sac humide offre une plus grande flexibilité. Pour des raisons environnementales, le recyclage des matériaux de moule permet de réduire les coûts.

### 6.3.2 Moulage par compression et optimisation des paramètres de pression

Le moulage par compression et l'optimisation des paramètres de pression sont des méthodes traditionnelles de production d'ébauches de petites dimensions en tôle d'alliage de tungstène. Ce procédé consiste à comprimer de la poudre pour lui donner forme, à l'aide d'une pression unidirectionnelle ou bidirectionnelle appliquée par un moule en acier. L'équipement est simple, ce qui le rend adapté à la production en série. L'optimisation porte sur la répartition de la pression et un démoulage aisé. Le procédé consiste à remplir un moule rigide de poudre, à appliquer une pression à l'aide d'une presse hydraulique, ce qui provoque le réarrangement et la déformation des particules par friction contre la paroi du moule, formant ainsi une ébauche. Chimiquement, la poudre de tungstène a une compressibilité limitée ; l'ajout de liants temporaires tels que la cire de paraffine renforce la liaison interparticulaire et améliore la résistance de l'ébauche. La compression unidirectionnelle nécessite la lubrification de la paroi du moule pour réduire la friction, tandis que la compression bidirectionnelle améliore l'uniformité de la densité.

L'optimisation des paramètres de pression comprend l'amplitude de la charge, la vitesse de pressurisation et le temps de maintien. Une pression élevée augmente la densité mais favorise le délaminage, tandis qu'une pression faible engendre une porosité accrue. L'optimisation est déterminée expérimentalement, avec une pressurisation progressive afin d'éviter la concentration des contraintes. Les agents de démoulage, tels que les revêtements chimiques à base de stéarate de zinc, réduisent le frottement et empêchent l'adhérence. Les gradients de densité à cru sont atténués grâce à l'utilisation de matrices flottantes ou de matrices multi-poinçons.

Des ébauches de tôles en alliage de tungstène d'épaisseur standard sont ensuite forgées ou laminées. Des proportions optimisées d'additifs chimiques assurent un équilibre entre résistance et dégraissage complet. Un contrôle progressif de la décompression réduit les risques de fissuration par retour élastique. Des techniques comme le pressage à chaud améliorent la fluidité, mais les alliages de tungstène sont généralement transformés à température ambiante. Un contrôle environnemental garantit la sécheresse de la poudre et prévient l'absorption d'humidité.

### 6.3.3 Application du moulage par injection aux préformes en feuilles minces

Le moulage par injection est utilisé pour la production de préformes en tôle mince. Une poudre d'alliage de tungstène est mélangée à un liant organique pour former une charge, qui est ensuite injectée sous haute pression dans un moule afin de former des ébauches brutes complexes ou à parois minces. Cette méthode élargit la gamme de formes possibles en métallurgie des poudres et convient au préformage de précision de tôles minces. Le procédé commence par la préparation de la charge. La poudre est mélangée à haute température avec un liant à base de cire ou de polymère, le liant encapsulant chimiquement les particules pour améliorer la fluidité. Après granulation, la charge est injectée dans un moule chauffé, où la pression

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



la pousse à remplir la cavité. Le refroidissement et la solidification permettent ensuite le démoulage de l'ébauche. Un dégraissage chimique élimine le liant, tandis qu'un dégraissage par solvant ou thermique décompose la matière organique, laissant une préforme poreuse qui est ensuite frittée pour atteindre la densité requise.

Les avantages de cette application résident dans le formage quasi-définitif, l'épaisseur uniforme de la tôle mince et la surface lisse, réduisant ainsi l'usinage. Un apport élevé de tungstène nécessite une viscosité optimisée pour éviter la ségrégation. Les paramètres d'injection, tels que la température et la pression, doivent correspondre aux caractéristiques de la poudre, et une conception précise du moule est essentielle pour contrôler l'épaisseur de paroi.

Cette application présente un fort potentiel pour la fabrication de préformes en tôles d'alliage de tungstène ultra-minces, permettant la réalisation de formes complexes telles que des tôles perforées. Le liant chimique, à faible teneur en carbone résiduel, prévient la fragilisation par les carbures. Un déliantage lent évite la formation de cloques et de fissures. Le retrait au frittage est ensuite maîtrisable. Ce liant est recyclable, contribuant ainsi à la réduction de la pollution.

#### 6.3.4 Procédé de renforcement et de dégraissage du corps vert

L'amélioration de la résistance à cru et le déliantage sont des étapes cruciales après moulage. La résistance à cru est accrue par l'ajout d'additifs ou un préfrittage, tandis que le déliantage élimine les liants temporaires pour garantir un frittage ultérieur sans défaut. Parmi les méthodes d'amélioration de la résistance, on peut citer l'augmentation du taux de liant, le préfrittage à basse température, le pontage chimique des particules de liant et une légère diffusion pendant le préfrittage pour former des liaisons col. La résistance à cru des pièces moulées dépend de la pression, tandis que les matières premières moulées par injection présentent une résistance intrinsèque élevée.

Les procédés de dégraissage se divisent en deux catégories : le dégraissage par solvant et le dégraissage thermique. Le dégraissage par solvant consiste à immerger le matériau dans un solvant organique pour dissoudre la cire de base, tandis que le dégraissage thermique décompose le polymère par chauffage. Le contrôle chimique de la vitesse de chauffage permet d'éviter une vaporisation rapide et la formation de bulles. Un procédé de dégraissage combiné, solvant suivi de chaleur, est très efficace et laisse peu de résidus. L'optimisation des paramètres de procédé prévient la fissuration, et les matériaux de support facilitent la préparation de la billette. Ce procédé est particulièrement important pour les billettes moulées par injection ; un dégraissage complet influe sur la pureté du frittage. Un équilibre doit être trouvé entre l'amélioration de la résistance et le dégraissage ; une liaison trop forte rend le dégraissage difficile. L'analyse chimique du carbone résiduel permet de contrôler l'efficacité du dégraissage. Les solvants sont récupérés par traitement des gaz résiduels.

#### 6.4 Procédé de frittage

Le frittage est l'étape cruciale de la fabrication des tôles en alliage de tungstène. Par traitement à haute température, la billette crue est transformée en un matériau massif de haute densité, éliminant la porosité

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et formant une microstructure biphasée stable. Ce procédé détermine directement la densité du matériau, la distribution des phases et la résistance de l'interface. Les méthodes de frittage comprennent le frittage vertical sous atmosphère d'hydrogène, le frittage sous vide et le frittage intégré couplé au pressage isostatique à chaud (PIC). Le frittage sous hydrogène convient aux systèmes traditionnels en phase liquide, le frittage sous vide privilégie le contrôle des impuretés et les procédés intégrés améliorent la qualité des billettes complexes. Les principes du procédé reposent sur la diffusion en phase solide, le réarrangement en phase liquide et les mécanismes de dissolution-reprécipitation. Les particules de tungstène se sphéroïdisent sous l'effet du mouillage par la phase liante, renforçant ainsi la liaison chimique interfaciale. La température, l'atmosphère et les paramètres de maintien doivent être adaptés avec précision au système d'alliage pour éviter un frittage excessif (grossissement) ou un frittage insuffisant (porosité).

Ces dernières années, l'optimisation du frittage a intégré des fours continus et une commande intelligente afin d'améliorer l'homogénéité et l'efficacité énergétique. L'atmosphère chimique joue un rôle prépondérant : l'hydrogène réduit les oxydes et le vide élimine les impuretés volatiles. Le mode de chargement des billettes influe sur le champ de température ; le chargement par suspension verticale ou par nacelle réduit les déformations. La vitesse de refroidissement régule les phases précipitées, un refroidissement lent favorisant l'homogénéité. La prévention des défauts se concentre sur le cloquage et la fissuration, atténués par un prédégazage et un chauffage par gradient.

#### 6.4.1 Technologie de frittage vertical sous atmosphère d'hydrogène

Le frittage vertical sous atmosphère d'hydrogène est une méthode classique de densification des billettes en alliage de tungstène. Le chauffage dans un four protégé par l'hydrogène, sous une nacelle en molybdène ou en suspension, permet un frittage en phase liquide et une réduction des impuretés. Cette technologie convient à la production en série de systèmes nickel-fer et nickel-cuivre. Le procédé consiste à placer la billette crue verticalement ou dans une nacelle, sous flux continu d'hydrogène. La température est portée au-dessus de la température de liquidus et maintenue, permettant ainsi la réaction de réduction pour éliminer les oxydes de surface, tandis que la vapeur d'eau est évacuée par le flux gazeux. Chimiquement, l'hydrogène réagit avec l'oxygène pour produire de l'eau, maintenant la billette propre, favorisant le mouillage des particules de tungstène par la phase liante et facilitant le réarrangement et la densification. La disposition verticale réduit le contact entre la billette et la nacelle, évitant l'adhérence et la contamination localisée.

L'avantage technologique réside dans le double effet de l'atmosphère réductrice, qui réduit les impuretés tout en protégeant le tungstène contre l'oxydation et la volatilisation. Les fours utilisés sont principalement des fours à poussée continue ou des fours à cloche ; les premiers offrent un haut degré d'automatisation, tandis que les seconds garantissent une température plus uniforme. La courbe de chauffage est segmentée : un dégazage à basse température élimine le liant résiduel, une diffusion en phase solide se produit à température moyenne, et un maintien en phase liquide à haute température est effectué. Durant cette phase de maintien, les particules de tungstène se sphéroïdisent et le mécanisme de dissolution-reprécipitation affine l'interface. Le refroidissement est contrôlé à une vitesse contrôlée sous hydrogène afin d'éviter la fissuration par contrainte thermique.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cette technologie est parfaitement maîtrisée pour le frittage de tôles en alliage de tungstène haute densité. Un contrôle rigoureux du point de rosée de l'hydrogène garantit une réduction suffisante à bas point de rosée et prévient toute sur-réduction à point de rosée élevé. L'espacement optimisé des billettes assure un flux d'air uniforme et réduit les gradients de température. La pureté chimique est améliorée par une filtration de l'hydrogène en plusieurs étapes. Des variantes, comme l'hydrogène humide, permettent de contrôler l'humidité et de favoriser l'élimination de l'oxygène. Le traitement des gaz résiduels, respectueux de l'environnement, neutralise l'humidité.

#### 6.4.2 Contrôle de la plage de température et du temps de maintien lors du frittage en phase liquide

Le contrôle de la plage de température et du temps de maintien lors du frittage en phase liquide est un paramètre essentiel du frittage des tôles d'alliage de tungstène. Il influe directement sur la quantité de phase liquide, le réarrangement des particules et l'évolution de la microstructure. Ce contrôle garantit une densification suffisante tout en évitant une croissance anormale. La plage de température se situe au-dessus du point de fusion de la phase liante. Après l'apparition de la phase liquide, une quantité adéquate s'écoule et mouille les particules de tungstène. La réduction de l'énergie de surface, au niveau chimique, induit un réarrangement, dissolvant les petites particules et les précipitant à la surface des plus grosses. Une plage trop étroite entraîne une quantité insuffisante de phase liquide et une faible densité, tandis qu'une plage trop basse provoque l'affaissement ou la ségrégation de la pièce crue. Cette plage est plus élevée dans les systèmes nickel-fer et plus basse dans les systèmes nickel-cuivre, ce qui nécessite un ajustement en fonction du diagramme de phase.

Le temps de maintien contrôle le degré de réaction en phase liquide ; un temps de maintien court favorise le réarrangement, tandis qu'un temps de maintien long favorise la dissolution-reprécipitation et la sphéroïdisation. Le temps de maintien optimal a été déterminé expérimentalement, avec une densification rapide en phase initiale et un affinement lent en phase finale. La vitesse de chauffage influe sur le point d'entrée de la fenêtre de réaction ; une vitesse de chauffage lente évite la surchauffe localisée. Le contrôle de l'atmosphère est utilisé conjointement ; le flux d'hydrogène élimine les composés volatils, maintenant ainsi la stabilité de la fenêtre de réaction. Ce contrôle varie selon l'épaisseur des billettes ; les billettes plus épaisses bénéficient d'une plage de chauffe plus restrictive afin d'éviter toute déformation, tandis que les billettes plus fines peuvent profiter d'une conservation thermique prolongée pour favoriser l'homogénéité. Des additifs chimiques, comme le cobalt, élargissent la plage de chauffe et améliorent la fluidité. La surveillance est assurée par des mesures de température multipoints à l'aide de thermocouples, garantissant ainsi une température constante au sein du four. Le refroidissement est lent et s'effectue par la plage de chauffe afin de préserver la microstructure. Parmi les variantes, on trouve la conservation thermique segmentée, avec une montée en température progressive pour une conservation thermique optimisée. Une gestion énergétique respectueuse de l'environnement permet de réduire le temps de conservation thermique.

#### 6.4.3 Procédé intégré de frittage sous vide et de frittage-pressage isostatique à chaud

Le frittage sous vide et le frittage par compression isostatique à chaud (HIP) sont des méthodes avancées de production de billettes en alliage de tungstène de haute qualité. Le premier élimine les impuretés

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gazeuses grâce à un vide poussé, tandis que le second combine le frittage à la densification sous pression, améliorant ainsi la qualité des billettes complexes ou exigeantes. Ce procédé convient aux pseudo-alliages tungstène-cuivre ou aux systèmes de haute pureté. Le frittage sous vide consiste à chauffer dans un four sous vide, où la dépression élimine les gaz interstitiels et les impuretés volatiles, empêchant chimiquement la formation de résidus d'hydrogène, maintenant la propreté des interfaces et favorisant la diffusion en phase solide ou en phase liquide. La température est plus élevée qu'en frittage traditionnel afin de compenser l'absence de flux en phase liquide.

Le procédé intégré de frittage et de pressage isostatique à chaud (PIC) est réalisé dans un seul équipement. Une prédensification par frittage sous vide est d'abord effectuée, suivie d'un pressage isostatique à chaud sous pression d'argon, garantissant une pression uniforme dans toutes les directions afin d'éliminer les pores fermés. Chimiquement, la haute température et la haute pression accélèrent la diffusion, assurant un contact étroit entre les particules de tungstène et une meilleure adhésion interfaciale. L'avantage du procédé réside dans la réduction des contaminations grâce au chargement d'un seul four, convenant aussi bien aux billettes enrobées que non enrobées. Ce procédé présente un fort potentiel pour le prétraitement des billettes en tôle ultra-mince, réduisant les défauts intermédiaires grâce à son intégration. La gestion du vide est cruciale ; un vide poussé évite les pertes par volatilisation. Les courbes de température et de pression sont liées, le frittage précédant la pressurisation. La haute pureté chimique le rend adapté aux alliages dopés aux terres rares. Un refroidissement lent sous vide évite les contraintes. Le pressage à chaud rapide est une variante. Un système de retour d'huile de la pompe à vide est mis en œuvre.

#### 6.4.4 Conception des outillages de contrôle et de support de la déformation par frittage

Le contrôle des déformations lors du frittage et la conception des supports sont des aspects cruciaux du procédé de frittage des billettes en alliage de tungstène. Un support adéquat et un réglage précis des paramètres de procédé réduisent les déformations dues à la gravité et au gauchissement causés par le ramollissement à haute température, garantissant ainsi la précision dimensionnelle et l'homogénéité de la microstructure de la billette. L'apparition d'une phase liquide pendant le frittage diminue la résistance de la billette, et la gravité peut facilement provoquer son affaissement ou sa flexion. Chimiquement, l'écoulement de la phase liante exacerbe les déformations. Le contrôle doit commencer par la méthode de support et la position de chargement du four. Des plaques d'alumine ou de molybdène de haute pureté sont couramment utilisées dans la conception des supports, car elles résistent aux hautes températures et sont indéformables. Les revêtements de surface empêchent l'adhérence, et les revêtements chimiques tels que le nitrure de bore réduisent le frottement et les réactions.

Diverses options d'outillage sont disponibles. Les billettes plates utilisent un support multipoints ou un remplissage sur lit de sable, les particules de sable dispersant les contraintes. Chimiquement, le sable de quartz de haute pureté présente une bonne inertie. La suspension verticale convient aux billettes longues, des brides fixant les deux extrémités pour réduire la flexion. La conception tient compte de la dilatation thermique afin d'éviter la fissuration sous contrainte thermique. Le contrôle de la déformation comprend également des vitesses de chauffage lentes, un dégazage complet à basse température et des temps de maintien courts en phase liquide pour réduire le temps d'écoulement. L'optimisation de la posture de la billette, comme son inclinaison pour compenser la gravité, est également mise en œuvre.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Une atmosphère chimique synergique assure un flux d'hydrogène uniforme et réduit le ramollissement localisé. Lors du refroidissement, les supports sont maintenus à basse température afin d'éviter toute déformation due à la relaxation des contraintes thermiques. L'outillage réutilisable nécessite un nettoyage pour éliminer les résidus. Des variantes, comme les supports flexibles en fibres céramiques, s'adaptent à différentes formes. Le recyclage écologique des matériaux permet de réduire les coûts.

#### 6.4.5 Garantir l'uniformité de la température lors du frittage de plaques de grande taille

L'uniformité du champ de température lors du frittage de plaques de grande taille est cruciale pour obtenir une microstructure et une densité homogènes. Ceci est réalisé en minimisant les gradients de température grâce à la conception du four, aux méthodes de chargement et à la régulation du chauffage, évitant ainsi les surcuissons et les sous-cuissons localisées. Les plaques de grande taille possèdent une capacité thermique élevée, ce qui les rend sujettes à une distribution non uniforme de la température au sein du four. Chimiquement, les différences de température influent sur le moment de l'apparition de la phase liquide, entraînant un réarrangement incohérent. Pour pallier ce problème, la structure du four est optimisée, avec une régulation indépendante de la température dans plusieurs zones de chauffage et un système de thermocouples multipoints pour le réglage de la puissance. Des plaques de protection contre le rayonnement répartissent uniformément le flux de chaleur, réduisant ainsi les pertes thermiques en périphérie.

La méthode de chargement du four privilégie l'espacement et le positionnement des billettes, avec un élément chauffant auxiliaire placé au centre et un matériau à haute conductivité thermique au fond pour un transfert de chaleur uniforme. Une atmosphère chimique est mise en circulation, l'hydrogène entrant et sortant du four à agitation par de multiples voies. La courbe de chauffage est segmentée et progressive, avec des ajustements de puissance effectués pendant la phase de maintien. Le système de surveillance cartographie le champ de température en temps réel, interrompant les ajustements en cas d'écarts significatifs.

Ce type de garantie est complexe lors du frittage de plaques épaisses, où le chargement multicouche du four nécessite une rotation ou un retournement pour un chauffage uniforme. Les revêtements de four de haute pureté réduisent la contamination affectant le rayonnement thermique. Un refroidissement uniforme prévient les gradients de contraintes thermiques. Parmi les variantes, on trouve le chauffage par induction avec compensation localisée. La gestion environnementale de l'énergie permet des économies d'énergie grâce à une régulation multizone.

### 6.5 Travail thermique et traitement thermique

Le travail à chaud et le traitement thermique sont les étapes de contrôle de la déformation et de la microstructure des tôles en alliage de tungstène, depuis les billettes frittées jusqu'aux tôles finies. Le forgeage à haute température, le laminage à chaud, le laminage tiède et le recuit permettent de réduire l'épaisseur et d'optimiser les performances. Ce procédé remédie à la fragilité des billettes frittées et introduit des structures fibreuses pour améliorer la résistance et la ténacité. Le principe du travail à chaud repose sur la restauration dynamique et la recristallisation : chimiquement, les hautes températures

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

activent les systèmes de glissement, et la phase liante coordonne la déformation des particules de tungstène. Le forgeage rompt la structure de coulée, le laminage à chaud réduit l'épaisseur par une déformation importante, et le recuit intermédiaire relâche les contraintes et restaure la plasticité. Le traitement thermique comprend un recuit sous vide et un vieillissement pour ajuster la taille des grains et la nature des précipités.

L'optimisation du procédé vise à adapter les plages de température et les taux de déformation. Le traitement à haute température est plus aisé mais nécessite une protection contre l'oxydation, tandis que le durcissement à basse température est plus rapide mais présente un risque de fissuration. Le contrôle de l'atmosphère utilise l'hydrogène ou le vide pour prévenir la décarburation ou l'oxygénation. La conception des passes de laminage intègre une réduction progressive, et la lubrification réduit les dommages de surface. L'uniformité de la température du four pendant le traitement thermique est cruciale, car la vitesse de refroidissement influe sur la microstructure. La prévention des défauts se concentre sur les fissures de bord et le délaminage, atténués par le revêtement ou la pression latérale. En résumé, le travail à chaud et le traitement thermique illustrent l'exploitation technique de la plasticité à haute température, offrant une voie de déformation pour les tôles d'alliage de tungstène, des pièces massives aux feuilles minces.

#### 6.5.1 Procédé de forgeage et de laminage à chaud

Le forgeage et le laminage à chaud constituent les premières étapes de la mise en forme à chaud des tôles en alliage de tungstène. La déformation importante à haute température amincit ou aplatit la billette frittée, brisant les structures grossières et introduisant des textures de déformation, préparant ainsi le terrain pour le laminage à froid ultérieur. Le forgeage utilise généralement le forgeage libre ou le forgeage en matrice. La billette est chauffée à haute température puis martelée ou pressée sous protection d'hydrogène. Chimiquement, la haute température réduit la résistance à la déformation et la phase liante s'écoule pour enrober les particules de tungstène, empêchant leur rupture. Le forgeage multidirectionnel, avec des directions alternées, favorise une déformation uniforme et permet la formation initiale de la microstructure fibreuse.

Le laminage à chaud succède au forgeage, avec plusieurs passes permettant d'amincir davantage la billette. Chaque passe implique une réduction significative, et les cylindres sont chauffés ou la billette est maintenue à température constante. Chimiquement, le laminage à chaud induit une restauration dynamique active, le réarrangement des dislocations réduisant l'accumulation de durcissement. Une atmosphère protectrice ou un revêtement prévient l'oxydation, et des lubrifiants réduisent le frottement. Un réchauffage entre les passes restaure la plasticité. L'optimisation des paramètres implique une diminution progressive de la température ; un laminage initial à haute température est sujet à la déformation, tandis qu'une finition à basse température garantit une surface lisse.

Ce procédé est particulièrement visible lors de la production de tôles épaisses en alliage de tungstène. La forte déformation totale induite par le forgeage élimine la porosité de frittage, tandis que le laminage à chaud permet d'obtenir une forme de plaque. La maîtrise de la pureté chimique est essentielle, et un point de rosée atmosphérique bas prévient la fragilisation par l'hydrogène. La prévention des fissures en

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bordure est assurée par des cylindres à coins arrondis ou des guides latéraux. Une variante consiste en un laminage à chaud de revêtement pour protéger la surface. La récupération de la chaleur résiduelle permet de réaliser des économies d'énergie.

### 6.5.2 Le forgeage multidirectionnel améliore l'uniformité de la microstructure

Le forgeage multidirectionnel est une méthode efficace pour améliorer l'uniformité de la microstructure lors du travail à chaud de tôles en alliage de tungstène. En alternant les directions de déformation, on obtient une distribution équilibrée des contraintes internes et de la microstructure dans la billette, réduisant ainsi la ségrégation et la porosité résiduelles du frittage. Cette méthode de forgeage est largement utilisée lors de la préparation des billettes. Après chauffage de la billette à haute température, celle-ci est forgée alternativement selon plusieurs axes. Chimiquement, la haute température active la déformation coordonnée des particules de tungstène, et la phase liante s'écoule pour combler les interstices, favorisant le réarrangement des particules et la fragmentation des gros agrégats. Le forgeage unidirectionnel tend à former des textures directionnelles et des gradients de densité, tandis que le forgeage multidirectionnel disperse la ségrégation grâce à des champs de contraintes transversaux, rendant la microstructure plus isotrope.

Le procédé de forgeage comprend généralement plusieurs passes, chacune inversant la direction (par exemple, selon la séquence des axes XYZ). La déformation totale s'accumule progressivement et la déformation chimique répétée induit une restauration dynamique, le réarrangement des dislocations réduisant le durcissement localisé. Le réchauffage au four entre les changements de direction restaure la plasticité et prévient les fissures d'écrouissage. Ce procédé présente l'avantage d'améliorer l'uniformité au centre des billettes de grande taille et de réduire l'écart de densité entre les bords et le centre. Des dispositifs de support facilitent le positionnement et préviennent les déformations asymétriques.

Ce procédé de forgeage joue un rôle déterminant dans la production de tôles en alliage de tungstène haute densité, permettant d'obtenir une microstructure affinée, une sphéroïdisation accrue des particules de tungstène et une meilleure adhérence interfaciale. La maîtrise de la pureté chimique est essentielle, et une atmosphère protectrice est indispensable pour prévenir l'oxydation et garantir une déformation coordonnée optimale. L'adéquation de la fréquence de forgeage et du taux de réduction évite une vitesse excessive susceptible d'entraîner des déchirures internes. Différentes combinaisons, comme les forges radiales et axiales, peuvent être adaptées à diverses formes. La valorisation de la chaleur résiduelle permet de réaliser des économies d'énergie.

### 6.5.3 Recuit intermédiaire et traitement thermique de relaxation des contraintes

Le recuit intermédiaire et le traitement thermique de relaxation des contraintes sont des étapes intermédiaires nécessaires lors du travail à chaud des tôles en alliage de tungstène. Ces procédés, réalisés sous vide ou sous atmosphère protectrice, libèrent les contraintes résiduelles et l'écrouissage accumulés pendant le laminage, restaurant la plasticité du matériau et le préparant pour la passe de déformation suivante. Ce traitement thermique est effectué après le laminage à chaud ou entre deux passes de laminage à froid, la température étant contrôlée en dessous ou légèrement au-dessus du seuil de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

recristallisation. Chimiquement, la diffusion à haute température induit la migration et l'annihilation des dislocations, tandis que le ramollissement de la phase liante coordonne la relaxation des contraintes des particules de tungstène. Le recuit sous vide prévient l'oxydation et les procédés à base d'hydrogène réduisent davantage la surface.

Le recuit comprend des phases de chauffage, de maintien et de refroidissement. Le maintien permet une relaxation des contraintes suffisante, un affinement chimique de la microstructure par migration des joints de grains et la dissolution ou l'homogénéisation des phases précipitées. Un refroidissement lent prévient l'apparition de nouvelles contraintes. L'avantage de ce procédé réside dans la prévention des fissures de bord ou du délaminage dus à l'écrouissage cumulatif, un facteur crucial pour la restauration lors du laminage multipasse. La plage de température est adaptée à l'alliage ; une plage plus élevée est utilisée pour les alliages nickel-fer afin de favoriser la restauration.

Ce traitement thermique est fréquemment utilisé dans la production de tôles minces. Il comprend de nombreux cycles de recuit après une forte déformation due au laminage à froid afin d'optimiser l'efficacité globale du processus. La pureté de l'atmosphère chimique est essentielle, et un point de rosée bas prévient la fragilisation par l'hydrogène. Une température uniforme du four garantit des résultats constants pour plusieurs billettes. Des techniques comme le recuit en gradient permettent d'optimiser les différences entre la surface et le cœur. L'entretien de la pompe à vide réduit la contamination.

#### 6.5.4 Traitement par mise en solution à haute température et refroidissement rapide

Le traitement de mise en solution à haute température et le refroidissement rapide constituent des méthodes de renforcement lors du traitement thermique des tôles en alliage de tungstène. En dissolvant les éléments d'alliage à haute température et en les fixant rapidement à un état de sursaturation, on améliore la résistance et la stabilité à haute température du matériau. Ce traitement est souvent appliqué après la mise en forme à chaud finale ou lorsque des exigences de performance spécifiques sont satisfaites. La mise en solution consiste à chauffer la tôle à une température supérieure à celle à laquelle la phase liante est totalement dissoute, puis à la maintenir à cette température. Chimiquement, les atomes de tungstène se dissolvent partiellement dans la phase liante, formant une solution solide sursaturée. La diffusion des éléments interfaciaux renforce la liaison. La durée du maintien permet une dissolution uniforme, évitant ainsi la ségrégation localisée.

Le refroidissement rapide, comme la trempe à l'eau ou au gaz, fige le matériau à haute température, inhibant chimiquement la précipitation et préservant les phases dispersées fines ou les effets de renforcement par solution solide. Le choix du fluide de refroidissement permet d'équilibrer les contraintes de trempe et le risque d'oxydation ; la trempe sous gaz inerte est plus douce. Ce procédé présente l'avantage d'améliorer la dureté et la résistance à la chaleur, grâce à des phases liantes sursaturées qui bloquent les dislocations et augmentent la résistance mécanique.

Ce traitement est appliqué aux tôles d'alliage de tungstène résistantes à l'usure ou à dissipation thermique. Il accroît la résistance après mise en solution, mais nécessite un contrôle de la ténacité. Une atmosphère chimique sous vide empêche la décarburation. Un contrôle précis de la température évite la surchauffe

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



et la formation de grains grossiers. Des techniques telles que le refroidissement par paliers optimisent la répartition des contraintes. Le recyclage des fluides utilisés réduit la consommation.

## 6.6 Laminage à froid et laminage à chaud pour la préparation des feuilles

Le laminage à froid et le laminage à chaud sont des étapes de finition dans la production de tôles en alliage de tungstène. Par laminage multipasse à température ambiante ou moyenne, la billette travaillée à chaud est progressivement amincie jusqu'à l'épaisseur cible, formant une microstructure fine et une excellente qualité de surface. Ce procédé convient à la préparation de tôles de dimensions allant du millimètre au micromètre. Le laminage à froid, effectué à température ambiante, entraîne un écrouissage important et une déformation totale élevée. Le laminage à chaud, quant à lui, favorise la restauration à température moyenne, réduisant ainsi le risque de fissuration. Les principes du procédé reposent sur la multiplication des dislocations, la restauration dynamique et la formation de texture. Chimiquement, la phase liante coordonne les particules de tungstène pendant la déformation, empêchant la rupture fragile. La réduction de matière par passe doit être progressive, avec une réduction initiale importante pour la mise en forme et une réduction plus faible pour la finition lors des étapes suivantes. Le sens de laminage et le contrôle de la texture influent sur l'anisotropie, et la gestion des bords prévient la fissuration.

L'optimisation du procédé repose sur la lubrification et le contrôle de la tension. Le laminage à froid utilise une lubrification à l'huile pour réduire le frottement, tandis que le laminage à chaud recourt à une protection par gaz inerte pour prévenir l'oxydation. Des recuits intermédiaires permettent de relâcher les contraintes et de restaurer la plasticité. La production de tôles minces exige une grande précision de laminage et un système de laminage à haute rigidité afin d'éviter les variations d'épaisseur. La prévention des défauts se concentre sur les fissures et l'effet peau d'orange, qui sont corrigés par ébarbage et contrôle de surface.

### 6.6.1 Spécifications de distribution de la déformation totale et de réduction de passe lors du laminage à froid

La répartition de la déformation totale par laminage à froid et le programme de réduction des passes sont les aspects fondamentaux de la planification du procédé d'amincissement des tôles en alliage de tungstène. En répartissant rationnellement la vitesse de traitement totale et la réduction par passe, on assure une déformation uniforme et des contraintes contrôlables, évitant ainsi les fissures et les gauchissements. Ce programme débute avec une billette laminée à chaud, où la déformation totale est souvent importante afin d'obtenir un renforcement à grain fin et une précision d'épaisseur optimale. Le principe de répartition consiste à utiliser initialement une réduction plus importante à chaque passe pour exploiter la thermoplasticité résiduelle lors de la mise en forme, puis à réduire progressivement la réduction lors des passes suivantes pour affiner la surface. Chimiquement, la réduction importante active le système de glissement multiple, permettant à la phase liante de s'écouler complètement et d'encapsuler les particules de tungstène, réduisant ainsi la fragmentation des particules. La conception du programme tient compte de l'état du matériau : l'écrouissage initial à froid est lent, ce qui autorise une réduction plus importante, tandis que l'accumulation ultérieure de l'écrouissage nécessite une réduction plus faible et des intervalles de recuit plus espacés. L'application uniforme d'huile lubrifiante entre les passes réduit le frottement des

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cylindres et empêche chimiquement leur collage, qui peut provoquer des rayures superficielles. Le contrôle de la tension permet de stabiliser la forme de la tôle et d'éviter les ondulations au centre et sur les bords. La déformation totale est calculée en fonction de l'épaisseur cible ; les tôles ultra-minces nécessitent plusieurs cycles de laminage et de recuit.

Ce procédé permet des ajustements précis lors du passage d'une épaisseur standard à des tôles minces. Les alliages à haute teneur en tungstène bénéficient d'un laminage conservateur afin d'éviter les fissures sur les bords. La gestion de l'atmosphère chimique prévient l'oxydation de la tôle laminée. Le procédé enregistre l'épaisseur de chaque passe et corrige les écarts en temps réel. Des variantes telles que le laminage asymétrique optimisent la forme de la tôle. Le recyclage du lubrifiant, respectueux de l'environnement, contribue à réduire la pollution.

### 6.6.2 Application du laminage à chaud aux alliages à haute teneur en tungstène

Le laminage à chaud des alliages à haute teneur en tungstène atténue le risque de fragilité associé au laminage à froid à température ambiante, grâce à un laminage à température intermédiaire. Ce procédé utilise un chauffage modéré pour activer le mécanisme de restauration, permettant ainsi d'obtenir des profils plus minces avec une déformation importante. Il est particulièrement adapté aux alliages à haute teneur en tungstène. La température de laminage à chaud est maintenue en dessous de la température de recristallisation. Le chauffage chimique réduit la résistance à la déformation, ramollit la phase liante pour améliorer la coordination et diminue la résistance au glissement des particules de tungstène, évitant ainsi les fissures de bord fréquentes lors du laminage à froid. Le laminoir est équipé de dispositifs de chauffage ou préchauffe la billette, et une protection par gaz inerte prévient l'oxydation.

Les avantages du laminage à chaud résident dans son durcissement et sa restauration équilibrés, une réduction plus importante par passe qu'en laminage à froid, une efficacité de traitement globale supérieure et des temps de recuit réduits. Sur le plan chimique, le laminage à chaud présente une restauration dynamique plus active, limitant le réarrangement et l'accumulation des dislocations et offrant ainsi une qualité de surface supérieure au laminage à froid pur. Ce procédé combine la transition du laminage à chaud avec la finition par laminage à froid, formant un chemin hybride. Les alliages à haute teneur en tungstène contiennent moins de phases liantes, et le laminage à chaud élargit la plage de déformation. Cette application présente un potentiel important pour la production de tôles d'alliage de tungstène ultra-minces et haute densité, permettant d'obtenir une microstructure fine et fibreuse, associée à un équilibre optimal entre résistance et ténacité après laminage à chaud. La lubrification chimique garantit une bonne adaptation aux hautes températures, tandis que le graphite ou des huiles spéciales préviennent l'adhérence. L'uniformité de la température est essentielle, et le chauffage par induction assure une réponse rapide. Des variantes incluent un système d'assistance au chauffage des cylindres. L'extraction des gaz d'échappement garantit la sécurité.

### 6.6.3 Contrôle de la direction de roulement et optimisation de la texture

Le contrôle de la direction de laminage et l'optimisation de la texture sont des méthodes de contrôle de la microstructure lors des procédés de laminage à froid et à chaud des tôles en alliage de tungstène. En

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ajustant la texture de déformation et l'orientation cristalline par des trajectoires de laminage unidirectionnelles, croisées ou multidirectionnelles, on influe sur l'anisotropie et l'équilibre des performances du matériau. Cette optimisation permet un contrôle directionnel de la résistance, de la ténacité et de la dilatation thermique. Le laminage unidirectionnel induit une forte texture fibreuse, allonge les particules de tungstène dans le sens du laminage et crée une orientation préférentielle due à l'empilement planaire des dislocations chimiques, ce qui augmente la résistance longitudinale mais réduit la ténacité transversale. Le laminage croisé, avec une rotation de 90 degrés à chaque passe, rompt l'orientation et affaiblit la texture, la rendant plus aléatoire.

Les principes d'optimisation sont choisis en fonction de l'application. Les tôles de blindage nécessitent un laminage croisé isotrope, tandis que les composants structuraux à résistance longitudinale requièrent un laminage unidirectionnel. Les variantes multidirectionnelles, comme le laminage pendulaire, permettent d'homogénéiser davantage le matériau. Chimiquement, la texture influe sur la distribution des contraintes interfaciales ; l'optimisation réduit le traitement thermique résiduel. Le recuit, combiné à d'autres méthodes, contrôle l'intensité de la texture ; un recuit à haute température l'affaiblit, tandis qu'un recuit à basse température la préserve. Ce contrôle et cette optimisation ont un impact significatif sur la production de feuilles ; les feuilles ultra-minces à textures marquées sont sujettes au pliage et à la fissuration, un problème atténué par l'optimisation croisée. L'analyse chimique par diffraction des rayons X (figures de pôles) évalue la densité d'orientation. Le marquage d'orientation facilite l'utilisation ultérieure du produit fini. Parmi les variantes, on trouve le laminage oblique pour obtenir des textures spéciales. Des systèmes de laminage respectueux de l'environnement sont utilisés pour le nettoyage et la prévention des rayures.

#### 6.6.4 Procédé de prévention et d'ébavurage des fissures de bord

La prévention et l'ébavurage des bords sont des aspects essentiels de la gestion des défauts lors du laminage de tôles en alliage de tungstène. L'ajustement des paramètres de laminage, la protection des bords et l'ébavurage régulier réduisent l'amorçage et la propagation des fissures, garantissant ainsi l'intégrité et la limite d'élasticité de la tôle. Les fissures de bord proviennent de la concentration des contraintes, résultant chimiquement d'un fort cisaillement des particules de tungstène et d'une coordination insuffisante des phases de liaison. Les mesures préventives comprennent la diminution progressive de la pression de laminage par passe, le lissage des transitions de bord et l'utilisation de cylindres de guidage latéraux pour contraindre la forme de la tôle et éviter que l'ondulation des bords n'induisse des contraintes de traction.

Les procédés d'ébavurage utilisent des cisailles ou des meuleuses pour éliminer périodiquement les arêtes fissurées, et le nettoyage chimique des surfaces de coupe prévient l'apparition de fissures secondaires. La prévention passe également par une lubrification uniforme et l'application d'un revêtement supplémentaire sur les arêtes afin d'éviter le frottement à sec. Le laminage à chaud réduit la sensibilité aux fissures, tandis que le laminage à froid contrôle l'accumulation de durcissement et effectue un recuit rapide.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ce procédé de prévention et d'ébavurage est fréquemment utilisé dans le laminage de tôles minces, où les fissures se propagent facilement à l'état ultra-mince, ce qui impose des intervalles d'ébavurage courts. Le contrôle chimique de surface est facilité par un test de ressuage fluorescent. Les déchets d'ébavurage sont recyclés et broyés. Des variantes telles que l'ébavurage laser offrent des finitions précises et sans bavures. La filtration du fluide de coupe, respectueuse de l'environnement, garantit la sécurité.

## 6.7 Traitement et finition de surface

Le traitement et la finition de surface constituent les dernières étapes de la production de tôles en alliage de tungstène. Des méthodes telles que le nettoyage chimique, l'usinage et le planage thermique permettent d'éliminer les défauts de surface, d'améliorer la planéité et la douceur, et d'optimiser l'aspect, la résistance à la corrosion et l'adaptabilité fonctionnelle du matériau. Ce procédé influe directement sur l'intégrité de surface et les performances d'adhérence de la tôle dans les applications de précision. Le traitement de surface cible les couches d'oxyde, les phases enrichies et les aspérités résiduelles du laminage ou du traitement thermique, tandis que la finition garantit la précision dimensionnelle et la qualité des bords. Les principes du procédé reposent sur la dissolution chimique, l'enlèvement mécanique et la relaxation des contraintes thermiques. Le traitement chimique offre une sélectivité élevée, le traitement mécanique une grande efficacité, et le planage thermique combine les avantages des deux. La séquence de traitement comprend généralement le nettoyage et la décontamination, suivis du polissage, puis de la découpe à longueur.

Le procédé de finition privilégie le traitement non destructif et la propreté. Le nettoyage chimique prévient la corrosion résiduelle, le polissage mécanique contrôle l'incrustation de particules et le nivellement thermique sous vide empêche la réoxydation. La découpe laser ou au jet d'eau permet d'obtenir des formes complexes et de réduire la zone affectée thermiquement. Le contrôle qualité comprend la mesure de la rugosité de surface et l'inspection visuelle afin de garantir la valeur Ra et l'absence de fissures. Les considérations environnementales incluent la neutralisation et le recyclage des eaux usées, ainsi que la collecte sécurisée des poussières.

### 6.7.1 Nettoyage chimique et décapage à l'acide pour éliminer la couche d'oxyde

Le nettoyage chimique et le décapage acide pour éliminer la couche d'oxyde constituent les étapes principales du traitement de surface des tôles en alliage de tungstène. Les solutions acides dissolvent et éliminent la calamine et les impuretés formées lors du laminage ou du traitement thermique, restaurant ainsi l'éclat métallique et fournissant un substrat propre pour les étapes de traitement ultérieures. Cette méthode dissout sélectivement les oxydes en minimisant les dommages causés au substrat. Le processus de nettoyage débute par un lavage alcalin pour éliminer les huiles, suivi d'un décapage acide pour éliminer principalement les oxydes. Chimiquement, la couche d'oxyde est principalement composée d'oxyde de tungstène et d'oxydes de liant, qui sont efficacement dissous par des mélanges d'acide nitrique, d'acide fluorhydrique ou d'acide sulfurique, permettant ainsi au tungstène de former des complexes qui passent en solution. La durée et la température du décapage sont soigneusement contrôlées afin d'éviter une attaque chimique excessive, qui peut entraîner une piqure de surface ou une fragilisation par l'hydrogène.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Les avantages de ce procédé résident dans l'élimination efficace des fines couches d'oxyde, son adaptabilité aux tôles d'épaisseurs variées et la possibilité d'ajuster sa formulation chimique en fonction de l'alliage. Dans les systèmes nickel-cuivre, la faible concentration d'acide prévient la dissolution excessive du cuivre. Après nettoyage, le rinçage à l'eau et la neutralisation sont suivis d'une passivation pour former un film protecteur temporaire. Le traitement des eaux usées comprend la neutralisation et la récupération des ions fluorure ou nitrate. Cette méthode de nettoyage est largement utilisée pour les tôles laminées à chaud. L'élimination des couches d'oxyde épaisses améliore l'activité de surface, facilitant le polissage ou le plaquage. Le contrôle chimique du pH et de la concentration garantit l'homogénéité des lots. Des variantes, comme la dissolution assistée par ultrasons, accélèrent le processus. Un système environnemental en circuit fermé réduit les émissions.

### 6.7.2 Le lavage alcalin élimine l'enrichissement de surface de la phase liante

Le lavage alcalin pour éliminer l'enrichissement superficiel en phase liante est une méthode de traitement de surface ciblée pour les tôles en alliage de tungstène. Il dissout sélectivement cet enrichissement, induit par le laminage ou le traitement thermique, à l'aide d'une solution alcaline. Il permet ainsi d'équilibrer la composition de surface et d'améliorer la résistance à la corrosion. Cette méthode est appliquée aux alliages à forte teneur en phase liante afin d'éviter la corrosion préférentielle de la couche enrichie. Le procédé de nettoyage consiste en une immersion dans une solution chaude d'hydroxyde de sodium ou de carbonate de sodium. Chimiquement, l'alcali réagit avec les oxydes de nickel ou de cuivre pour former des sels solubles, tandis que la phase inerte de tungstène reste en grande partie insoluble. La couche superficielle enrichie est ensuite éliminée par abrasion, exposant le substrat équilibré.

Ce procédé offre des avantages tels qu'une sélectivité élevée, une altération minimale de la structure en tungstène et une compatibilité avec les tôles non magnétiques ou thermoconductrices. Un contrôle précis de la température et du temps accélère la dissolution tout en prévenant la formation excessive de piqûres. Après nettoyage, l'alcali résiduel est neutralisé par un acide, suivi d'un rinçage et d'un séchage. Une agitation ou un traitement par ultrasons améliore l'homogénéité. Ce lavage alcalin est particulièrement efficace pour les tôles en nickel-cuivre, où le cuivre a tendance à s'accumuler en surface, garantissant ainsi une conductivité uniforme après lavage. L'analyse chimique de la composition de surface confirme l'efficacité du traitement. Des variantes, comme le lavage alcalin électrolytique, accélèrent le processus. La régénération et le recyclage de la solution alcaline sont également possibles.

### 6.7.3 Rectification et polissage mécaniques

Le meulage et le polissage mécaniques sont les principales méthodes de finition de surface des tôles en alliage de tungstène. L'utilisation de bandes abrasives, de meules ou de pâtes à polir permet d'éliminer progressivement la rugosité et les défauts de surface afin d'obtenir un état très lisse et une faible rugosité. Cette méthode convient aux tôles d'épaisseurs variées et améliore à la fois l'aspect et la qualité fonctionnelle de la surface. Le meulage débute par un dégrossissage pour éliminer les marques d'oxydation et les ondulations, suivi d'un polissage de plus en plus fin à l'aide de bandes abrasives ou de meules. Le cisaillement chimique et mécanique permet d'enlever de la matière ; en raison de la dureté

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

élevée du tungstène, des abrasifs diamantés ou en carbure de bore sont nécessaires. Le polissage utilise une roue en tissu doux et une pâte à polir ; un frottement fin permet d'obtenir un fini miroir.

Ce procédé offre une précision contrôlable, avec une rugosité Ra décroissante, convenant aux surfaces planes et courbes. Le meulage peut être réalisé à sec ou à l'eau, cette dernière étant effectuée avec refroidissement pour éviter les dommages thermiques. Le polissage s'effectue du plus grossier au plus fin, avec un nettoyage intermédiaire pour prévenir l'incrustation de particules. Cette technique de meulage et de polissage est idéale pour les plaques de collimateurs médicaux de haute précision, réduisant la diffusion de la lumière et offrant une finition miroir. Le polissage après nettoyage chimique prévient l'accumulation de résidus. En option, le polissage vibratoire permet de façonner uniformément des formes complexes. L'aspiration des poussières est respectueuse de l'environnement.

#### 6.7.4 Procédé de nivellement thermique sous vide/protection à l'hydrogène

de tôles minces en alliage de tungstène consiste à éliminer les contraintes résiduelles sous atmosphère protectrice par tension à haute température ou laminage, améliorant ainsi la planéité et la stabilité dimensionnelle de la tôle. Ce procédé est particulièrement adapté aux tôles minces facilement déformables. Il consiste à chauffer la tôle à sa température de relaxation des contraintes dans un four sous vide ou sous hydrogène, puis à appliquer une légère tension ou à la faire passer entre des rouleaux de planage. Chimiquement, la diffusion à haute température relaxe les dislocations, ramollit la phase liante et coordonne la déformation. Le vide empêche l'oxydation, tandis que l'hydrogène réduit la surface.

Ses avantages résident dans son fonctionnement sans contact ou à contact minimal, garantissant une surface impeccable et une planéité élevée. Des températures inférieures au seuil de recristallisation préviennent les déformations structurelles. Un contrôle uniforme de la tension évite tout étirement localisé. Ce procédé est largement utilisé pour les tôles d'alliage de tungstène ultra-minces, où le gauchissement après laminage à froid est corrigé par planage à chaud. La pureté chimique est essentielle et un point de rosée bas prévient la fragilisation par l'hydrogène. Parmi les variantes, on trouve le planage sous tension continue au four. Il offre un environnement étanche et écoénergétique.

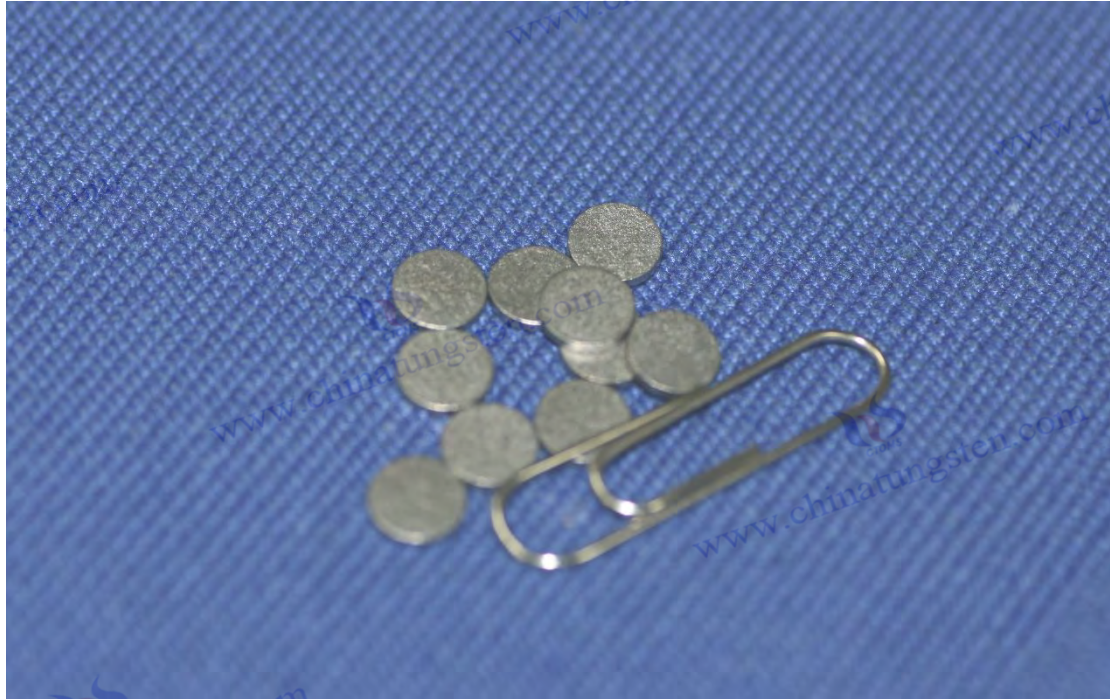
#### 6.7.5 Cisaillement de précision, découpe laser et découpe au jet d'eau

Le cisaillement de précision, la découpe laser et la découpe au jet d'eau sont des méthodes d'usinage de précision des tôles en alliage de tungstène, y compris pour les formes dimensionnelles et irrégulières. Ces méthodes utilisent des lames mécaniques, des faisceaux laser ou des jets d'eau à haute pression pour obtenir des bords nets et des formes complexes, répondant ainsi à diverses exigences dimensionnelles. Le cisaillement de précision utilise des cisailles de haute précision dotées d'arêtes de coupe affûtées, ce qui induit une fracture par cisaillement chimiquement concentré. Il est adapté aux tôles rectangulaires à bords droits, et l'écartement réglable évite la formation de bavures.

La découpe laser utilise un laser à haute énergie pour fondre et vaporiser les matériaux, suivi d'un nettoyage sous gaz inerte des scories. Chimiquement, elle génère une zone affectée thermiquement réduite, ce qui la rend idéale pour les contours et les perçages complexes. Le contrôle de la densité de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

puissance permet d'obtenir des traits de coupe étroits. La découpe au jet d'eau utilise un jet abrasif d'eau sous haute pression, ce qui permet une découpe à froid sans déformation thermique et une abrasion purement mécanique. Elle convient aux tôles épaisses ou aux alliages thermistances . Cette méthode de découpe est flexible pour les tôles en alliage de tungstène sur mesure, produisant des perçages laser précis et des bords nets. Un nettoyage chimique après découpe prévient toute contamination. Des variantes, comme les lasers à fibre, permettent d'augmenter la vitesse. Les déchets sont recyclables en toute sécurité.



#### CTIA GROUP LTD Feuilles d'alliage de tungstène

##### 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](http://www.ctia.com.cn)

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



## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

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

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

#### 100,000+ customers

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

#### Service commitment

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

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Chapitre 7 Applications des tôles en alliage de tungstène

### 7.1 Application des tôles en alliage de tungstène dans l'industrie de la défense et militaire

Les tôles en alliage de tungstène sont principalement utilisées dans les industries de la défense et militaires pour la fabrication de composants exigeant une densité, une résistance et une ténacité élevées. Leur point de fusion élevé et leur résistance à l'usure garantissent des performances stables même dans des environnements difficiles. Elles servent notamment à la réalisation de contrepoids et de structures de protection, l'intégration fonctionnelle étant obtenue par un procédé de fabrication adapté.

#### 7.1.1 Tôle en alliage de tungstène pour blindage perforant

Les tôles en alliage de tungstène utilisées dans les composants perforants exploitent leur haute densité et leurs propriétés d'auto-affûtage pour optimiser la concentration de l'énergie cinétique et la capacité de pénétration. La conception de l'alliage assure un équilibre optimal entre dureté et ténacité, et la finition de surface garantit une excellente stabilité à haute vitesse.

#### 7.1.2 Tôle en alliage de tungstène pour contrepoids

Les feuilles d'alliage de tungstène servent de contrepoids ; leur haute densité permet un ajustement précis du poids dans un espace réduit, contribuant ainsi à équilibrer l'inertie et à contrôler les vibrations. L'épaisseur uniforme garantit la précision, et le traitement de surface améliore la durabilité.

#### 7.1.3 Tôle en alliage de tungstène pour la protection

Les feuilles d'alliage de tungstène contribuent à l'atténuation des rayonnements et à l'absorption des impacts dans les structures de protection, offrant un blindage haute densité, mince et très efficace. Leur conception composite renforce la résistance globale et convient aux systèmes de protection multicouches.

### 7.2 Application des tôles en alliage de tungstène dans la fabrication de pointe

tungstène dans la fabrication de pointe s'explique principalement par leurs caractéristiques combinées de haute densité, de dureté élevée et d'usinabilité optimale. Ces tôles trouvent des applications dans la fabrication de moules, d'outils de coupe et de composants mécaniques de précision, contribuant ainsi à atteindre les objectifs de miniaturisation, de fiabilité élevée et de longue durée de vie. Grâce à la métallurgie des poudres et au laminage de précision, les tôles en alliage de tungstène bénéficient d'une microstructure uniforme, leur conférant une résistance à l'usure et au ramollissement à haute température dans les inserts de moules, un support rigide dans les outils de coupe et permettant d'optimiser la répartition des masses dans les contrepoids mécaniques. En pratique, les tôles en alliage de tungstène sont souvent combinées à d'autres matériaux ou traitées en surface afin d'étendre leurs applications.

La fabrication de pointe exige un équilibre parfait des propriétés des matériaux. Les tôles en alliage de tungstène excellent dans les applications à fortes contraintes, hautes températures ou haute précision

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

grâce à leur module d'élasticité élevé et leur stabilité thermique. Avec l'évolution de la fabrication vers des conceptions intelligentes et légères, l'utilisation des tôles en alliage de tungstène s'étend des moules traditionnels aux supports de fabrication additive et aux composants d'instruments de précision. Les revêtements de surface ou les traitements thermiques permettent d'optimiser davantage leur résistance à la corrosion et leurs propriétés d'adhérence afin de répondre aux exigences des conditions d'utilisation les plus complexes. Les tôles en alliage de tungstène sont disponibles en différentes épaisseurs : les tôles fines sont utilisées pour les incrustations de précision, tandis que les tôles épaisses conviennent aux supports structurels.

### 7.2.1 Tôle en alliage de tungstène pour inserts de moule

de tungstène dans les inserts de moules est due à leur dureté élevée, leur résistance à l'usure et leur tenue aux hautes températures. Cette application est courante dans les moules d'injection plastique, les moules de fonderie sous pression et les moules de pressage à chaud du verre, contribuant à prolonger la durée de vie des moules et à améliorer la qualité des produits. Pièce maîtresse du moule, l'insert résiste à des températures et des pressions élevées répétées, ainsi qu'à l'usure. Les feuilles d'alliage de tungstène, intégrées au corps du moule, offrent des zones localement très résistantes à l'usure, réduisant ainsi la consommation globale de matériau. La structure biphasée de la feuille d'alliage de tungstène joue un rôle crucial dans l'insert : les particules de tungstène constituent la phase dure, résistante à l'érosion abrasive, tandis que la phase liante confère une certaine ténacité, prévenant ainsi la rupture fragile.

Dans les moules d'injection plastique, les feuilles d'alliage de tungstène sont couramment utilisées sur les bords des cavités ou au niveau des points d'injection pour résister aux chocs et aux cycles thermiques du plastique en fusion. Le polissage de surface réduit l'adhérence au moule et facilite le démoulage. Dans les moules de fonderie sous pression, les inserts sont soumis à des impacts à grande vitesse et à la corrosion à haute température du métal en fusion ; la stabilité thermique des feuilles d'alliage de tungstène contribue à maintenir la précision dimensionnelle et réduit les fissures de fatigue thermique. Dans les moules de pressage à chaud pour le verre, leur faible dilatation thermique et leur dureté élevée garantissent la fidélité de forme lors du moulage de composants optiques de précision. Lors de la conception des inserts, les feuilles d'alliage de tungstène sont liées à l'acier du moule par brasage, incrustation ou fixation par vis ; des traitements d'interface tels que le nickelage améliorent l'adhérence.

Les applications se sont étendues aux matrices d'emboutissage de haute précision. Les inserts en alliage de tungstène sont utilisés dans le moulage des châssis de téléphones portables ou des connecteurs électroniques pour résister à l'emboutissage répété de tôles d'acier inoxydable ou d'alliage de titane. Une conception à gradient de dureté de surface assure un équilibre optimal entre résistance à l'usure et résistance à l'écailage. Ces dernières années, le développement rapide des véhicules électriques et de l'électronique grand public a engendré une demande accrue de matrices à longue durée de vie, orientant la conception des inserts en alliage de tungstène vers des matériaux nanocristallins ou renforcés par dispersion, améliorant ainsi leur résistance à la fatigue. Les revêtements de surface, tels que le DLC ou le TiAlN, sont courants ; ils forment un film dur par dépôt chimique en phase vapeur (CVD), agissant en synergie avec le substrat pour une meilleure résistance à l'usure. L'épaisseur de l'insert en alliage de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungstène est choisie en fonction de la taille de la matrice : les inserts les plus fins sont utilisés pour les micro-matrices, tandis que les plus épais supportent des charges importantes.

La technologie de fabrication influe sur le rendu final ; la rectification de précision garantit la planéité des inserts, et le traitement thermique ajuste la répartition de la dureté. Lors de la maintenance du moule, les tôles en alliage de tungstène sont facilement remplaçables localement, ce qui réduit les coûts globaux. Côté environnement, les inserts restent stables sous lubrification à l'huile haute température ou avec des fluides de refroidissement à base d'eau. L'utilisation de tôles en alliage de tungstène favorise également la conception modulaire des moules, et la standardisation des spécifications des inserts simplifie la gestion des stocks.

### 7.2.2 Tôles en alliage de tungstène pour outils de coupe

Les tôles en alliage de tungstène sont principalement utilisées dans les outils de coupe, comme substrat ou insert. Leur dureté élevée et leur stabilité thermique leur permettent d'assurer un bon support de coupe. On les retrouve dans certains outils de coupe spécialisés et les inserts résistants à l'usure, facilitant l'usinage de matériaux difficiles ou dans des conditions de haute température. Lors de la conception d'outils, les tôles en alliage de tungstène sont souvent associées à du carbure cémenté ou à de la céramique pour former une structure hybride. L'alliage de tungstène constitue une base robuste, tandis qu'une couche dure est soudée ou brasée en surface, améliorant ainsi la durée de vie globale de l'outil. La densité élevée des tôles en alliage de tungstène contribue à l'équilibrage et à la réduction des vibrations des outils rotatifs.

Dans les outils de tournage ou de fraisage, les plaquettes en alliage de tungstène sont utilisées dans les porte-outils ou les supports d'outils pour résister aux forces de coupe et aux contraintes thermiques. La phase liée coordonne la déformation et absorbe les chocs, empêchant ainsi l'écaillage de la pointe de l'outil. La stabilité chimique confère à l'outil une résistance à la corrosion dans les milieux de refroidissement, et des traitements de surface tels que le placage chimique offrent une protection supplémentaire. Les applications s'étendent aux outils d'usinage du bois ou des matériaux composites, où les plaquettes en alliage de tungstène résistent à l'abrasion des fibres et conservent un tranchant exceptionnel.

Les tôles en alliage de tungstène sont également utilisées dans les bagues de certaines filières de tréfilage ou outils d'extrusion. Des anneaux ou des tôles en alliage de tungstène sont incrustés dans l'alésage pour résister à l'abrasion due au flux de métal. L'épaisseur est choisie en fonction de la forme de l'outil : les tôles fines sont utilisées pour les outils de précision soumis à de faibles charges, tandis que les tôles épaisses supportent les opérations de coupe intensives. La texturation de surface, par exemple par microstructuration laser, améliore l'évacuation des copeaux. L'utilisation de tôles en alliage de tungstène dans les outils de coupe favorise la conception de composites multi-matériaux, et les interfaces de brasage optimisent la résistance de la liaison.

Ces dernières années, face à la complexité croissante de l'usinage des matériaux, les tôles en alliage de tungstène ont évolué vers une structure à gradient, alliant une surface dure à un cœur résistant. Le traitement thermique permet d'ajuster la dureté de l'outil de coupe, tandis que le renforcement par mise

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en solution améliore sa résistance à la chaleur. Lors de l'affûtage, la matrice en alliage de tungstène supporte plusieurs opérations d'affûtage. Enfin, grâce à sa stabilité en conditions environnementales, l'outil conserve sa forme même en coupe à sec ou avec une lubrification minimale.

### 7.2.3 Tôles en alliage de tungstène pour contrepoids mécaniques

tungstène utilisées comme contrepoids mécaniques tirent parti de leur haute densité pour concentrer la masse dans un espace restreint, permettant ainsi aux machines de précision d'ajuster leur centre de gravité, d'équilibrer leur inertie et de réduire les vibrations. Cette application est courante dans les instruments d'analyse, les systèmes de navigation inertielle et les plateformes optiques. Les tôles de contrepoids sont usinées avec précision selon des formes spécifiques et intégrées ou collées à la structure mécanique. L'uniformité de la densité des tôles d'alliage de tungstène garantit une distribution de masse contrôlable, empêchant ainsi les écarts localisés d'affecter la stabilité du système.

Dans les balances analytiques et les centrifugeuses, les feuilles d'alliage de tungstène servent de masses ou de contrepoids. Leur épaisseur uniforme permet un réglage précis, et le revêtement de surface empêche l'oxydation d'affecter la masse. Dans les instruments inertiels, les contrepoids ajustent l'inertie de rotation ; l'usinabilité des feuilles d'alliage de tungstène permet la réalisation de géométries complexes, répondant ainsi aux exigences de miniaturisation. Les plateformes d'instruments optiques utilisent des contrepoids pour l'amortissement des vibrations ; les feuilles haute densité abaissent le centre de gravité et améliorent la résistance aux chocs.

Les tôles en alliage de tungstène sont également utilisées dans les machines rotatives à grande vitesse, comme les gyroscopes ou les rotors de moteurs, où l'équilibrage par contrepoids réduit les vibrations excentrées et prolonge la durée de vie des roulements. Disponibles dans une large gamme d'épaisseurs, les tôles fines conviennent aux microdispositifs tandis que les tôles plus épaisses permettent un ajustement de masse à grande échelle. Des traitements de surface, comme le plaquage or, améliorent l'aspect et la résistance à la corrosion, tandis que la stabilité chimique garantit une qualité constante sur le long terme.

La technologie de traitement influe sur la précision de l'application ; le cisaillement de précision garantit des bords lisses et le planage thermique assure la planéité. L'utilisation de tôles d'alliage de tungstène dans les contrepoids favorise une conception mécanique compacte, et le remplacement des matériaux traditionnels par des matériaux haute densité permet de réduire le volume. En termes d'adaptabilité environnementale, le matériau présente une stabilité dimensionnelle face aux variations de température, permettant un fonctionnement sur une large plage de températures.

### 7.3 Applications des tôles en alliage de tungstène dans les domaines nucléaire et médical

de tungstène tirent principalement parti de leur haute densité, de leurs excellentes propriétés d'atténuation des rayonnements et de leur biocompatibilité. Elles sont utilisées pour le blindage des installations nucléaires, les équipements de radiothérapie médicale et les composants d'environnements nucléaires, contribuant ainsi à la radioprotection et à une meilleure précision des traitements. Grâce à leur forte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



teneur en tungstène, les tôles en alliage de tungstène offrent l'avantage d'une épaisseur de blindage efficace, permettant un volume réduit par rapport aux matériaux traditionnels et les rendant idéales pour les applications où l'espace est limité. En blindage nucléaire, elles sont utilisées pour le revêtement des conteneurs ou les structures de collimation, tandis qu'en médecine, on les retrouve fréquemment dans les collimateurs multilames et les équipements de protection. Les composants d'environnements nucléaires bénéficient de leur stabilité thermique et de leur résistance aux rayonnements.

La conception des applications privilégie l'uniformité de l'épaisseur et la régularité de la surface ; les feuilles minces sont utilisées pour une collimation de précision, tandis que les feuilles plus épaisses assurent le support de la structure. Les traitements de surface, tels que les revêtements, améliorent la résistance à la corrosion, et les structures composites associées à des polymères permettent d'étendre le blindage flexible. L'usinabilité des feuilles d'alliage de tungstène permet un moulage complexe pour répondre à des besoins spécifiques. Avec le développement des technologies de médecine nucléaire et de radiothérapie, l'application des feuilles d'alliage de tungstène s'étend du blindage traditionnel à l'intégration fonctionnelle, par exemple avec des capteurs ou des canaux de refroidissement. La biocompatibilité garantit la sécurité des applications médicales, et la stabilité tissulaire sous irradiation permet une utilisation à long terme.

### 7.3.1 Feuilles d'alliage de tungstène pour blindage nucléaire

tungstène dans le blindage nucléaire s'explique par leur forte capacité d'atténuation des rayons gamma et des neutrons. Cette application est courante pour le revêtement des conteneurs dans les installations nucléaires, les parois internes des navires de transport et le blindage des équipements expérimentaux, contribuant ainsi à réduire les fuites radioactives et à protéger l'environnement d'exploitation. La haute densité des tôles en alliage de tungstène permet un blindage efficace avec une épaisseur réduite, ce qui engendre des gains de volume importants par rapport à d'autres matériaux et les rend adaptées aux conceptions modulaires. Dans les structures de blindage, les tôles en alliage de tungstène sont fixées par lamination ou montage miroir, et les traitements de surface améliorent leur résistance à l'oxydation par irradiation.

Dans les conteneurs de stockage de déchets nucléaires, les feuilles d'alliage de tungstène servent de revêtement pour absorber les rayonnements de haute énergie, assurant ainsi une stabilité thermique durable. Les dispositifs expérimentaux, tels que les parois de blindage du périmètre des réacteurs, utilisent des plaques d'alliage de tungstène dont l'épaisseur est ajustée en fonction de l'intensité du rayonnement ; une microstructure uniforme garantit une atténuation constante. L'usinabilité des feuilles d'alliage de tungstène permet une découpe irrégulière, s'adaptant ainsi à des géométries complexes. Dans les applications composites, l'association avec des matériaux borures améliore l'absorption des neutrons, présentant une bonne compatibilité chimique et aucune réaction nocive. Les applications s'étendent aux équipements de traitement du combustible nucléaire, où les feuilles d'alliage de tungstène protègent les hublots ou les composants des bras robotisés, offrant une résistance aux rayonnements permettant des expositions répétées. Des revêtements de surface, tels que le nickel, protègent la phase de liaison, prolongeant ainsi la durée de vie. Le rôle des feuilles d'alliage de tungstène dans le blindage nucléaire favorise la miniaturisation des installations, l'optimisation du poids et la facilité de transport. En termes

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'adaptabilité environnementale, elles présentent une stabilité dimensionnelle sous rayonnement de haute température.

### 7.3.2 Feuille d'alliage de tungstène pour blindage médical

Les feuilles d'alliage de tungstène sont principalement utilisées dans les équipements de radiothérapie et les vêtements de protection. Grâce à leurs propriétés d'atténuation des rayons X et gamma, elles permettent un contrôle précis du rayonnement et une protection optimale du personnel, améliorant ainsi le positionnement du patient et la sécurité des traitements. L'exemple le plus typique d'application en protection médicale est celui des lames multilames des accélérateurs linéaires. Ces lames sont composées de plusieurs couches d'alliage de tungstène qui se déplacent indépendamment les unes des autres pour former le profil du faisceau. Leur épaisseur uniforme garantit des bords nets et réduit la pénombre.

Dans les équipements de diagnostic radiologique tels que les scanners, les feuilles d'alliage de tungstène sont utilisées dans les grilles de collimation des détecteurs ou les plaques anti-diffusion pour absorber les rayonnements parasites et améliorer la netteté des images. Dans les équipements de protection tels que les tabliers de radiologue ou les rideaux de protection, les feuilles d'alliage de tungstène sont associées à des polymères pour former des matériaux flexibles, offrant confort et légèreté en remplacement des matériaux traditionnels plus lourds. La biocompatibilité et la non-toxicité des feuilles d'alliage de tungstène garantissent un contact médical sûr.

La conception de l'application privilégie la précision ; le polissage des lames réduit la friction et assure un mouvement fluide. La stabilité thermique des feuilles d'alliage de tungstène leur permet de conserver leur forme sous de fortes doses de rayonnement, tandis que leur inertie chimique prévient la corrosion par le liquide de refroidissement. Des épaisseurs personnalisées sont disponibles pour s'adapter aux différentes énergies de rayonnement : des feuilles minces pour les rayons X de basse énergie et des feuilles plus épaisses pour les rayons gamma de haute énergie. Les structures composites sont étendues aux protections portables, grâce à des micro-feuilles d'alliage de tungstène uniformément réparties qui assurent une couverture complète.

### 7.3.3 Tôles en alliage de tungstène pour environnements nucléaires

de tungstène tirent parti de leur résistance aux radiations et de leur stabilité thermomécanique. Elles sont utilisées dans les composants internes des installations nucléaires, tels que les dissipateurs thermiques, les structures de support ou les blindages localisés, contribuant ainsi au bon fonctionnement des équipements sous rayonnement et à haute température. Les composants des environnements nucléaires sont soumis aux rayonnements neutroniques et gamma ainsi qu'à des cycles de température ; la stabilité microstructurale des tôles en alliage de tungstène réduit le gonflement et la fragilisation, et la phase liante homogénéise la distribution des contraintes.

Dans les réacteurs nucléaires et les accélérateurs de particules, les tôles en alliage de tungstène servent de plaques arrière pour les cibles ou de revêtements pour les canaux de refroidissement. Leur conductivité thermique favorise la dissipation de la chaleur et assure la stabilité dimensionnelle sous rayonnement.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les structures de support, telles que les supports de fixation, sont conçues pour résister aux vibrations et aux contraintes thermiques. L'usinabilité des tôles en alliage de tungstène permet un formage de précision, ce qui les rend particulièrement adaptées aux installations dans des espaces restreints.

Les applications s'étendent aux composants d'instruments nucléaires, où les feuilles d'alliage de tungstène servent d'absorbeurs ou de fenêtres de collimation, alliant atténuation du rayonnement et gestion thermique. Les traitements de surface améliorent la résistance à l'oxydation et les revêtements protègent contre une exposition prolongée. Dans les environnements nucléaires, les feuilles d'alliage de tungstène contribuent à la durabilité des équipements et réduisent la fréquence de maintenance. Leur stabilité chimique les protège des réactions avec le milieu environnant.

#### **7.4 Applications des tôles en alliage de tungstène dans les domaines de l'électronique et des nouvelles énergies**

de tungstène sont principalement utilisées pour leur excellente conductivité thermique et électrique, leur coefficient de dilatation thermique adapté et leur haute densité. Leurs applications couvrent la dissipation thermique des dispositifs de puissance, le conditionnement électronique et les matériaux d'électrodes, contribuant ainsi à la miniaturisation des dispositifs, à leur haute fiabilité et à une conversion d'énergie efficace. Les feuilles d'alliage de tungstène, notamment les systèmes tungstène-cuivre et tungstène-nickel-cuivre, présentent un comportement de dilatation thermique similaire à celui des matériaux semi-conducteurs, réduisant ainsi les risques de défaillance par contrainte thermique. Dans les substrats de dissipation thermique, elles servent de dissipateurs pour répartir la chaleur ; dans le conditionnement, elles constituent des coques ou des couches de transition ; et dans les électrodes, elles offrent une résistance à l'érosion par arc électrique. Avec le développement rapide des communications 5G, de l'électronique de puissance et des technologies de batteries pour énergies nouvelles, l'utilisation des feuilles d'alliage de tungstène s'est étendue des dispositifs sous vide traditionnels aux modules haute fréquence et aux systèmes de stockage d'énergie.

L'industrie électronique exige une gestion thermique rigoureuse. Les feuilles d'alliage de tungstène, grâce à leur conductivité thermique élevée, facilitent la diffusion de la chaleur, tandis que les revêtements de surface améliorent la soudabilité. Dans les applications liées aux nouvelles énergies, leur stabilité permet de supporter des températures élevées ou des cycles thermiques. Les feuilles d'alliage de tungstène offrent une grande flexibilité d'épaisseur : les feuilles fines sont utilisées en microélectronique, tandis que les feuilles plus épaisses supportent les hautes puissances. Les structures composites sont courantes et associent l'alliage à la céramique ou au diamant pour optimiser les performances. L'utilisation de feuilles d'alliage de tungstène favorise également l'intégration des dispositifs, grâce à des matériaux d'interface thermique adaptés qui réduisent la résistance thermique de contact. En termes d'adaptabilité environnementale, les feuilles d'alliage de tungstène conservent des performances stables sur une large plage de températures. En résumé, cette application démontre la fonction thermoélectrique des feuilles d'alliage de tungstène dans le domaine des nouvelles énergies électroniques, contribuant à l'amélioration de l'efficacité et de la durée de vie des dispositifs grâce à des combinaisons de performances optimales, et soutenant les progrès technologiques continus de l'industrie.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

#### 7.4.1 Feuille d'alliage de tungstène pour substrat de dissipation thermique

tungstène utilisées comme substrats de dissipation thermique tirent principalement parti de la conductivité thermique élevée du système tungstène-cuivre et de sa compatibilité avec la dilatation thermique des matériaux semi-conducteurs. Cette application est courante dans les LED haute puissance, les lasers et les modules RF, contribuant à une dissipation thermique rapide et à la réduction des fissures dues aux contraintes thermiques. En tant que couche intermédiaire entre la puce et le dissipateur thermique, la feuille d'alliage de tungstène offre une surface de support plane, et le placage nickel-or améliore la soudabilité et assure une forte adhérence chimique. Dans la structure pseudo-alliage tungstène-cuivre, la phase cuivre forme des canaux thermiques continus, tandis que la structure en tungstène contrôle la dilatation, s'adaptant ainsi aux substrats en silicium ou en arséniure de gallium.

Dans les modules d'amplificateurs de puissance, les substrats en alliage de tungstène supportent la puce. Leur conductivité thermique favorise l'accumulation et la dissipation de la chaleur lors du fonctionnement à haute fréquence, tandis que leur épaisseur uniforme garantit la planéité et réduit la déformation. Dans les applications de diodes laser, le substrat absorbe la chaleur de pompage et la capacité thermique de la feuille d'alliage de tungstène amortit les pics de température instantanés. Dans le domaine des boîtiers LED, notamment pour l'éclairage haute puissance, les feuilles d'alliage de tungstène remplacent les feuilles traditionnelles en cuivre-molybdène, offrant une gestion thermique volumétrique supérieure.

La conception de l'application met l'accent sur le traitement des interfaces, notamment le brasage ou le frittage pour l'assemblage des puces, et sur la compatibilité chimique afin d'éviter les couches réactives. Le traitement laser des microstructures de surface accroît la surface de contact et améliore la conductivité thermique. L'utilisation de feuilles d'alliage de tungstène dans le substrat de dissipation thermique favorise la miniaturisation du dispositif et un fonctionnement fiable à haute densité de puissance. Les variantes composites à base de particules de diamant améliorent la conductivité thermique, repoussant ainsi les limites de performance. Enfin, en termes d'adaptabilité environnementale, le dispositif présente des performances stables lors de cycles de température extrêmes.

#### 7.4.2 Feuilles d'alliage de tungstène pour emballage électronique

Les feuilles d'alliage de tungstène sont utilisées dans l'encapsulation électronique pour leurs propriétés de dilatation thermique adaptées et leur haute densité. Elles servent de boîtiers, de couvercles ou de couches de transition pour assurer une protection hermétique et des voies de conduction thermique. Cette application est courante dans les dispositifs micro-ondes haute fiabilité et l'encapsulation de capteurs, contribuant au maintien d'un environnement interne sous vide ou sous gaz inerte. Les feuilles d'alliage de tungstène sont compatibles avec le scellement céramique ou en verre, leur stabilité chimique permet le brasage à haute température et leur coefficient de dilatation thermique est suffisamment faible pour réduire les contraintes de scellement.

Dans le conditionnement des semi-conducteurs de puissance, les feuilles d'alliage de tungstène servent de bases ou de transitions de grille, dissipant la chaleur des jonctions tout en réduisant le poids total

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



grâce à leur densité élevée. Dans les applications de conditionnement de tubes micro-ondes, les plaques de recouvrement en alliage de tungstène assurent le blindage électromagnétique, et leur haute densité renforce la rigidité structurelle. Les boîtiers de capteurs utilisent des feuilles d'alliage de tungstène pour leur résistance à la corrosion environnementale, et les revêtements de surface améliorent la soudabilité.

#### 7.4.3 Feuille d'alliage de tungstène pour électrodes

tungstène dans les électrodes tire principalement parti de leur résistance à l'érosion par arc électrique et de leur conductivité élevée. On les retrouve notamment dans les commutateurs haute tension, les électrodes de soudage par résistance et certains tubes à décharge, contribuant ainsi à prolonger la durée de vie des contacts et à maintenir une conductivité stable. En tant que surfaces de contact ou inserts, la phase tungstène résiste au soudage, tandis que la phase cuivre ou argent assure la conductivité. Chimiquement, les produits d'ablation se volatilisent et emportent les dommages thermiques.

Dans les électrodes de soudage par résistance, des feuilles d'alliage de tungstène sont enrobées dans un substrat de cuivre pour résister aux impacts répétés des points de soudage. Leur dureté élevée limite la déformation, tandis que leur conductivité supporte des courants élevés. Dans les applications de commutation sous vide, l'électrode en alliage de tungstène est exposée à l'arc électrique ; sa résistance à l'ablation assure une surface de contact lisse et réduit le transfert de matière.

Les applications se sont étendues aux électrodes d'usinage par électroérosion. Les tôles en alliage de tungstène réduisent l'usure et améliorent l'efficacité du traitement, tandis que la texture de surface optimisée garantit une décharge uniforme. Les électrodes des tubes à décharge utilisent des alliages de tungstène résistants aux hautes tensions de claquage, et leur stabilité permet des décharges répétées.

de tungstène des électrodes optimisent la fiabilité des contacts et la durée de vie, tandis que leur conception composite assure un équilibre entre conductivité et résistance à l'usure. L'épaisseur est déterminée en fonction du niveau de courant : les feuilles plus fines garantissent un contact précis, tandis que les plus épaisses offrent un support robuste. Le polissage de surface réduit la résistance initiale.

#### 7.5 Application des feuilles d'alliage de tungstène dans les cartes

tungstène dans la fabrication de cartes tire principalement parti de leur haute densité, leur conférant un toucher agréable et un éclat métallique, ainsi qu'une excellente aptitude à la transformation et une grande résistance à l'usure. Cette application associe des matériaux fonctionnels à des objets du quotidien, offrant aux cartes une texture unique et une durabilité exceptionnelle. Les feuilles d'alliage de tungstène sont laminées avec précision en fines feuilles ou en couches composites, puis contrecollées sur des supports en plastique ou en métal. Le contrôle de l'épaisseur garantit la compatibilité avec les formats de cartes standard. Parmi les applications, on trouve les cartes de paiement bancaires, les médailles d'identification pour animaux et les cartes de vœux, répondant ainsi à la demande des consommateurs pour des produits haut de gamme, personnalisés et durables.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de tungstène confèrent aux cartes des textures et des effets visuels anti-contrefaçon. Les surfaces polies ou brossées rehaussent leur esthétique, tandis que le plaquage, par exemple or ou titane noir, offre une variété de couleurs. Leur stabilité chimique les rend résistantes à l'usure quotidienne et à la corrosion, et leur permet de conserver leur éclat durablement. Lors du procédé de fabrication composite, la couche d'alliage de tungstène est pressée à chaud sur un substrat en PVC ou PC, des adhésifs assurant la solidité de l'interface. L'utilisation d'alliages de tungstène permet également de concevoir des cartes légères, offrant une sensation de poids sans augmentation de volume grâce à des couches fines et haute densité. Avec l'évolution des modes de consommation, les cartes en alliage de tungstène sont passées du statut de produits de luxe à celui de cadeaux personnalisés, grâce notamment aux technologies de gravure laser qui permettent des créations sur mesure. Enfin, ces cartes résistent à la flexion et aux hautes températures.

### 7.5.1 Cartes bancaires et cartes de paiement en alliage de tungstène

Les cartes bancaires et de paiement en alliage de tungstène sont des moyens de paiement haut de gamme intégrant de fines feuilles d'alliage de tungstène. Grâce à cette couche, elles offrent un poids métallique et un toucher agréable, les distinguant des cartes plastiques traditionnelles et renforçant ainsi le sentiment d'identité et l'expérience utilisateur. La feuille d'alliage de tungstène est généralement laminée en une feuille extrêmement fine, puis pressée à chaud avec plusieurs couches de substrat plastique et recouverte d'une couche protectrice transparente. L'inertie chimique de l'alliage de tungstène garantit que la carte ne se décolore pas et ne se déformera pas sous l'effet des frottements et des pliages quotidiens. Le format standard est compatible avec les lecteurs de cartes existants, et la puce et la bande magnétique intégrées n'affectent en rien son fonctionnement.

Les cartes bancaires en alliage de tungstène sont souvent émises par les institutions financières comme cartes de fidélité haut de gamme ou cartes noires. Leur poids confère une dimension particulière à leur retrait, tandis que leur éclat métallique rehausse leur attrait visuel. Différents traitements de surface sont disponibles, tels que des textures brossées et un polissage miroir, avec gravure laser du numéro et du design, offrant ainsi une excellente protection contre la contrefaçon. L'épaisseur de la couche d'alliage de tungstène est précisément ajustée pour un équilibre optimal entre poids et flexibilité, et des tests de flexion garantissent l'absence de délamination. Des options de placage chimique, comme l'or rose ou le canon de fusil, permettent de choisir la couleur qui correspond aux préférences de chacun.

Les applications des cartes de paiement s'étendent au paiement sans contact. Les alliages de tungstène n'interfèrent pas avec les signaux radiofréquences et la conception de la couche d'antenne est compatible. Leur résistance à l'abrasion préserve l'aspect neuf des cartes, même en cas de frottement dans un portefeuille, et leur longue durée de vie réduit la fréquence de remplacement. La technologie de fabrication des cartes en alliage de tungstène est éprouvée, ce qui permet d'obtenir des bords découpés avec précision, lisses et sans bavures après lamination.

### 7.5.2 Étiquette d'identification pour animaux de compagnie en alliage de tungstène

Les médailles d'identification pour animaux en alliage de tungstène sont de petites médailles fabriquées à partir de fines feuilles d'alliage de tungstène, utilisées pour identifier les animaux de compagnie grâce

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à leur collier. Ces médailles allient durabilité et esthétique grâce à leur haute densité et leur texture métallique, et résistent à l'usure et à la corrosion dues à l'activité de l'animal. Les feuilles d'alliage de tungstène sont laminées en fines feuilles puis estampées en différentes formes, telles que des os, des ronds ou des cœurs. La surface est gravée au laser avec les informations du propriétaire et le nom de l'animal ; la dureté chimique de l'alliage de tungstène garantit une gravure profonde, durable et inaltérable.

Pour l'identification des animaux de compagnie, l'alliage de tungstène offre un poids modéré, minimisant ainsi la gêne pour l'animal, tandis que la conception du fermoir assure une fixation sûre et empêche tout détachement. Les surfaces polies ou brossées réfléchissent la lumière, améliorant la visibilité, et les options de plaquage, telles que le rhodium noir ou l'or, offrent un large choix de couleurs. La stabilité chimique garantit que la médaille reste intacte même sous la pluie, dans la boue ou si l'animal la lèche, sans rouiller ni se décolorer. Son épaisseur contrôlée lui confère finesse et robustesse, la rendant résistante à la flexion et à la fissuration.

L'application s'est étendue au marché des accessoires haut de gamme pour animaux de compagnie, les plaques en alliage de tungstène servant d'accessoires de luxe. Associées à des colliers en cuir, ces plaques proposent des designs personnalisés, tels que le contour d'une photo de l'animal ou un lien vers un code QR. Leur robustesse leur permet de résister à un port prolongé par des animaux actifs, et les informations lisibles facilitent leur recherche en cas de perte. L'usinabilité des plaques en alliage de tungstène permet une personnalisation en petites séries, et leurs bords arrondis préviennent les irritations cutanées.

### 7.5.3 Cartes personnalisées de fêtes et commémoratives en alliage de tungstène

Les cartes de vœux et commémoratives personnalisées en alliage de tungstène sont fabriquées à partir de fines feuilles de cet alliage et offertes en cadeau ou en souvenir. Leur poids métallique et leur éclat permanent leur confèrent une valeur sentimentale particulière et les distinguent des cartes en papier ou en plastique. Réalisées à partir de feuilles d'alliage de tungstène composite ou pur, leur surface est gravée au laser avec des vœux, des dates ou des motifs. La stabilité chimique de l'alliage de tungstène garantit la pérennité des inscriptions, permettant ainsi une conservation optimale.

Pour les cartes de vœux, qu'il s'agisse d'anniversaires, de fêtes ou autres occasions spéciales, l'alliage de tungstène offre une sensation de qualité et une agréable surprise à l'ouverture. Les finitions dorées ou argentées s'accordent parfaitement au thème de l'événement. Les cartes commémoratives, utilisées pour les mariages, les remises de diplômes ou les événements marquants d'une entreprise, se distinguent par leurs formes personnalisées (cœurs, marque-pages, etc.), leurs pierres précieuses incrustées ou leurs motifs en relief qui rehaussent leur attrait artistique. Fines et robustes, elles sont faciles à envoyer par la poste ou à transporter.

Le design de l'application met l'accent sur la personnalisation : la technologie laser permet d'obtenir des textures fines, tandis que le polissage chimique offre un reflet miroir qui sublime l'esthétique. La structure composite, associée à la soie ou au cuir, rehausse la qualité du cadeau. La résistance à l'usure de l'alliage de tungstène garantit aux cartes une apparence impeccable même après de nombreuses manipulations, leur conférant ainsi une grande valeur de collection.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 7.5.4 Signalétique relative à l'industrie des alliages de tungstène et à la gestion des actifs

La signalétique industrielle et de gestion des actifs en alliage de tungstène est fabriquée à partir de fines feuilles d'alliage de tungstène transformées en panneaux durables pour le marquage permanent des équipements, outils ou actifs. Grâce à leur dureté et leur stabilité chimique élevées, ces panneaux résistent à l'usure, à la corrosion et aux hautes températures en milieu industriel, garantissant ainsi une lisibilité durable des informations. Après avoir été laminées en fines plaques, les feuilles d'alliage de tungstène sont gravées au laser ou estampées de numéros, de codes-barres ou de codes QR. Le polissage ou le brossage de surface améliore la résistance aux intempéries. L'inertie chimique de l'alliage de tungstène le protège de la corrosion par les acides, les bases ou les huiles, le rendant ainsi adapté aux environnements extérieurs ou chimiques.

Dans le domaine de la signalétique industrielle, les panneaux en alliage de tungstène sont fixés aux machines, tuyaux ou conteneurs, résistant aux vibrations et au nettoyage. Leur haute densité leur confère une grande stabilité, et ils sont solidement fixés par des cordons ou des rivets. La signalétique de gestion des actifs est utilisée sur les rayonnages d'entrepôt ou les équipements informatiques, avec des codes QR permettant d'accéder aux systèmes numériques de suivi et de gestion des stocks. La résistance à l'usure de l'alliage de tungstène garantit la clarté des panneaux et la lisibilité des informations, même en cas de lectures fréquentes ou de frottements.

La conception de l'application privilégie la praticité, avec des bords lisses et résistants aux rayures et des trous précis pour une installation facile. Fine et robuste, elle résiste à la flexion et à la fissuration, et son revêtement en chrome noir améliore la discrétion et la résistance aux traces de doigts. Sa stabilité chimique permet un nettoyage au jet d'eau haute pression ou par essuyage aux solvants. L'usabilité des plaques signalétiques en alliage de tungstène permet une personnalisation en série, et les gabarits préfabriqués réduisent les coûts.

#### 7.5.5 Étiquettes pour vêtements et articles de luxe en alliage de tungstène

Les étiquettes en alliage de tungstène pour vêtements et marques de luxe sont des étiquettes de mode fabriquées à partir de fines feuilles d'alliage de tungstène, fixées aux vêtements, sacs ou bijoux. Elles confèrent aux produits un aspect métallique et une image haut de gamme. Ces étiquettes rehaussent l'image de marque par leur poids et leur éclat, les distinguant des étiquettes traditionnelles en plastique ou en papier. Les feuilles d'alliage de tungstène sont découpées avec précision pour former les logos de la marque ou des formes géométriques, avec des finitions brossées, miroir ou plaquées or. La dureté chimique de l'alliage de tungstène garantit que les étiquettes ne se rayeront pas et ne se déformeront pas avec le temps, préservant ainsi leur brillance.

Pour les étiquettes de vêtements, les étiquettes en alliage de tungstène sont fixées aux vêtements par de fines chaînes ou des rubans ; leur poids évoque le luxe. La gravure laser du nom de la marque ou du numéro de l'édition limitée renforce l'exclusivité. Les étiquettes des sacs à main de luxe sont souvent plus grandes, avec des textures en relief qui ajoutent un effet tridimensionnel, et sont plaquées titane noir ou or rose pour s'harmoniser avec les couleurs du produit. Les étiquettes de bijoux utilisent des alliages

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



de tungstène résistants à la corrosion, garantissant une conservation optimale des bijoux en métaux précieux. Le design de l'application met l'accent sur l'esthétique et la fonctionnalité, avec des bords arrondis et polis et des perforations finement travaillées pour éviter les déchirures et les cassures. L'épaisseur, ajustée avec précision, assure un équilibre parfait entre poids et souplesse, tandis que la stabilité chimique garantit une résistance à la corrosion par les parfums et la transpiration. L'usinabilité des étiquettes en alliage de tungstène permet une personnalisation haut de gamme en petites séries, avec des textures 3D ou des incrustations de pierres précieuses qui rehaussent leur valeur artistique.

#### 7.5.6 Cartes de visite et cartes de savoir-vivre haut de gamme en alliage de tungstène

tungstène sont fabriquées à partir de fines feuilles d'alliage de tungstène transformées en cartes de visite ou cartes cadeaux pour les communications professionnelles ou les occasions sociales. Leur poids métallique et leur finition soignée témoignent de leur professionnalisme et de leur raffinement, les distinguant des cartes de visite en papier classiques et valorisant l'image de leur propriétaire. Les feuilles d'alliage de tungstène sont laminées à l'épaisseur standard des cartes de visite, puis gravées au laser avec le nom, le titre et les coordonnées. La dureté chimique de l'alliage de tungstène garantit la résistance de la carte au frottement dans un portefeuille ou un porte-cartes, préservant ainsi son éclat.

Pour les cartes de visite haut de gamme, l'alliage de tungstène offre un toucher métallique élégant qui attire le regard. Le plaquage, comme le canon de fusil ou le blanc argenté, s'accorde à un style professionnel, tandis que la texture brossée apporte une touche de luxe discret. Les cartes de vœux, utilisées pour les invitations de mariage, les cartes de remerciement ou les invitations formelles, présentent une typographie ou des motifs élégants, sont fines mais robustes et faciles à envoyer ou à remettre.

Le design de l'application est soigné dans les moindres détails : bords chanfreinés pour éviter les rayures et codes QR renvoyant vers des sites web personnels ou des cartes de visite numériques. Sa stabilité chimique lui permet de résister à la transpiration et aux traces d'alcool, garantissant ainsi des informations claires et durables. L'usinabilité des cartes en alliage de tungstène permet une gravure recto verso : une face pour les informations et l'autre pour des motifs artistiques, ce qui renforce leur valeur de collection.



CTIA GROUP LTD Feuilles d'alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Chapitre 8 Problèmes courants et solutions pour les tôles en alliage de tungstène

### 8.1 Problèmes fondamentaux liés aux matériaux et solutions pour les tôles en alliage de tungstène

Les défauts des tôles en alliage de tungstène proviennent principalement d'écarts de composition, de structure cristalline et de propriétés physiques. Ces problèmes peuvent affecter l'uniformité, la fiabilité et la fonctionnalité du matériau lors de sa production et de son utilisation. L'hétérogénéité de composition engendre des différences de performance localisées, les défauts structuraux influencent le comportement mécanique et les variations des propriétés physiques peuvent entraîner une inadéquation avec les applications en aval. Les solutions privilégient l'optimisation et le contrôle des procédés, notamment l'homogénéisation du mélange, la correction par traitement thermique et l'ajustement des paramètres. Les causes de ces problèmes sont souvent liées aux caractéristiques de la poudre, à la cinétique de frittage et aux contraintes de mise en œuvre, et peuvent être efficacement atténuées par des mécanismes systématiques de détection et de rétroaction.

La résolution des problèmes fondamentaux liés aux matériaux repose sur une approche combinant prévention et correction. Elle implique une gestion rigoureuse de la pureté des matières premières, des paramètres optimisés lors du formage et du frittage, et un contrôle thermomécanique en post-traitement. Les principes chimiques guident la solution : la diffusion favorise l'homogénéité et la restauration réduit les défauts. La flexibilité de cette approche permet des ajustements en fonction du système d'alliage. Pour les alliages nickel-fer, l'accent est mis sur l'équilibre des résistances, tandis que pour les alliages tungstène-cuivre, c'est la conductivité thermique qui prime. Les facteurs environnementaux peuvent amplifier les problèmes, comme l'oxydation inégale induite par l'humidité, qui nécessite un séchage contrôlé.

#### 8.1.1 Questions relatives à la composition et à la structure

tungstène présentent principalement des défauts de composition, notamment une distribution élémentaire hétérogène et des anomalies cristallines. Ces problèmes affectent l'équilibre diphasique et l'adhérence interfaciale de la microstructure, influençant ainsi les propriétés macroscopiques. L'hétérogénéité de la composition résulte d'un mélange insuffisant des poudres ou d'une diffusion lors du frittage, tandis que les défauts structuraux incluent les dislocations, la porosité et les phases ségrégées. Les solutions proposées reposent sur des méthodes d'homogénéisation et des traitements thermiques de restauration, exploitant la diffusion chimique et la recristallisation. La détection des problèmes est réalisée par cartographie spectrale et observation au microscope électronique, permettant une intervention précoce et la réduction des déchets.

La résolution de ces problèmes implique également la coordination de l'ensemble de la chaîne de production : l'optimisation de la poudre en amont pour réduire les écarts initiaux, le contrôle de la diffusion pendant le frittage intermédiaire et la réduction des défauts lors de la finition. Ces problèmes sont plus marqués avec les alliages à haute teneur en tungstène, où l'uniformité est difficile à maintenir lorsque la proportion de liant est faible. Le contrôle environnemental, notamment la pureté de l'atmosphère, influe également sur l'ampleur des problèmes.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 8.1.1.1 Problèmes et méthodes d'homogénéisation de la composition inhomogène des alliages de tungstène

tungstène proviennent principalement d'un mélange insuffisant des poudres, d'une diffusion inadéquate lors du frittage ou d'une ségrégation des éléments due à une taille excessive des lingots. Cette hétérogénéité se manifeste par un enrichissement local de la phase liante ou une agglomération des particules de tungstène, affectant la distribution de la densité et l'équilibre mécanique. Les causes du problème sont évidentes dès l'étape de mélange, où des différences de granulométrie ou des décharges électrostatiques entraînent une séparation. Lors du frittage, un écoulement irrégulier de la phase liquide exacerbe la ségrégation, et les différences de vitesse de diffusion des éléments liants amplifient le gradient.

La méthode d'homogénéisation commence par améliorer le mélange des poudres, en utilisant un broyage à billes à haute énergie ou un séchage par atomisation pour le pré-alliage afin de favoriser la microdistribution des éléments. Lors du frittage, un temps de maintien prolongé ou un contrôle segmenté de la température induit la migration des éléments par diffusion chimique, optimisant ainsi l'écoulement de la phase liquide pour une meilleure uniformité. Un post-traitement par pressage isostatique à chaud applique une pression anisotrope pour accélérer l'élimination des cellules fermées et l'homogénéisation par diffusion. Un recuit homogénéise davantage la poudre, et un maintien prolongé sous vide permet des ajustements du traitement de mise en solution.

En pratique, les billettes de grande taille sont combinées à des fours de chauffage multizones afin de réduire les gradients de température, tandis que les billettes de petite taille sont brassées pour favoriser la convection. La détection chimique, notamment par spectroscopie de dispersion d'énergie (EDS), permet de vérifier les zones d'hétérogénéité et d'optimiser les paramètres. Les mesures préventives comprennent le prétraitement des poudres pour éliminer les agglomérats et l'ajustement précis des proportions afin d'obtenir une fluidité optimale.

Ce problème est fréquent dans les alliages à haute teneur en tungstène. L'homogénéisation améliore l'adhérence interfaciale et réduit les écarts de performance. Il est important de stocker la poudre dans un endroit sec afin d'éviter l'absorption d'humidité et la séparation des particules. Des procédés comme l'alliage mécanique permettent une pré-homogénéisation complète.

#### 8.1.1.2 Types de défauts de structure cristalline et stratégies de réparation

de tungstène présentent des dislocations, de la porosité, une ségrégation aux joints de grains et des précipités anormaux. Ces défauts, issus des contraintes de mise en œuvre et d'un frittage imparfait, affectent la résistance, la ténacité et la stabilité thermique. Les dislocations s'accumulent par écrouissage, la porosité résulte d'un frittage résiduel et d'une densité insuffisante, la ségrégation aux joints de grains entraîne un enrichissement en impuretés et les précipités présentent une taille anormale ou une distribution hétérogène. Chimiquement, ces défauts perturbent le réseau cristallin et réduisent l'énergie de liaison.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La stratégie de réparation repose principalement sur un traitement thermique, incluant un recuit sous vide pour libérer les dislocations, une annihilation ou un réarrangement par diffusion chimique, et une période de maintien pour restaurer le système de glissement. La réparation des pores implique une fermeture à haute pression par pressage isostatique à chaud, suivie d'une densification après expulsion des gaz. La ségrégation aux joints de grains est traitée par purification des matières premières afin d'en réduire la source, suivie d'une homogénéisation à haute température et d'une dilution par diffusion. Les précipités anormaux sont traités par refroidissement et solidification rapides pour garantir l'homogénéité, ou par vieillissement pour contrôler leur taille.

Dans les stratégies d'application, les défauts de laminage à froid sont souvent corrigés par étapes grâce à un recuit intermédiaire, tandis que les défauts de frittage sont corrigés par une post-pressurisation. Des atmosphères chimiques sous vide sont utilisées pour prévenir l'apparition de nouveaux défauts. La microscopie électronique permet d'observer les types de défauts et d'orienter le choix de la stratégie. Le forgeage multidirectionnel est utilisé pour prévenir les dislocations directionnelles.

### 8.1.2 Problèmes liés aux écarts de propriétés physiques des tôles en alliage de tungstène

tungstène présentent principalement des anomalies de densité et de dureté, ainsi qu'un décalage entre la conductivité thermique et la dilatation. Ces écarts proviennent de fluctuations de procédé et de différences de composition, affectant la compatibilité et la fiabilité des applications. Les variations de densité résultent d'un frittage non homogène, les anomalies de dureté d'un écrouissage ou d'un recuit insuffisant, la faible conductivité thermique d'une ségrégation de phase liquide et le décalage de dilatation d'un rapport de phase liante déséquilibré.

La solution repose sur la stabilité des paramètres et leur ajustement ultérieur : la densité est corrigée par compensation de pression, la dureté est contrôlée par traitement thermique et le coefficient de dilatation thermique est optimisé. La détection des problèmes s'appuie sur la moyenne de mesures multipoints pour retracer les étapes du processus.

#### 8.1.2.1 Causes et techniques de correction des anomalies de densité et de dureté

tungstène sont principalement dus à un frittage insuffisant ou à une déformation irrégulière lors de leur élaboration. La faible densité engendre une porosité résiduelle, tandis que la dureté élevée résulte d'une accumulation lors de l'écrouissage ou d'un recuit excessif. Chimiquement, cela provoque une interruption de la phase continue au niveau de la porosité et un durcissement des dislocations bloquant les joints de grains. Ces défauts sont liés à une ségrégation mixte induisant des différences locales dans la phase liquide et amplifiant les écarts dans la plage de températures de frittage.

L'ajustement de la densité technique repose sur le pressage isostatique à chaud pour atteindre la densité souhaitée, tandis que le traitement haute pression à cellules fermées améliore l'homogénéité. Les duretés anormales sont corrigées par recuit ou durcissement par vieillissement, la diffusion chimique ou l'équilibre de précipitation étant utilisés pour la restauration. Les billettes de faible densité subissent un

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



frittage secondaire, tandis que les billettes de haute dureté sont soumises à un recuit intermédiaire pour le classement granulométrique.

Dans les applications techniques, on recourt à plusieurs cycles de pression pour corriger les anomalies de densité des billettes de grande taille, tandis que des ajustements précis sont apportés au processus de laminage des pièces plus petites afin d'améliorer leur dureté. Une analyse chimique permet d'évaluer l'ampleur des anomalies de perte de masse ou d'indentation. Ce processus contribue à prévenir les problèmes liés à l'homogénéité de la poudre et à la stabilité des paramètres.

#### **8.1.2.2 Problèmes et schémas d'optimisation liés à la différence entre la conductivité thermique et la dilatation thermique**

Le décalage entre la conductivité thermique et la dilatation thermique des tôles en alliage de tungstène provient d'un déséquilibre dans la distribution ou la proportion de la phase liante. Une faible conductivité thermique indique une phase de cuivre discontinue, tandis qu'une dilatation importante indique un excès de liant. Chimiquement, la conductivité thermique dépend du transport électron-phonon, lui-même déterminé par le volume de la phase dilatée. Ce problème résulte d'un frittage irrégulier ou d'un mauvais dosage.

La conductivité thermique optimisée est améliorée par infiltration de cuivre ou frittage activé afin de créer des canaux d'écoulement chimique continus et uniformes. Le désaccord de dilatation est corrigé en ajustant le rapport de liaison du tungstène, la substitution partielle de molybdène permettant un réglage fin du coefficient. Le traitement thermique homogénéise la distribution et le recuit facilite la diffusion à l'interface.

Dans cette solution, la conductivité thermique du système tungstène-cuivre est optimisée après fusion et infiltration, puis laminée pour redresser le canal. La dilatation du système nickel-fer est contrôlée par recuit de démoulage. La concordance entre le conductimètre et le dilatomètre est vérifiée par des essais optimisés.

#### **8.2 Problèmes et solutions liés à la production et à la fabrication de tôles en alliage de tungstène**

de tungstène repose principalement sur l'optimisation de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement, des matières premières aux produits finis. Les défis rencontrés incluent les variations des procédés de métallurgie des poudres, l'instabilité du laminage et les difficultés liées au contrôle qualité. Les solutions sont apportées par l'ajustement des paramètres de procédé, l'amélioration des équipements et la mise en place de mécanismes de retour d'information sur la qualité. Les problèmes de fabrication proviennent souvent des propriétés des matériaux, comme le point de fusion élevé du tungstène et la diffusion des éléments d'alliage, ce qui entraîne une microstructure irrégulière ou des fluctuations de performance. Les solutions privilégient une approche combinant prévention et correction : le contrôle de la purification des poudres réduit les défauts initiaux ; la conception des passes de laminage limite l'accumulation de contraintes ; et l'utilisation conjointe de plusieurs méthodes d'inspection améliore la précision. La résolution des problèmes de fabrication implique également l'ingénierie des systèmes, la coordination de

##### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

la chaîne de production, la correction des problèmes en amont et l'exploitation des retours d'information en aval pour améliorer les étapes initiales. La densité élevée des tôles en alliage de tungstène amplifie les problèmes tels que les fissures ou les variations lors de la production de tôles minces, ce qui exige une gestion rigoureuse. Les facteurs environnementaux tels que la température et l'humidité affectent la stabilité de la production et nécessitent un contrôle constant.

### 8.2.1 Problèmes liés aux procédés de métallurgie des poudres

Les problèmes rencontrés dans les procédés de métallurgie des poudres se manifestent principalement par des défauts de préparation de la poudre et des dysfonctionnements du frittage. Ces problèmes affectent la qualité de la billette et la microstructure de la tôle finale, et peuvent être résolus en identifiant leurs causes et en optimisant le procédé. Les défauts de préparation de la poudre proviennent d'une réduction non homogène ou de l'introduction d'impuretés, tandis que les dysfonctionnements du frittage sont liés au contrôle de la température et à la gestion de l'atmosphère. Le diagnostic des problèmes requiert une combinaison d'analyses chimiques et d'observations microscopiques, et les stratégies d'amélioration comprennent l'optimisation des paramètres et le recours à des technologies auxiliaires.

La résolution des problèmes de procédé se concentre sur les étapes fondamentales : la purification des poudres réduit les sources de défauts et l'homogénéisation par frittage améliore la densité. La nature réfractaire des alliages de tungstène accentue les problèmes à haute température, ce qui exige un contrôle précis. Le contrôle de la propreté environnementale prévient toute contamination externe.

#### 8.2.1.1 Identification et mesures de contrôle des défauts dans la préparation des poudres

Les mesures d'identification et de contrôle des défauts lors de la préparation des poudres visent principalement la pureté, la granulométrie et la morphologie des poudres de tungstène et d'éléments d'alliage. Ces défauts, tels que l'agglomération, l'enrichissement en impuretés ou une distribution granulométrique trop large, peuvent entraîner un mélange hétérogène et une porosité de frittage. L'identification des défauts est réalisée par la mesure de la distribution granulométrique à l'aide d'un granulomètre laser, l'observation de la morphologie au microscope électronique à balayage et l'analyse des impuretés par spectroscopie. Chimiquement, des impuretés telles que l'oxygène ou le carbone subsistent après la réduction, tandis que l'hétérogénéité granulométrique est due aux fluctuations de température.

Les défauts ont été identifiés lors de la réduction de l'oxyde de tungstène par l'hydrogène. Une élimination insuffisante de la vapeur d'eau à basse température a entraîné la formation de résidus d'oxygène, qui ont ensuite proliféré anormalement à haute température, formant une poudre grossière. L'entraînement de gaz lors de l'atomisation de la poudre d'alliage a provoqué la formation de porosités. Après identification et classification, les défauts morphologiques ont été clairement observés sous forme de particules agglomérées en microscopie électronique, et des pics spectraux d'impuretés étaient bien visibles.

Les mesures de contrôle optimisent d'abord les paramètres de réduction : régulation de la température par paliers pour affiner la granulométrie, ajustement du débit d'hydrogène pour contrôler la concentration

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en vapeur d'eau et utilisation d'agents réducteurs chimiques pour réduire la teneur en oxygène. Le tamisage et le classement par flux d'air éliminent les particules anormales, tandis que le broyage à billes active et désagrége les agglomérats. Un four de désoxygénation à l'hydrogène en prétraitement purifie le gaz, réduisant ainsi les impuretés à la source. Le stockage de la poudre comprend le séchage, le conditionnement sous gaz inerte et la prévention de l'oxydation et de l'agglomération.

Dans cette application, une poudre de tungstène de haute pureté est utilisée pour contrôler la recristallisation en plusieurs étapes des précurseurs de tungstate d'ammonium, tandis qu'une poudre d'alliage est préparée par une méthode au carbonyle afin d'obtenir une pureté élevée. Les paramètres sont contrôlés de manière itérative et une rétroaction est appliquée pour assurer un mélange homogène après réduction de la granulométrie. Un nettoyage chimique et un lavage à l'acide éliminent les impuretés de surface, suivis d'un séchage et d'un tamisage.

#### 8.2.1.2 Diagnostic des défauts du procédé de frittage et amélioration du procédé

Le diagnostic et l'amélioration des procédés de frittage visent principalement à corriger les défauts tels que la porosité due au sous-frittage, le grossissement des particules dû au sur-frittage et la ségrégation par déformation. Ces défauts affectent la densité et l'uniformité de la structure de la billette. Le diagnostic repose sur l'enregistrement de la température, la mesure de la densité et l'observation métallographique. Les causes de ces défauts sont liées à un écart par rapport à la plage de températures, à un réarrangement insuffisant de la phase liquide en cas de sous-frittage, à un excès de phase liquide en cas de sur-frittage entraînant la croissance des particules, et à une humidité atmosphérique élevée provoquant des inclusions d'oxydation. Les méthodes de diagnostic comprennent l'analyse des profils de température du four afin de détecter les anomalies, l'observation de la distribution de la porosité sur les coupes métallographiques et la recherche de ségrégation par gradient de densité. L'analyse chimique des résidus volatils confirme la présence d'impuretés et de dysfonctionnements.

L'amélioration des procédés commence par l'ajustement de la plage de températures, l'optimisation de la période de liquidus par un chauffage et un maintien segmentés, et l'utilisation d'additifs chimiques pour élargir cette plage. L'amélioration de l'atmosphère comprend le contrôle du point de rosée et l'amélioration du flux, réduisant ainsi l'oxydation par l'élimination de la vapeur d'eau. Le pressage isostatique à chaud corrige les défauts de frittage, et la construction à cellules fermées haute pression améliore la densification. L'amélioration du chargement du four inclut la suspension verticale ou le support sur lit de sable pour réduire la déformation. Dans les applications, le frittage d'alliages haute densité est amélioré par le pressage à chaud intégré, avec un réglage fin des paramètres après diagnostic. Une pureté chimique accrue et un prédégazage réduisent les défauts gazeux. Des variantes telles que le frittage sous vide remplacent l'hydrogène pour résoudre les problèmes liés à la vapeur d'eau.

#### 8.2.2 Problèmes de laminage et de formage

Les problèmes de laminage et de formage comprennent principalement les fissures de laminage à chaud et les déformations instables lors de l'écrouissage. Ces problèmes affectent l'intégrité et l'uniformité d'épaisseur de la tôle et peuvent être résolus par une analyse causale et des méthodes de contrôle. Les

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fissures de laminage à chaud proviennent de la concentration des contraintes, tandis que la déformation à froid provoque une accumulation de durcissement. Le diagnostic implique l'observation de la surface et de la section transversale, l'amélioration de la conception des passes et un recuit. La résolution des problèmes se concentre sur la coordination de la déformation, la prévention des pressions latérales pendant le laminage à chaud et la relaxation des contraintes lors du recuit après écrouissage. La dureté élevée des alliages de tungstène accentue le problème lors du laminage de tôles minces. Le contrôle de la température ambiante influe sur la déformation.

#### 8.2.2.1 Causes et méthodes de prévention des fissures de laminage à chaud

Les principales causes de la formation de fissures dans les pièces laminées à chaud sont la concentration des contraintes à haute température et une microstructure hétérogène. Les fissures s'amorcent et se propagent à partir du bord ou de la surface. Chimiquement, les contraintes sont élevées aux interfaces fragiles, ce qui accentue la fragilité des particules de tungstène. Ces causes peuvent être attribuées à la porosité ou à la ségrégation de la billette, et lorsque le taux de réduction par laminage est important, les contraintes dépassent la ténacité.

Les méthodes de prévention optimisent d'abord le frittage des billettes pour atteindre la densité souhaitée et réduire les défauts initiaux. Le laminage consiste en une réduction progressive, avec de faibles réductions initiales pour la mise en forme initiale, suivies d'un ajustement précis. La lubrification chimique et les revêtements haute température réduisent les contraintes de frottement. Les cylindres de guidage latéraux contraignent la tôle et préviennent les contraintes de traction sur les bords. Un chauffage intermédiaire assure une température uniforme et restaure la plasticité. En pratique, des alliages haute densité sont utilisés pour le laminage préventif de revêtement afin d'isoler l'air et d'amortir les contraintes. La morphologie des fissures est diagnostiquée et observée ; les fissures de surface sont traitées par ajustement de la lubrification et les fissures internes par amélioration de la qualité des billettes. Parmi les variantes, on peut citer le laminage à chaud, qui remplace certains procédés de laminage à chaud.

#### 8.2.2.2 Analyse et contrôle de la déformation par écrouissage à froid

L'analyse et le contrôle de la déformation par écrouissage visent principalement à limiter l'accumulation de durcissement et le gauchissement, qui affectent la précision d'épaisseur et la qualité de surface. Cette analyse repose sur l'étude des courbes de contrainte et l'observation métallographique. Les causes se manifestent par une multiplication des dislocations ; chimiquement, la phase liante présente une plasticité limitée et les particules de tungstène entravent la déformation, induisant des contraintes localisées.

Les méthodes de contrôle de la déformation comprennent des réductions d'épaisseur faibles et fréquentes, un recuit intermédiaire pour réduire l'écrouissage et une diffusion chimique pour rétablir le glissement. L'application uniforme d'un lubrifiant réduit la déformation par frottement. Le contrôle de la tension stabilise la forme de la tôle et prévient les ondulations centrales et de bord. Des ajustements du processus de laminage sont effectués après analyse ; le recuit est augmenté lorsque l'écrouissage est important. Lors du contrôle de l'application, la déformation des tôles minces est maîtrisée par laminage transversal afin

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



d'assurer une distribution uniforme des contraintes. Une pureté chimique élevée réduit les impuretés et le blocage des dislocations. Des variantes incluent le collage à chaud et à froid.

### 8.2.3 Problèmes liés à l'inspection et au contrôle de la qualité

Les problèmes liés au contrôle et à l'inspection de la qualité concernent principalement les difficultés rencontrées lors des essais non destructifs (END) et les écarts de tolérance dimensionnelle. Ces problèmes affectent la précision de l'acceptation et de l'application des produits finis. Des solutions sont apportées par des méthodes alternatives et des améliorations technologiques. Les difficultés liées aux END incluent les interférences matricielles et les écarts dimensionnels dus aux fluctuations de traitement. Le contrôle s'appuie sur la surveillance en ligne et les ajustements par rétroaction. La résolution des problèmes privilégie l'utilisation combinée de plusieurs méthodes, le remplacement des prélèvements destructifs par des solutions END et l'utilisation d'équipements de précision pour corriger les écarts dimensionnels. La densité élevée des alliages de tungstène rend les essais sur des tôles minces complexes. L'étalonnage environnemental influe également sur la précision.

#### 8.2.3.1 Défis et solutions alternatives dans l'application des techniques de contrôle non destructif

Les principaux obstacles à l'application des techniques de contrôle non destructif (CND) résident dans la densité élevée du tungstène, qui entrave la pénétration des rayons X, et dans l'atténuation des ondes ultrasonores. Ces difficultés rendent complexe l'identification des défauts internes tels que les pores ou les fissures, et les gradients de densité chimique perturbent le signal. Ces problèmes sont plus marqués dans les pièces épaisses, tandis que les pièces minces subissent davantage d'interférences de surface.

La solution alternative combine la tomographie par rayons X (CT) pour ajuster la pénétration de l'énergie et une pureté chimique élevée pour réduire le bruit de fond. La technologie des sondes ultrasonores à réseau phasé optimise la focalisation du faisceau, remplaçant ainsi les sondes traditionnelles. La détection par courants de Foucault permet de détecter les fissures de surface, et la poudre magnétique facilite la détection des alliages magnétiques. Cette solution associe l'examen interne par rayons X à une compensation ultrasonore.

#### 8.2.3.2 Gestion des écarts de tolérance dimensionnelle et amélioration de la précision

L'amélioration de la précision et du traitement des écarts de tolérance dimensionnelle vise principalement à corriger les variations d'épaisseur, de largeur ou de planéité dues aux fluctuations de laminage et aux effets thermiques. Ces écarts sont causés par une pression de laminage instable et une relaxation des contraintes inégale à chaque passe, ainsi que par des différences amplifiées de dilatation thermique.

Les méthodes de traitement comprennent la mesure et le contrôle en ligne de l'écartement des cylindres, ainsi que la compensation automatique par le laminoir de précision. Le planage à chaud corrige le gauchissement et le recuit chimique élimine les contraintes résiduelles. La précision est améliorée grâce à un système de cylindres à haute rigidité et à un contrôle de la tension afin de réduire la déformation élastique.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dans les applications où les écarts de tôles minces sont corrigés en temps réel par mesure laser, le forgeage de tôles épaisses permet la rectification pour compenser les tolérances initiales. Une pureté chimique élevée réduit les écarts dus aux effets thermiques. Le laminage CNC est une option disponible.

### 8.3 Application, problèmes de performance et solutions des tôles en alliage de tungstène

Les tôles en alliage de tungstène sont principalement étudiées en fonction de leurs performances pratiques dans divers domaines. Parmi les problèmes rencontrés figurent la fatigue à haute température, les vibrations et les chocs, l'efficacité de blindage, la biocompatibilité, la conductivité électrique et le magnétisme, ainsi que la corrosion et l'oxydation. Les solutions sont apportées par l'analyse des mécanismes, l'optimisation de la conception et la modification des matériaux. Les problèmes d'application résultent souvent d'une inadéquation entre les conditions environnementales et les propriétés des matériaux. La rupture par fatigue est fréquente dans les environnements à haute température, la dégradation de l'efficacité du blindage contre les rayonnements doit être prise en compte et une conductivité électrique anormale dans les dispositifs médicaux électroniques peut affecter leur fonctionnement. La résolution des problèmes de performance privilégie la prévention et la correction, l'étude des mécanismes pour orienter la conception et les techniques de modification pour améliorer l'adaptabilité.

La nature systématique de la résolution de problèmes se traduit par des interventions multi-échelles, allant des ajustements microstructuraux aux revêtements protecteurs macroscopiques. Les applications aérospatiales privilégient la résistance à la fatigue et aux chocs, le blindage contre les radiations se concentre sur le rétablissement de l'efficacité et l'amélioration de la sécurité, tandis que les applications électroniques et médicales privilégient la stabilité de la conductivité et la résistance à la corrosion. La structure biphasée des tôles d'alliage de tungstène contribue à cette solution : les particules de tungstène assurent un support rigide et la phase liante module la ténacité. Les facteurs environnementaux tels que les cycles de température ou l'amplification de l'exposition au milieu nécessitent des solutions ciblées.

#### 8.3.1 Problèmes d'application des tôles en alliage de tungstène dans l'aérospatiale

de tungstène sont soumises à la fatigue et aux vibrations/chocs en environnements à haute température. Ces problèmes affectent la stabilité à long terme et l'intégrité structurelle des matériaux et sont atténués par des traitements de renforcement et une conception résistante aux impacts. Les composants aérospatiaux sont soumis à des contraintes thermiques et mécaniques répétées, et les tôles en alliage de tungstène, utilisées comme contrepoids ou matériaux de gestion thermique, doivent relever ces défis. L'analyse du problème met l'accent sur l'identification des mécanismes et l'optimisation de la conception ; la fatigue à haute température résulte de l'accumulation de dommages microscopiques, tandis que les vibrations/chocs sont liés à la propagation des ondes de contrainte.

La résolution des problèmes d'application implique également le choix des matériaux et l'amélioration des procédés. Les alliages de tungstène offrent un bon compromis entre densité et module d'élasticité pour les applications aérospatiales, mais les environnements extrêmes exigent des solutions sur mesure. Les systèmes tungstène-nickel-fer sont courants dans les composants aérospatiaux, la phase liante

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

coordonnant la déformation. Les essais de simulation environnementale orientent les solutions, et les essais de fatigue accélérée évaluent la durée de vie.

#### 8.3.1.1 Mécanisme et traitement de renforcement de la rupture par fatigue à haute température

Le mécanisme de rupture par fatigue à haute température résulte principalement de l'évolution des dommages microscopiques sous l'effet de chargements thermomécaniques répétés. Dans les tôles en alliage de tungstène, ce mécanisme se manifeste par le glissement intergranulaire, la montée des dislocations et l'amorçage et la propagation de microfissures. Chimiquement, la ségrégation des éléments à l'interface réduit la résistance de la liaison, et la concentration des contraintes autour des particules de tungstène induit des dommages. Le processus se déroule en plusieurs phases : initialement, les dislocations se multiplient pour former des bandes persistantes ; dans une phase intermédiaire, les micropores coalescent ; et dans une phase finale, les fissures se propagent rapidement jusqu'à la rupture. Les cycles thermiques exacerbent ce mécanisme : la dilatation irrégulière génère des contraintes thermiques, et la formation d'une couche d'oxyde fragilise davantage la surface.

Les traitements de renforcement consistent d'abord à concevoir l'alliage, à l'incorporer à des terres rares ou à des carbures pour disperser et ancrer les joints de grains, et à contrôler chimiquement les éléments ségrégants afin de réduire la vitesse de glissement et d'augmenter le seuil de fatigue. Les traitements thermiques, de mise en solution et de vieillissement précipitent des phases fines, renforçant la ténacité de la phase liante, tout en contrôlant la plage de températures de traitement pour éviter la formation de grains grossiers. Le renforcement de surface, tel que l'implantation ionique d'azote ou de carbone, forme une couche à gradient, et la diffusion chimique améliore la dureté superficielle et limite la propagation des fissures.

Dans les applications de traitement, le recuit multipasse restaure la microstructure, et la gestion de la pureté chimique réduit les dommages induits par les impuretés. La vérification du mécanisme implique des essais de fatigue pour simuler les cycles et observer les caractéristiques de rupture afin d'effectuer les ajustements nécessaires. Des variations telles que le laminage de surface introduisent une contrainte de compression pour contrer la fatigue en traction.

#### 8.3.1.2 Problèmes liés aux vibrations et aux chocs et conception résistante aux chocs

Le principal problème lié aux vibrations et aux chocs réside dans les dommages localisés causés par la propagation des ondes de contrainte. Dans les tôles en alliage de tungstène, cela se manifeste par l'amorçage et la propagation de microfissures, la concentration des contraintes aux interfaces chimiquement fragiles et l'amplification de l'effet d'impact due à la fragilité des particules de tungstène. La cause est la superposition de la résonance de fréquence des vibrations et d'une charge d'impact instantanée élevée, associée à un amortissement insuffisant du matériau pour absorber l'énergie, ce qui entraîne une fatigue accélérée.

La conception résistante aux chocs optimise d'abord la structure composite, en laminant des feuilles d'alliage de tungstène avec des polymères et en utilisant des liants chimiques pour amortir les ondes de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

choc. Le contrôle de la texture est intégré à la conception, les fibres orientées renforçant la résistance directionnelle. Les revêtements de surface, tels que les polymères élastiques, absorbent l'énergie, tandis que la compatibilité chimique assure une adhérence stable.

Dans les applications de conception, les essais de vibration simulée permettent d'évaluer le problème et d'ajuster la répartition de l'épaisseur afin de disperser les contraintes. L'analyse des mécanismes et la modélisation par éléments finis prédisent les points de rupture, orientant ainsi l'épaississement ou le renforcement. Des variantes telles que la conception à densité graduelle assurent une absorption progressive des contraintes. En résumé, la prise en compte des vibrations et des charges d'impact, ainsi que la conception résistante aux chocs, illustrent les stratégies d'ingénierie de la réponse dynamique. L'optimisation des zones d'amortissement améliore la résistance aux vibrations des tôles en alliage de tungstène, contribuant ainsi à la stabilité des applications aérospatiales. Grâce à des améliorations de conception, les dommages dus aux impacts sont progressivement atténués, renforçant la fiabilité des matériaux en environnements vibratoires.

### 8.3.2 Problèmes liés à l'application des feuilles d'alliage de tungstène dans le blindage contre les rayonnements

tungstène utilisées en radioprotection présentent des problèmes de dégradation d'efficacité et de biocompatibilité. Ces problèmes affectent l'efficacité et la sécurité de la protection et peuvent être résolus par l'amélioration de l'efficacité et de la sécurité. Dans les applications de radioprotection, les plaques d'alliage de tungstène, utilisées comme collimateurs ou couches protectrices, doivent résister à une exposition prolongée aux rayonnements. La dégradation d'efficacité résulte de modifications structurales, tandis que les problèmes de biocompatibilité sont liés à des réactions de surface.

La résolution des problèmes d'application met l'accent sur la stabilité des matériaux et une protection optimisée. La haute densité du tungstène offre un avantage en termes d'épaisseur pour le blindage, mais des solutions spécifiques sont nécessaires pour différents environnements radiatifs. Les systèmes tungstène-nickel-cuivre sont couramment utilisés en blindage, et leur nature non magnétique assure la compatibilité médicale. Les tests de simulation environnementale orientent les solutions, et les tests de dose de rayonnement permettent d'évaluer les modifications.

#### 8.3.2.1 Raisons de l'atténuation et de la récupération de l'efficacité du blindage

La principale cause de la diminution de l'efficacité du blindage réside dans les modifications structurales induites par les radiations, telles que le gonflement, la formation de porosités et les transitions de phase. Dans les tôles en alliage de tungstène, ces modifications se manifestent par une diminution de la densité et des fluctuations du coefficient d'atténuation. Chimiquement, les atomes déplacés par les radiations génèrent des amas de lacunes, et les dommages interfaciaux amplifient la diffusion. Les causes et les processus dépendent de la dose : les faibles doses entraînent des défauts microscopiques, tandis que les doses moyennes à élevées provoquent des déformations macroscopiques.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



La récupération de l'efficacité est d'abord obtenue par un traitement thermique pour réparer les défauts, une diffusion chimique pour combler les lacunes et un recuit contrôlé à température contrôlée afin d'empêcher la précipitation de phases secondaires. Un revêtement de surface protecteur bloque le rayonnement incident, et une couche chimiquement inerte absorbe l'énergie. Des stabilisateurs sont ajoutés pendant le processus de récupération pour fixer les défauts et réduire le gonflement.

#### 8.3.2.2 Évaluation des risques de biocompatibilité et amélioration de la sécurité

L'évaluation et l'amélioration de la sécurité relatives aux risques de biocompatibilité ciblent principalement la libération de substances en surface et les réactions tissulaires. Dans les tôles en alliage de tungstène, ces risques se manifestent par une dissolution limitée des liants et, chimiquement, par le risque d'allergies induites par les ions nickel ou cuivre. L'évaluation est réalisée au moyen de tests de lixiviation et de tests de compatibilité cellulaire. Ces risques sont notamment dus à l'oxydation ou à l'abrasion de la surface, exposant ainsi la phase active.

L'amélioration de la sécurité commence par la passivation de surface pour former un film d'oxyde stable, suivie d'une anodisation chimique ou d'un placage pour bloquer la migration des ions. Les critères d'évaluation comprennent des tests biologiques d'adhésion et de prolifération cellulaires, ainsi que des améliorations de la formulation visant à réduire la proportion d'éléments actifs.

#### 8.3.3 Problèmes d'application des feuilles d'alliage de tungstène dans les dispositifs électroniques et médicaux

tungstène utilisées dans les dispositifs électroniques et médicaux présentent des anomalies de conductivité électrique et de magnétisme, ainsi que des problèmes de corrosion et d'oxydation. Ces problèmes affectent la stabilité de la conductivité et la durée de vie des dispositifs ; ils peuvent être résolus par un diagnostic précis, des modifications et l'application de revêtements protecteurs. Dans les applications médicales électroniques, les feuilles d'alliage de tungstène, utilisées comme dissipateurs thermiques ou blindages, doivent être protégées contre les fluctuations de conductivité et l'oxydation. Les anomalies proviennent d'impuretés ou de modifications de surface, tandis que la corrosion est liée à l'érosion du milieu.

La résolution des problèmes d'application met l'accent sur les mécanismes de dépannage et l'optimisation des revêtements. Les systèmes tungstène-cuivre sont courants en électronique, présentant une bonne conductivité thermique et électrique. Les essais environnementaux orientent les solutions, et les essais de corrosion accélèrent l'évaluation des modifications.

#### 8.3.3.1 Étude de la conductivité électrique, des anomalies magnétiques et des modifications des matériaux

Les anomalies de conductivité électrique et magnétiques sont principalement dues à l'introduction d'impuretés et aux fluctuations de la composition de phase. Dans les tôles d'alliage de tungstène, ces facteurs se manifestent par une interruption des canaux conducteurs ou une aimantation accidentelle.

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chimiquement, les impuretés d'oxygène forment une couche isolante, et la ségrégation du fer génère des domaines magnétiques. La recherche d'anomalies s'effectue par des mesures de résistance et l'analyse des courbes d'hystérésis afin de localiser les impuretés ou les zones de ségrégation.

La modification des matériaux commence par la purification des matières premières afin de réduire leur teneur en oxygène et en fer par un prétraitement de réduction chimique. L'alliage ainsi modifié subit ensuite des modifications : le rapport cuivre/aluminium est ajusté pour améliorer la conductivité, et le dopage au molybdène atténue le magnétisme. Le nettoyage de surface rétablit la conductivité, et le polissage chimique élimine l'oxydation.

### 8.3.3.2 Technologie de protection et de revêtement contre la corrosion et l'oxydation

Les technologies de protection et de revêtement contre la corrosion et l'oxydation ciblent principalement l'érosion par les milieux et l'oxydation par l'air. Ces problèmes se manifestent par des piqûres de surface et une dégradation des performances des tôles en alliage de tungstène, où la phase liante réagit préférentiellement pour former une couche poreuse. Les causes sont les environnements humides ou l'exposition à l'oxygène à haute température.

La technologie de revêtement protecteur comprend d'abord un dépôt chimique en phase vapeur de nickel-phosphore pour former un film dense, suivi d'une réaction chimique autocatalytique pour une couverture uniforme. Le procédé de revêtement inclut ensuite un dépôt sous vide de chrome-azote ou de DLC pour améliorer la dureté et l'inertie. Ce prétraitement protecteur passive la surface et le film d'oxyde stabilise le substrat.



CTIA GROUP LTD Feuilles d'alliage de tungstène

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## appendice

### Annexe A : Norme chinoise relative aux tôles en alliage de tungstène

chinoises relatives aux tôles en alliage de tungstène incombe principalement au Comité technique national de normalisation des métaux non ferreux (TC243) et à ses sous-comités. Ces normes couvrent des aspects tels que la composition chimique, les propriétés physiques, les procédés de fabrication et le contrôle qualité des alliages de tungstène. Fondées sur les politiques industrielles nationales et la planification des ressources minérales, elles garantissent la fiabilité et la constance des tôles en alliage de tungstène dans les applications industrielles. Elles insistent sur l'utilisation de poudre de tungstène de haute pureté, la normalisation des procédés de frittage en phase liquide et des limitations strictes concernant les impuretés telles que l'oxygène, le carbone et le phosphore afin d'éviter les défauts structuraux et les écarts de performance. Le système de normes comprend des normes nationales (série GB/T), des normes industrielles (série YS/T) et des normes d'entreprise, applicables aux systèmes courants tels que le tungstène-nickel-fer, le tungstène-nickel- cuivre et le tungstène- cuivre.

Les normes spécifient généralement les plages de composition, les distributions de densité, les indices de dureté et les tolérances dimensionnelles. Après frittage, la billette doit subir un traitement thermomécanique pour vérifier son uniformité. Les méthodes d'analyse chimique sont normalisées, comme la méthode gravimétrique à cinq Å pour la détermination de la teneur en tungstène, garantissant ainsi la précision des analyses. Les normes traitent également des exigences environnementales et de sécurité, en insistant sur la légalité et la durabilité de l'approvisionnement en matières premières et en prévenant l'utilisation de produits minéraux illégaux. Ces dernières années, avec le renforcement des exigences d'entrée sur le marché du tungstène, les normes ont intégré des éléments de contrôle des exportations, fournissant des lignes directrices en matière de conformité pour la transformation et le commerce de certains alliages de tungstène . La mise en œuvre des normes relatives aux tôles en alliage de tungstène favorise la normalisation tout au long du processus, de la métallurgie des poudres aux tôles finies, soutenant ainsi le développement des applications dans la fabrication de pointe.

#### Normes nationales (série GB/T)

Les normes nationales (série GB/T) constituent le cahier des charges de base pour les tôles en alliage de tungstène en Chine. Éditées par l'Administration d'État pour la réglementation du marché et l'Administration de la normalisation de Chine, elles définissent les exigences générales, les méthodes d'essai et les indicateurs de performance des alliages de tungstène. Ces normes s'appliquent à l'analyse de la composition chimique, à l'usinage et au contrôle qualité des tôles, garantissant un équilibre entre densité, dureté et stabilité thermique. Elles insistent sur la normalisation des procédés de métallurgie des poudres, depuis la pureté de la poudre de tungstène jusqu'au contrôle de la plage de températures de frittage. Sur le plan chimique, elles spécifient le rapport de teneur en tungstène, le rapport de phase liante et les seuils d'impuretés afin d'obtenir une distribution homogène de la microstructure biphase.

Le processus d'élaboration de la norme a impliqué une collaboration multipartite, notamment avec des instituts de recherche sur les métaux non ferreux et des entreprises manufacturières. Il s'est appuyé sur

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

les normes internationales tout en tenant compte des spécificités des ressources chinoises. La norme GB/T relative aux tôles en alliage de tungstène comprend des spécifications générales pour les barres, les plaques et les tôles d'alliage de tungstène, précisant l'état de surface, les tolérances d'épaisseur et les conditions de recuit. Les méthodes d'analyse chimique, telles que la détermination de la teneur en trioxyde de tungstène, utilisent la méthode gravimétrique au tungstate d'ammonium pour garantir la précision des résultats. La norme couvre également les exigences relatives au traitement thermique, en optimisant la température de recristallisation lors du recuit afin d'éviter que la croissance des grains n'affecte les propriétés mécaniques. Les normes destinées à l'exportation intègrent des clauses réglementaires, spécifiant les obligations de déclaration pour les alliages tungstène-nickel-fer ou tungstène-nickel-cuivre afin de faciliter la conformité aux exigences du commerce international.

Au niveau applicatif, la norme GB/T encadre l'utilisation des feuilles d'alliage de tungstène dans les instruments de précision et la gestion thermique, couvrant une large gamme de dimensions, des feuilles micrométriques aux plaques centimétriques. Le cycle de révision de la norme tient compte des avancées technologiques, telles que l'intégration d'alliages nano-renforcés. Lors de sa mise en œuvre, les entreprises doivent se soumettre à une vérification par des laboratoires certifiés, avec prélèvement d'échantillons par lots pour le contrôle de la composition et de la densité. Le développement durable est intégré à la norme, encourageant le recyclage de la poudre de tungstène afin de réduire la consommation de ressources.

### **Normes industrielles (série YS/T)**

Les normes industrielles (série YS/T), supervisées par le ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information, définissent l'analyse chimique et la transformation des tôles en alliage de tungstène, en précisant les spécifications techniques. Ces normes s'appliquent à la production d'alliages tungstène-cuivre et de tôles en alliage haute densité à base de tungstène, garantissant une détermination précise de la composition chimique et des performances constantes. Les normes YS/T portent sur les méthodes de détermination de la teneur en tungstène, comme la méthode gravimétrique à la quinquétine, qui permet une analyse de haute précision par séparation par dissolution et précipitation, et convient à la vérification du pourcentage de tungstène dans les alliages tungstène-cuivre. Elles spécifient également la préparation des échantillons, l'étalonnage des instruments et le contrôle des erreurs, en insistant sur la soustraction des interférences de la matrice.

La norme relative aux tôles en alliage de tungstène détaille le procédé de métallurgie des poudres, depuis le mélange des poudres jusqu'aux profils de température pour le frittage en phase liquide, en passant par l'optimisation de la quantité de phase liquide afin de favoriser le réarrangement des particules. Les normes de la série YS/T couvrent les spécifications des tôles pour les systèmes tungstène-nickel-fer et tungstène-nickel-cuivre, en précisant la distribution de dureté et les exigences de rugosité de surface, et en facilitant l'adaptation des procédés de fabrication pour les moules et les blindages. Ces normes sont élaborées en tenant compte de la planification nationale et des conditions d'accès aux ressources afin de garantir la légalité des matières premières et le respect des normes environnementales.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



Dans les applications, la norme YS/T encadre la normalisation des méthodes de contrôle qualité, de tolérance dimensionnelle et d'essai de conductivité thermique des tôles en alliage de tungstène pour les secteurs de l'électronique et du médical. La révision a intégré les retours des utilisateurs et inclut des dispositions relatives aux alliages émergents, tels que les composites tungstène-molybdène. Sa mise en œuvre impose aux entreprises de créer des laboratoires internes et d'étalonner régulièrement leurs équipements d'essai. En matière de gestion environnementale, la norme encourage le recours aux technologies de frittage à faible consommation d'énergie afin de réduire les émissions de carbone.

### **normes d'entreprise et locales**

Les normes d'entreprise et les normes locales constituent des réglementations complémentaires pour la production de tôles en alliage de tungstène en Chine. Élaborées par des entreprises du secteur des métaux non ferreux ou des associations industrielles locales, elles offrent des orientations flexibles pour des systèmes d'alliages ou des applications spécifiques. Ces normes s'appuient sur le cadre national tout en intégrant l'expérience acquise par les entreprises afin de garantir leur adaptabilité à la production de masse. Les normes d'entreprise, telles que les spécifications internes du groupe Zhuzhou Cemented Carbide, définissent les passes de laminage et les régimes de recuit des tôles en alliage de tungstène et optimisent chimiquement la distribution de la phase liante pour améliorer la ténacité. Les normes locales sont courantes dans les régions productrices de tungstène, comme les provinces du Hunan et du Jiangxi, et, en lien avec la planification des ressources minérales, mettent l'accent sur la traçabilité des matières premières et le contrôle des impuretés.

Ces normes couvrent les méthodes d'analyse chimique des alliages tungstène-cuivre, y compris le dosage des éléments traces, et s'appliquent à la vérification de la conformité des produits exportés. Les normes d'entreprise mettent l'accent sur les systèmes de gestion de la qualité, l'intégration de la certification ISO 9001 dans les processus de production et la traçabilité des lots pour garantir la constance de la qualité. Les normes locales favorisent la collaboration régionale, notamment par la normalisation des spécifications des alliages haute densité à base de tungstène, contribuant ainsi à l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement.

Au niveau applicatif, les normes d'entreprise encadrent la personnalisation des feuilles d'alliage de tungstène pour les instruments de précision, tandis que les normes locales favorisent une production respectueuse de l'environnement. Les révisions s'adaptent en permanence au marché et intègrent des clauses relatives aux alliages à haute entropie. Lors de la mise en œuvre, des audits internes vérifient la conformité aux normes. Le développement durable privilégie le recyclage et la réduction des émissions de poudres résiduelles.

### **Annexe B Normes internationales pour les tôles en alliage de tungstène**

Les normes internationales relatives aux tôles en alliage de tungstène sont principalement élaborées par des organismes tels que l'ASTM International et la SAE International. Ces normes fournissent un cadre réglementaire unifié à l'échelle mondiale couvrant la composition chimique, les propriétés mécaniques et les méthodes d'essai des tôles en alliage de tungstène de haute densité, garantissant ainsi

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

l'interopérabilité des matériaux dans les secteurs de l'aérospatiale, du médical et de l'électronique. Les normes internationales mettent l'accent sur la classification des alliages à base de tungstène de haute densité, comme le système de classification de la norme ASTM B777, qui définit des spécifications basées sur la teneur en tungstène et le type de phase liante. Le processus d'élaboration des normes implique une collaboration entre des experts de plusieurs pays et fait référence aux exigences générales relatives aux procédés de métallurgie des poudres.

La section relative à l'analyse chimique de la norme internationale normalise la détermination de la teneur en tungstène et les limites d'impuretés, facilitant ainsi la certification pour le commerce international. Les indicateurs de performance, tels que la distribution de la densité, la dureté et la conductivité thermique, sont applicables au laminage de tôles et à la vérification des traitements thermiques. La norme intègre également des systèmes de gestion de la qualité, comme l'ISO 9001, afin de garantir la constance de la production. Les normes de contrôle des exportations, telles que l'Arrangement de Wassenaar, encadrent la circulation internationale des alliages de tungstène et insistent sur l'importance de la déclaration de conformité.

Dans les applications, les normes internationales encadrent l'utilisation des tôles d'alliage de tungstène pour le blindage contre les radiations et les dissipateurs thermiques, avec des exigences dimensionnelles et de rugosité de surface garantissant un usinage de précision. Les cycles de révision tiennent compte des avancées technologiques et intègrent des clauses relatives aux alliages composites. La mise en œuvre requiert une certification par un laboratoire tiers et la conformité des essais par lots. Le développement durable encourage le recyclage.

### **Norme internationale ASTM**

Les normes internationales ASTM constituent le cahier des charges de base pour l'exportation de tôles en alliage de tungstène depuis la Chine. Élaborées par l'American Society for Testing and Materials (ASTM), elles définissent les spécifications standard des tôles en alliage lourd de tungstène, notamment la classification des alliages tungstène-nickel-fer et tungstène-nickel-cuivre (norme ASTM B777), ainsi que les nuances de densité et les exigences mécaniques. Ces normes s'appliquent à la production et aux essais des tôles, en spécifiant chimiquement les teneurs en tungstène, les proportions des phases liantes et les seuils d'impuretés afin de garantir l'équilibre de la microstructure biphasée.

La norme ASTM B777 spécifie en détail la composition chimique et les propriétés physiques des tôles en alliage de tungstène. Après frittage, les tôles doivent être laminées à chaud afin de vérifier leur uniformité. La norme inclut des méthodes d'essai, telles que la méthode gravimétrique de Cincinatti pour la détermination de la teneur en tungstène, et garantit un contrôle précis. La norme ASTM B760, qui spécifiait initialement les tôles et feuilles de tungstène pur, s'étend désormais aux spécifications du procédé de laminage des tôles en alliage.

Dans les applications, les normes ASTM encadrent l'utilisation des tôles d'alliage de tungstène dans les blindages aérospatiaux et médicaux, avec des tolérances dimensionnelles et des spécifications de dureté garantissant l'adaptabilité des procédés de fabrication. La révision a intégré les retours d'expérience

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

internationaux et a inclus des dispositions relatives à la tolérance aux radiations. Lors de la mise en œuvre, des laboratoires certifiés par l'entreprise effectuent des validations et des prélèvements par lot confirment la conformité. La gestion environnementale privilégie une production durable.

### **Norme internationale SAE**

internationales SAE, élaborées par la Society of Automotive Engineers (SAE), encadrent l'utilisation des tôles en alliage de tungstène dans le secteur aérospatial. Des normes telles que l'AMS 7725 définissent les exigences de performance des tôles en alliage de tungstène de forte épaisseur. Ces normes mettent l'accent sur la haute résistance et la stabilité thermique, les rendant ainsi adaptées aux composants haute température. Les normes SAE spécifient la composition chimique et la microstructure des alliages tungstène-nickel-fer, en limitant chimiquement le ferromagnétisme afin d'éviter les interférences électromagnétiques.

La norme AMS 7725 spécifie en détail la distribution de densité et l'état de recuit des tôles en alliage de tungstène. Après frittage, les tôles doivent subir un forgeage et un laminage afin de vérifier leur ténacité. La norme inclut des méthodes d'essai, telles que la détermination de la résistance à la traction et de la ténacité à la rupture, et prend en compte l'équilibre mécanique.

Dans les applications, les normes SAE encadrent l'utilisation des tôles d'alliage de tungstène dans les équipements aéronautiques, en fournissant des indicateurs de tolérance aux vibrations et de fatigue pour la conception. Les cycles de révision tiennent compte des avancées aérospace et intègrent des dispositions relatives aux structures composites. La mise en œuvre requiert la certification AS9100 et la conformité aux essais par lots. Le respect de l'environnement favorise les procédés à faible consommation d'énergie.

### **norme internationale ISO**

Les normes internationales ISO fournissent un cadre unifié à l'échelle mondiale pour les tôles en alliage de tungstène. Élaborées par l'Organisation internationale de normalisation, des normes telles que l'intégration du système de management de la qualité ISO 9001 ont été étendues aux spécifications générales des plaques en alliage lourd de tungstène. Ces normes s'appliquent à la production de tôles par métallurgie des poudres et spécifient chimiquement le contrôle de la pureté et des impuretés afin de garantir la conformité aux réglementations du commerce international.

Les normes ISO spécifient l'analyse chimique et les essais physiques des plaques en alliage de tungstène, et le procédé de frittage doit respecter les exigences environnementales. Ces normes comprennent des lignes directrices pour la certification internationale et facilitent la vérification à l'exportation.

Dans les applications, les normes ISO encadrent l'utilisation des tôles d'alliage de tungstène dans les secteurs de l'électronique et du médical, en garantissant des exigences fonctionnelles telles que la précision dimensionnelle et la résistance à la corrosion. Le processus de révision repose sur une collaboration multinationale et intègre des dispositions relatives au développement durable. Lors de la

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

mise en œuvre, les entreprises font l'objet d'audits, assurant la traçabilité des lots et la conformité. La gestion environnementale privilégie le recyclage des ressources. En résumé, les normes internationales ISO garantissent la qualité des tôles d'alliage de tungstène à l'échelle mondiale, standardisent la production grâce à des systèmes de management et favorisent le renforcement de la coopération internationale.

### **Annexe C : Normes relatives aux tôles en alliage de tungstène en Europe, en Amérique, au Japon, en Corée du Sud et dans d'autres pays**

Les systèmes de normalisation des tôles varient considérablement d'un pays à l'autre, notamment aux États-Unis, en Europe, au Japon et en Corée du Sud. Les États-Unis privilégient les normes ASTM, l'Europe les normes EN, le Japon les normes JIS et la Corée du Sud les normes KS. Ces normes couvrent la composition, les propriétés et la transformation des tôles en alliage lourd de tungstène, en tenant compte des besoins spécifiques de chaque région. Les normes européennes et américaines sont axées sur les applications aérospatiales et médicales, les normes japonaises sur la chimie fine et les normes sud-coréennes sur les exportations de produits électroniques. L'élaboration de ces normes implique les associations industrielles, qui s'appuient sur les normes internationales tout en intégrant les ressources locales. Les normes chimiques de ces pays définissent des limites pour la teneur en tungstène et les impuretés, et les indicateurs de performance incluent la densité et la conductivité thermique. Les applications soutiennent l'utilisation de feuilles d'alliage de tungstène dans le blindage et les dissipateurs thermiques. La technologie de réponse dynamique est en cours de révision afin d'intégrer les innovations en matière d'alliages. La mise en œuvre exige des laboratoires certifiés et la vérification de la conformité des lots. Le développement durable privilégie le recyclage.

#### **normes américaines (ASTM, série AMS)**

Les normes internationales pour les tôles en alliage de tungstène ont été élaborées par ASTM International et SAE. Par exemple, la norme ASTM B 777 classe les tôles en alliage lourd de tungstène, en définissant les nuances de densité et les spécifications mécaniques. Ces normes s'appliquent à la métallurgie des poudres et au laminage des tôles, et spécifient chimiquement le rapport de la phase liante des alliages tungstène-nickel-fer afin de garantir des variantes non magnétiques.

La norme ASTM B777 spécifie en détail la composition chimique et les méthodes d'essai, et exige la vérification du traitement thermique des tôles frittées. La norme AMS 7725, relative aux tôles en alliage de tungstène pour l'aérospatiale, met l'accent sur la résistance à la fatigue. Les applications soutiennent l'utilisation des tôles en alliage de tungstène dans les secteurs aérospatial et médical. Le processus de révision a fait l'objet d'un examen par des experts et intègre des dispositions relatives aux rayonnements. La certification AS9100 est en vigueur.

#### **Normes européennes (série EN)**

Les normes européennes (série EN) sont élaborées par le Comité européen de normalisation (CENS). Par exemple, la norme EN 2685 définit les exigences générales relatives aux tôles en alliage de tungstène.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



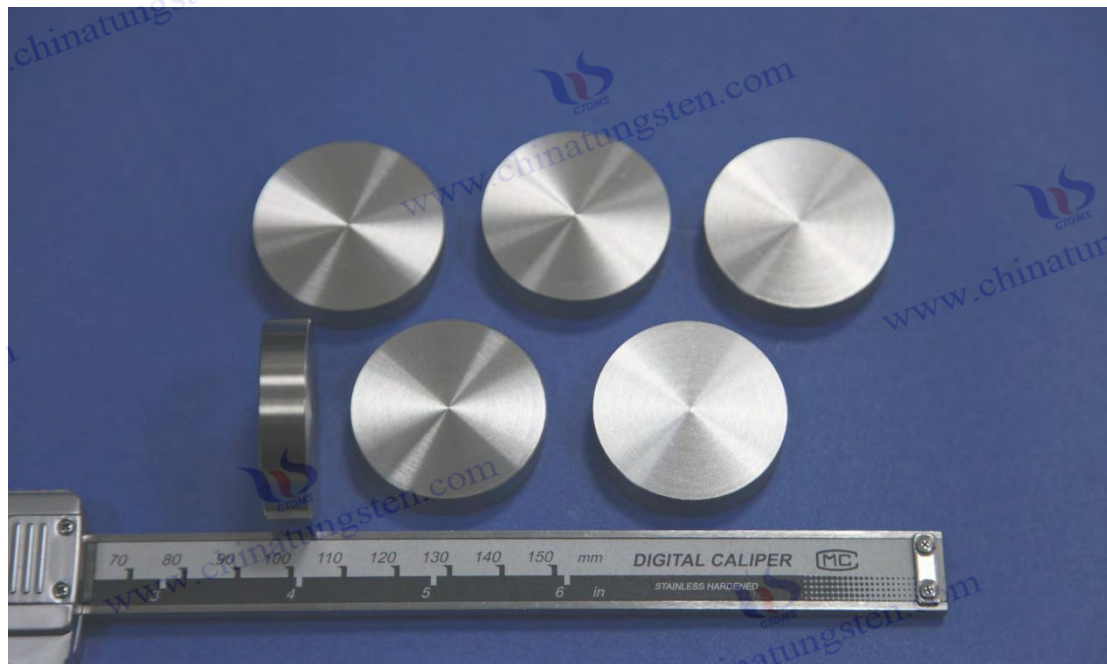
Ces normes s'appliquent à la composition et aux propriétés des alliages lourds de tungstène, en limitant chimiquement les impuretés afin de garantir la conformité environnementale. Les normes EN spécifient les procédés de frittage et les tolérances dimensionnelles, favorisant ainsi le commerce européen des matériaux en tôle. Dans les applications, elles encadrent l'utilisation des tôles en alliage de tungstène dans les secteurs nucléaire et électronique. Leur révision fait l'objet d'une collaboration multinationale. Le marquage CE est obligatoire.

### Normes japonaises (série JIS)

Les normes japonaises (série JIS) sont élaborées par le Comité japonais des normes industrielles. Par exemple, la norme JIS H 7804 spécifie la composition des tôles en alliage de tungstène. Ces normes s'appliquent aux applications électroniques et portent sur la composition chimique précise. Les normes JIS mettent l'accent sur la pureté et la précision de fabrication, soutenant ainsi l'industrie japonaise des tôles en alliage de tungstène. Dans les applications, elles encadrent l'utilisation de ces tôles dans les semi-conducteurs. Elles révisent également les directives techniques et garantissent la certification JIS.

### Norme coréenne (série KS)

Les normes coréennes (série KS) sont élaborées par l'Agence coréenne des normes industrielles. Par exemple, la norme KS D 3615 spécifie les exigences relatives aux tôles en alliage de tungstène. Ces normes facilitent les exportations de produits électroniques et définissent chimiquement la conductivité thermique. Les normes KS précisent les méthodes d'essai nécessaires à la fabrication des tôles en Corée. Sur le plan pratique, elles encadrent l'utilisation des nouvelles sources d'énergie. Elles réglementent également les collaborations industrielles et permettent la mise en œuvre du marquage KS.



CTIA GROUP LTD Feuilles d'alliage de tungstène

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

Annexe D Tableau de terminologie pour les tôles en alliage de tungstène

Terminologie chinoise	Brève explication
feuille d'alliage de tungstène	Matériaux en forme de plaques minces, composés principalement de tungstène, préparés et laminés par métallurgie des poudres.
Alliage de tungstène à densité élevée	à base de tungstène à haute densité, généralement avec une teneur en tungstène supérieure à 90 %, sont utilisés pour les contrepoids ou le blindage.
frittage en phase liquide	Le processus de frittage implique l'apparition d'une phase liquide, qui favorise le réarrangement et la densification des particules.
phase de liant	Les particules de tungstène présentes dans l'alliage lui confèrent plasticité et ténacité.
Dissolution-reprécipitation	Le mécanisme par lequel les atomes de tungstène se dissolvent et se reprécipitent dans la phase liante lors du frittage en phase liquide favorise la sphéroïdisation des particules.
Pressage isostatique à froid	Procédé de pressage et de moulage uniformes d'ébauches de poudre à l'aide d'un milieu liquide.
Pressage isostatique à chaud	Technologie de post-traitement qui élimine la porosité et augmente la densité sous haute température et haute pression.
Collimateur multilames	Dispositif de mise en forme de faisceau composé de lames en alliage de tungstène dans un équipement de radiothérapie.
dissipateur de chaleur	Les substrats thermoconducteurs utilisés pour la dissipation de la chaleur des dispositifs électroniques sont souvent fabriqués en alliage tungstène-cuivre.
pseudo-alliages	substances non solides, telles que les alliages tungstène-cuivre, sont préparées par infiltration en fusion.
recuit de recristallisation	Le recuit à haute température induit une recristallisation, éliminant les contraintes de traitement et restaurant la plasticité.
durcissement par écrouissage	L'écrouissage augmente la densité des dislocations, améliorant ainsi la dureté et la résistance.
Texture	La distribution préférentielle de l'orientation cristalline induite par la déformation par laminage affecte l'anisotropie.
film de passivation	Une couche d'oxyde protectrice, formée spontanément ou artificiellement à la surface, améliore la résistance à la corrosion.
taille de grain Fisher	Taille moyenne des particules de poudre déterminée par la méthode de perméation d'air.
Archimède	Méthode de détermination de la densité des matériaux par déplacement d'eau.
Dureté Vickers	L'indice de dureté mesuré par pénétrateur en diamant est applicable aux alliages de tungstène.
Atténuation des rayons X	La capacité d'un matériau à absorber et à diffuser les rayons X ou les rayons gamma.
coefficient de dilatation thermique	Le taux de dilatation dimensionnelle d'un matériau sous l'effet des variations de température est important pour son adaptation au substrat.
Biocompatibilité	Ce matériau est sans danger au contact des tissus biologiques ; il est non toxique et non allergène.

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](http://www.ctia.com.cn)

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

## Références

### Références chinoises

- [1] Wang Xiaoming, Li Wei. Procédé de préparation et étude des performances des matériaux en alliage de tungstène [J]. Nonferrous Metals Materials and Engineering, 2020, 41(5): 45-52.
- [2] Zhang Hua, Liu Jun. Optimisation du procédé de métallurgie des poudres pour les tôles d'alliage de tungstène haute densité [J]. Powder Metallurgy Technology, 2019, 37(4): 278-284.
- [3] Chen Li, Zhao Ming. Analyse de la microstructure et des propriétés mécaniques des tôles d'alliage tungstène-nickel-fer [J]. Materials Reports, 2021, 35(12): 12015-12020.
- [4] Sun Wei, Yang Fan. Application de feuilles composites en cuivre et tungstène dans l'emballage électronique [J]. Matériaux et technologies électroniques, 2022, 46(3) : 89-95.
- [5] Li Na, Wang Qiang. Procédé de laminage et technologie de traitement de surface des feuilles minces en alliage de tungstène [J]. Rare Metals Materials and Engineering, 2018, 47(8): 1567-1573.
- [6] Xu Gang, Huang Wei. Progrès dans l'application des alliages de tungstène dans le blindage contre les radiations [J]. Nuclear Technology, 2023, 46(2): 201-208.
- [7] Liu Yang, Zhang Lei. Influence du processus de traitement thermique sur les performances des tôles en alliage de tungstène [J]. Technologie du traitement thermique, 2020, 49(10) : 112-118.
- [8] Zhao Peng, Chen Ming. Progrès de la recherche sur la technologie de préparation de poudre d'alliage de tungstène [J]. Industrie de la métallurgie des poudres, 2021, 31(6) : 67-74.

### Références en anglais

- [1] Smith J, Johnson A. Préparation et propriétés des alliages lourds de tungstène[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(12): 8900-8915.
- [2] German R M. Frittage en phase liquide d'alliages lourds de tungstène[J]. International Journal of Powder Metallurgy, 2020, 56(4): 45-58.
- [3] Lee KH, et al. Microstructure et propriétés mécaniques des alliages W-Ni-Fe[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 802: 140-152.
- [4] Upadhyaya G S. Composites tungstène-cuivre pour applications électriques[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 258: 123-135.
- [5] Bose A, et al. Laminage de feuilles d'alliage de tungstène : procédé et propriétés[J]. Métallurgie des poudres, 2022, 65(3) : 210-225.
- [6] Kim Y, et al. Performance de protection contre les radiations des alliages de tungstène[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2023, 55(5): 1789-1796.
- [7] Das J, et al. Effets du traitement thermique sur les alliages lourds de tungstène[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(8): 3678-3690.
- [8] Luo SD, et al. Techniques de préparation de poudres pour les alliages de tungstène[J]. International Materials Reviews, 2021, 66(7): 489-512.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT