

# Encyclopédie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

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

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

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

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



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版  
[www.ctia.com.cn](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 : Concepts de Base et Contexte de Développement de l'Alliage Tungstène-Molybdène-Nickel-Fer**

- 1.1 Définition et caractéristiques de composition de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer
- 1.2 Historique du développement et importance stratégique de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer
- 1.3 Forces motrices de l'application et avantages matériels de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer
- 1.4 Analyse comparative de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer et des alliages traditionnels à base de tungstène
- 1.5 Évolution technique et tendances de développement des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans le pays et à l'étranger

### **Chapitre 2 : Composition Chimique et Microstructure de l'Alliage Tungstène-Molybdène-Nickel-Fer**

- 2.1 Rôle du tungstène, du molybdène, du nickel et du fer dans les alliages
- 2.2 Rapport de composition et principes de conception des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 2.3 Microstructure et structure de phase des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 2.4 Effet du contrôle des impuretés sur les propriétés des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 2.5 Modèle de relation composition-structure-propriété des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

### **Chapitre 3 : Propriétés Physiques et Mécaniques de l'Alliage Tungstène-Molybdène-Nickel-Fer**

- 3.1 Densité, gravité spécifique et précision dimensionnelle des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 3.2 Résistance, ductilité et ténacité à la rupture des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 3.3 Dureté, résistance à l'usure et propriétés de résistance aux chocs des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 3.4 Conductivité thermique, stabilité thermique et comportement de dilatation thermique des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 3.5 Propriétés électriques, réponse magnétique et résistance aux radiations des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 3.6 Analyse de la résistance à la corrosion et de la stabilité chimique des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

### **Chapitre 4 : Technologie de Préparation et de Traitement des Alliages Tungstène-Molybdène-Nickel-Fer**

- 4.1 Préparation des matières premières et propriétés des poudres d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 4.2 Technologie de compactage et de formage par métallurgie des poudres d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 4.3 Contrôle du frittage et de la densification des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 4.4 Traitement thermique et contrôle de la microstructure des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 4.5 Usinage et traitement de surface des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 4.6 Fabrication additive et méthodes de formage avancées des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

### **Chapitre 5 : Essais de Performance et Évaluation de la Qualité des Alliages Tungstène-Molybdène-Nickel-Fer**

- 5.1 Analyse de la composition et essais élémentaires des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.2 Caractérisation de la microstructure et de la densité des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 5.3 Essais des propriétés mécaniques et comparaison des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer avec les normes
- 5.4 Méthodes d'essai des propriétés thermiques et électrophysiques des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 5.5 Techniques d'état de surface et de détection des défauts des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 5.6 Essais non destructifs et évaluation de la durée de vie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

## **Chapitre 6 : Applications Typiques et Cas Industriels de l'Alliage Tungstène-Molybdène-Nickel-Fer**

- 6.1 Applications des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans les structures et blindages nucléaires
- 6.2 Applications des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans les noyaux de projectiles militaires et les composants inertiels
- 6.3 Applications des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans les structures aérospatiales haute température
- 6.4 Applications des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer en radiothérapie médicale et en protection haute densité
- 6.5 Applications des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans les moules de précision et les composants mécaniques résistants à l'usure
- 6.6 Applications composites des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer en ingénierie environnementale complexe

## **Chapitre 7 : Système de Normes et Exigences de Conformité pour les Alliages Tungstène-Molybdène-Nickel-Fer**

- 7.1 Résumé des nuances d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer chinois et des normes industrielles (GB/YS)
- 7.2 Spécifications pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans les normes ASTM/MIL
- 7.3 Exigences relatives aux matériaux pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans les normes UE/ISO
- 7.4 Réglementations environnementales et certification de la sécurité des matériaux pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer (RoHS/REACH)
- 7.5 Systèmes qualité pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans les industries aéronautique, nucléaire et médicale (AS9100/ISO 13485)

## **Chapitre 8 : Spécifications pour l'Emballage, le Stockage, le Transport et l'Utilisation des Alliages Tungstène-Molybdène-Nickel-Fer**

- 8.1 Conception de l'emballage et de la protection du transport pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 8.2 Conditions de stockage et exigences de protection contre la corrosion pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 8.3 Réglementations et directives de déclaration sur le transport national et international pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- 8.4 Précautions et plans de maintenance pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer pendant l'utilisation

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.5 Filières technologiques de réutilisation et de recyclage pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

## Chapitre 9 : Structure du Marché et Tendance de Développement de l'Alliage Tungstène-Molybdène-Nickel-Fer

9.1 Analyse de la distribution des ressources mondiales en tungstène et molybdène et de la chaîne industrielle des alliages

9.2 Demande actuelle du marché et prévisions de croissance pour l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

9.3 Introduction à l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer de CTIA GROUP

9.4 Fluctuations des prix des matières premières et analyse de la structure des coûts de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

9.5 Facteurs politiques et position stratégique de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans la fabrication haut de gamme

9.6 Futures avancées technologiques et orientations de modernisation industrielle pour l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

## Chapitre 10 : Frontières de la Recherche et Orientations Futures des Alliages Tungstène-Molybdène-Nickel-Fer

10.1 Concepts de conception avancés et tendances en matière de microalliages dans les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

10.2 Recherche sur les nanocomposites et les matériaux à gradient d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

10.3 Exploration de l'intégration des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer avec la fabrication additive à haut rendement

10.4 Évolution des performances de service des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans des environnements extrêmes

10.5 Matériaux alternatifs hautes performances et stratégies de développement durable pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

### Annexe

- Annexe 1 : Résumé des paramètres de performance typiques de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer
- Annexe 2 : Tableau comparatif des nuances et des compositions chimiques des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- Annexe 3 : Documents standard et index de référence des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer
- Annexe 4 : Glossaire des termes et définitions des abréviations anglaises des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

### 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

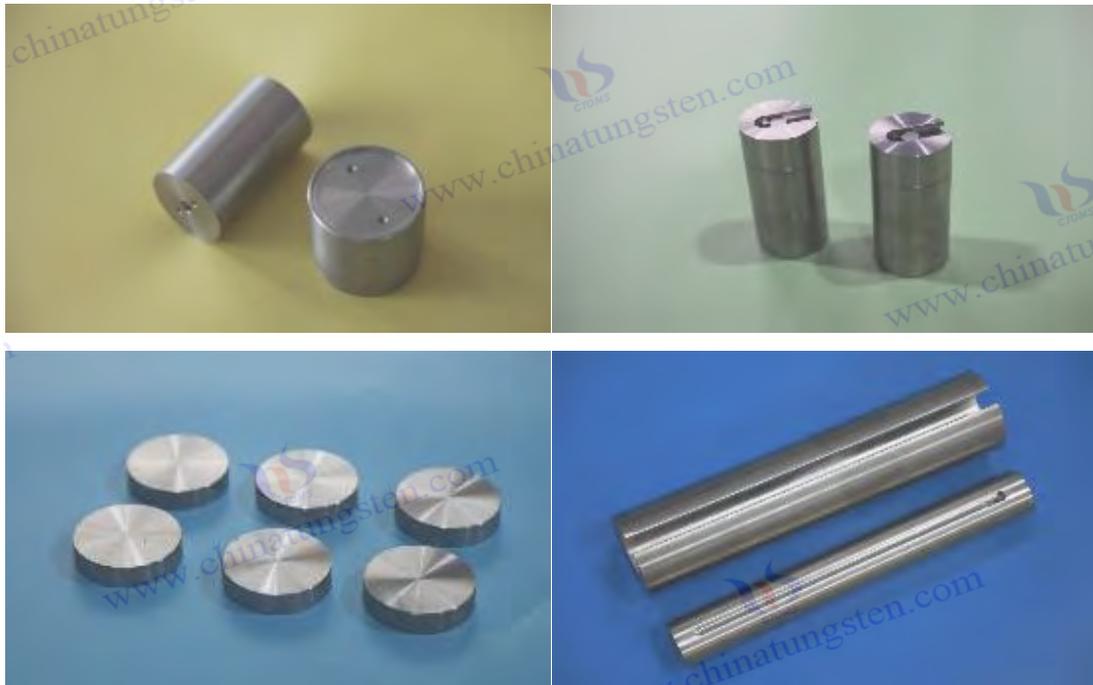
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

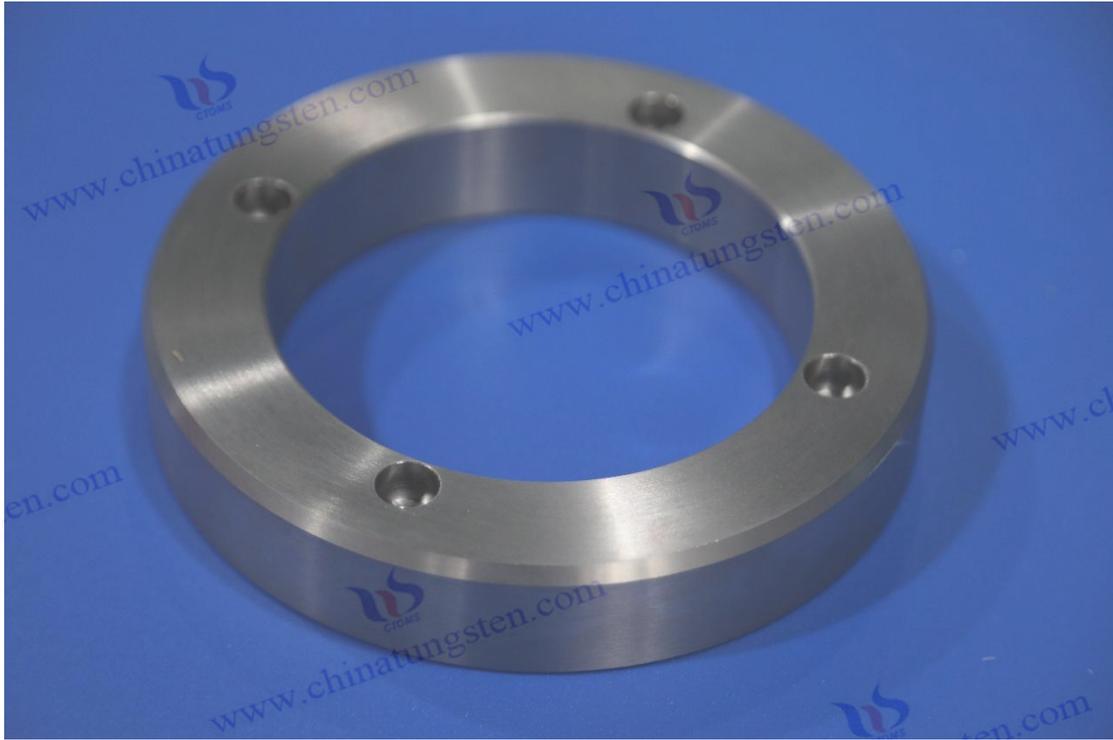
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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 1 Concepts de base et contexte de développement de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

### 1.1 Définition et caractéristiques de composition de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

tungstène-molybdène-nickel-fer (W-Mo-Ni-Fe) est un alliage haute densité composé principalement de tungstène (W), complété par du molybdène (Mo), du nickel (Ni) et du fer (Fe). Il est largement utilisé dans l'aérospatiale, l'énergie nucléaire, l'armée, la protection médicale et l'industrie manufacturière haut de gamme. Cet alliage conserve non seulement le point de fusion élevé, la densité élevée et l'excellente résistance aux radiations du tungstène, mais il présente également une microstructure optimisée et des propriétés mécaniques améliorées par synergie grâce à l'ajout de molybdène, de nickel et de fer.

#### 1. Définition et conventions de dénomination

Le tungstène-molybdène-nickel-fer (Tungstène-Molybdène-Ni-Fe) est un alliage multicomposant haute densité au sein des alliages lourds à base de tungstène (WHA). Son nom est généralement basé sur la fraction massique de tungstène dans l'alliage, par exemple un alliage W-Ni-Fe contenant environ 90 à 97 % en poids de W. L'introduction de molybdène (Mo) comme second composant à point de fusion élevé permet de créer un système composite W-Mo-Ni-Fe présentant une ténacité et une stabilité thermique accrues, formant ainsi un alliage W-Mo-Ni-Fe quaternaire ou de type quaternaire.

Ces alliages présentent les caractéristiques fondamentales suivantes :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Haute densité ( $\geq 17,0 \text{ g/cm}^3$ )**, adaptée aux composants inertiels et à la radioprotection ;
- **Bonne usinabilité**, plus facile à couper, souder et former que le tungstène pur ;
- **Excellent équilibre entre résistance et ténacité**, avec Ni et Fe formant une phase de liaison pour améliorer la plasticité et la résistance aux fissures ;
- **Stabilité thermique exceptionnelle**, en particulier après l'introduction du Mo, la résistance au fluage à haute température est améliorée ;
- **résistance à la corrosion et aux radiations**, répondant aux exigences de service dans des environnements extrêmes.

## 2. Analyse fonctionnelle des principaux éléments constitutifs

Le tungstène (W), principal composant de l'alliage, lui confère sa densité extrêmement élevée ( $19,3 \text{ g/cm}^3$ ), son point de fusion élevé ( $3410 \text{ °C}$ ) et son excellente résistance aux radiations. L'ajout de tungstène détermine la valeur applicative du matériau dans les applications à haute énergie et à forte charge.

Le molybdène (Mo) présente un point de fusion élevé ( $2623 \text{ °C}$ ) et d'excellentes propriétés de renforcement en solution solide. Son ajout permet d'affiner les grains et d'améliorer les propriétés mécaniques à haute température et la résistance à l'oxydation. Le Mo atténue également le décalage de dilatation thermique entre les particules de W et la matrice Ni-Fe, améliorant ainsi la résistance des liaisons interfaciales.

Le nickel (Ni) est un composant principal de la phase liante. Il forme une solution solide gamma avec le fer de l'alliage, contribuant ainsi à améliorer la plasticité, la résistance aux chocs et la ductilité du matériau. Le Ni possède également une certaine résistance à la corrosion et un certain antimagnétisme, contribuant ainsi aux capacités de blindage électromagnétique de l'alliage.

Le fer (Fe) agit comme un élément de liaison auxiliaire pour renforcer la phase de liaison, améliorer la résistance de l'alliage et est bénéfique pour réguler les caractéristiques de réponse magnétique de l'alliage (il peut être conçu comme un type magnétique faible ou non magnétique).

## 3. Caractéristiques typiques de la structure organisationnelle

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer présentent généralement une structure biphasée :

- **Particules de solution solide de tungstène-molybdène (phase dure)** : en tant que phase de renforcement, elles sont réparties de manière discontinue et déterminent la résistance et la densité de l'alliage ;
- **Phase de liaison en solution solide Ni-Fe ou Ni-Fe-Mo** : Elle remplit les espaces entre les particules dures, joue le rôle de liaison et de transfert de contraintes, et a une influence déterminante sur la ductilité et la ténacité de l'alliage.

L'uniformité de la structure et la qualité de la liaison de l'interface de phase sont les facteurs clés qui déterminent les performances de service de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4. Conception de la diversité et du rapport des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Selon les exigences de performance des différents scénarios d'application, l'alliage peut être conçu et ajusté des manières suivantes :

- **Ajustement de la teneur en tungstène** : généralement 85 %, 90 %, 95 %, etc., pour ajuster la densité et la résistance ;
- **Modifications du taux de substitution du molybdène** : remplacement partiel du tungstène ou ajout de celui-ci dans la phase liante pour améliorer la résistance à la chaleur et la stabilité chimique ;
- **Ni:Fe rapport** : Les rapports courants incluent 7:3, 8:2, 1:1, etc., qui sont utilisés pour ajuster la ténacité et les propriétés magnétiques de l'alliage ;
- **Ajout d'oligo-éléments** : tels que Co, Cr, Ti, Re, etc. sont utilisés pour optimiser des propriétés spéciales.

#### 5. Résumé des caractéristiques du matériau

Caractéristiques de performance	Performances de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer
densité	Jusqu'à 17~18,5 g/cm <sup>3</sup>
Plage de points de fusion	Plus élevé que l'alliage tungstène-nickel-fer, la stabilité globale est améliorée
Équilibre force-ténacité	Excellent, adapté aux occasions de résistance aux chocs/charges élevées
Conductivité thermique	Bon, adapté aux systèmes de contrôle thermique
Contrôle magnétique	Peut être conçu comme un type magnétique/non magnétique faible
Usinabilité	Nettement meilleur que le tungstène pur, permettant un usinage de précision
Résistance à la corrosion et aux radiations	Exceptionnel, adaptable à un environnement de service extrême

En résumé, l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, en tant que système de matériaux avancés hautes performances, polyvalent et haute densité, conserve les avantages de l'alliage de tungstène tout en offrant un équilibre idéal entre résistance, ténacité, résistance à la température et ouvrabilité grâce à l'introduction de molybdène et d'une phase liante Ni-Fe optimisée. Il est devenu un matériau incontournable dans l'aérospatiale, la défense, l'énergie nucléaire et la fabrication industrielle haut de gamme.

#### 1.2 Historique du développement et importance stratégique de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

En tant qu'alliage multicomposant avancé, haute densité et hautement volumique, le développement du tungstène-molybdène-nickel-fer illustre non seulement l'évolution constante des matériaux de structure hautes performances, mais aussi la convergence de la métallurgie, de la métallurgie des poudres, de la science des matériaux et des technologies de défense nationale. La naissance et

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'évolution de cet alliage ont traversé plusieurs époques technologiques clés, du milieu du XXe siècle à nos jours, ce qui en fait un exemple typique de nouveau matériau « axé sur la technologie et les applications ».

## 1. Aperçu de l'historique du développement

### 1. Origine : Les fondements du développement des alliages à base de tungstène à haute densité (des années 1940 aux années 1960)

Le développement d'alliages haute densité à base de tungstène a débuté pendant la Seconde Guerre mondiale, lorsque l'industrie militaire avait un besoin urgent d'un matériau à haute densité, à haute résistance et à excellente résistance aux radiations pour des applications telles que les noyaux de projectiles perforants, les contrepoids de missiles et les systèmes de commande de vol inertiels. C'est dans ce contexte qu'est né le système W-Ni-Fe. Fabriqué par métallurgie des poudres, ce système surmonte les difficultés de mise en œuvre du tungstène pur et permet des avancées majeures en termes de propriétés structurelles.

À cette époque, l'alliage tungstène-nickel-fer présentait déjà une bonne densité (17-18,5 g/cm<sup>3</sup>) et une bonne usinabilité, ce qui en faisait un matériau standard pour les projectiles perforants militaires et les dispositifs de guidage inertiel.

### 2. Extension : Introduction du molybdène et complexité des systèmes d'alliages (années 1970 à 1990)

De la fin de la Guerre froide à sa fin, les alliages conventionnels tungstène-nickel-fer ont progressivement été confrontés à des difficultés de fluage et à une stabilité structurelle insuffisante dans les environnements à haute température, notamment dans l'énergie nucléaire, les véhicules hypersoniques et l'exploration spatiale. Les chercheurs ont commencé à expérimenter l'introduction de molybdène (Mo) dans ce système, tirant parti de son point de fusion élevé et de sa résistance à la chaleur pour améliorer la stabilité structurelle de l'alliage à haute température. Le Mo a également renforcé la phase liante, améliorant ainsi la résistance des liaisons interfaciales et la résistance à la corrosion.

Durant cette période, la conception de la microstructure des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer est devenue plus complexe et les propriétés des matériaux ont été considérablement optimisées. Le Laboratoire national de Los Alamos aux États-Unis, l'Institut des nouveaux matériaux en Union soviétique et Sumitomo Metal Industries au Japon ont successivement développé des systèmes d'alliages W-Mo-Ni-Fe avec différents ratios destinés aux gaines de combustible nucléaire, aux blindages aérospatiaux et aux composants inertiels haute température.

### 3. Maturité : à double usage et industrialisé (depuis le début du 21e siècle)

Grâce aux progrès de la métallurgie des poudres, du pressage isostatique, du frittage de précision et de la fabrication additive, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont passés du statut de « matériau stratégique » à celui de composant clé de l'intégration militaro-civile et de la fabrication industrielle haut de gamme. Ils sont largement utilisés non seulement dans l'aviation moderne,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'aérospatiale, la construction navale et les systèmes de défense, mais aussi dans des applications civiles telles que la radiothérapie médicale, les équipements électroniques de précision, la protection contre les radiations et les équipements sous vide haute température.

En particulier dans les équipements médicaux haut de gamme tels que les équipements d'imagerie, les structures de protection des sources de rayons gamma ou dans le blindage électromagnétique des appareils de communication par micro-ondes, l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est devenu un matériau structurel de base irremplaçable en raison de sa multifonctionnalité, de son magnétisme contrôlable et de son excellente densité.

## 2. Analyse de l'importance stratégique

Le développement de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer n'est pas seulement une avancée dans la technologie des matériaux, sa valeur stratégique se reflète dans les aspects suivants :

### 1. Matériel de sécurité de la défense nationale

Cet alliage est depuis longtemps considéré comme un **matériau essentiel pour la défense nationale**. Largement utilisé dans les noyaux de projectiles cinétiques, les stabilisateurs de soute, les structures inertielles des systèmes antisatellites et le blindage des navires, il constitue un matériau de base indispensable aux systèmes de frappe de précision modernes. L'équilibre entre résistance et ténacité, la densité élevée et la résistance aux chocs des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer leur confèrent des avantages significatifs en termes de capacité de perforation du blindage, de stabilité en vol et de fiabilité sismique.

Dans de nombreux pays, ce matériau est soumis à **des contrôles à l'exportation** et figure sur les listes de « métaux spéciaux » destinés au secteur militaire. Par exemple, la réglementation ITAR américaine, la « liste des biens à double usage » chinoise et le règlement REACH de l'UE encadrent strictement ses exportations.

### 2. Matériaux clés pour l'énergie nucléaire et la radioprotection

Le tungstène et ses alliages comptent aujourd'hui parmi les matériaux résistants aux neutrons les plus importants. L'ajout de molybdène améliore non seulement la stabilité du matériau dans les réacteurs nucléaires à haute température, mais aussi sa résistance à la corrosion et l'uniformité de l'absorption neutronique. Par conséquent, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer jouent un rôle essentiel dans des systèmes tels que **le gainage du combustible nucléaire, les structures de conversion thermoélectrique nucléaire et le blindage neutronique**.

En outre, l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est devenu une direction candidate importante dans la recherche de **matériaux de revêtement de réacteurs à fusion de nouvelle génération** et de matériaux **cibles d'accélérateurs ADS**, et présente une **importance stratégique énergétique nationale évidente**.

### 3. Matériaux de support pour la fabrication haut de gamme

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Avec l'évolution des technologies telles que les moteurs d'avion, les sondes spatiales et les trains à grande vitesse, la demande en contrôle qualité de précision et en composants à forte inertie augmente. Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer offrent un excellent équilibre dynamique, une excellente conductivité thermique et des propriétés antimagnétiques, ce qui en fait des matériaux idéaux pour des composants clés tels que **les volants d'inertie de gyroscopes, les rotors de guidage inertiel, les stabilisateurs et les dispositifs de contrôle d'attitude aérospatiaux**.

De plus, son excellente capacité de dissipation thermique et ses performances de blindage électromagnétique jouent également un rôle important dans les domaines de pointe tels que **les équipements de communication 5G, les systèmes laser haute puissance et les accélérateurs industriels**.

#### **4. Stratégie mondiale en matière de ressources rares et renforcement des capacités de sécurité indépendantes**

Le tungstène et le molybdène sont des ressources stratégiques en métaux rares. Les ressources en tungstène sont particulièrement concentrées à l'échelle mondiale, **la Chine détenant près de 60 % des réserves mondiales de tungstène. La Chine** est également le leader mondial en termes de réserves et de production de molybdène. Le développement et le contrôle indépendant des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer garantissent non seulement la sécurité de la chaîne industrielle, mais fournissent également un soutien matériel au développement de la fabrication haut de gamme et à l'intégration militaro-civile.

Dans le cadre des stratégies visant à « percer les technologies clés » et à « construire un pays fort en matériaux », l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, en tant que matériau pilier stratégique, a été inclus dans de nombreux projets nationaux majeurs et dans de nouveaux plans de développement de matériaux (tels que les « Lignes directrices pour le développement de l'industrie des nouveaux matériaux » et la « Feuille de route pour le développement des matériaux d'intégration militaro-civile »).

### **III. Perspectives d'avenir**

Avec l'essor de nouvelles technologies de matériaux, telles que la conception d'alliages à haute entropie, la fabrication additive, le contrôle de la microstructure des interfaces et l'amélioration des nanoparticules, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer présentent encore un potentiel de développement important. Ils présenteront un potentiel de développement accru dans les domaines suivants :

- Optimisation de la stabilité de l'organisation et conception de structures composites pour **les environnements de service extrêmes** ;
- Application de structures fonctionnelles complexes combinant **fabrication additive et optimisation topologique** ;
- Appliqué aux futurs systèmes technologiques stratégiques tels que **l'exploration de l'espace lointain et l'énergie de fusion nucléaire** ;

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

- Promouvoir sa **pleine pénétration dans les chaînes industrielles civiles haut de gamme** (telles que le contrôle médical, biologique et de précision).

En résumé, l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer n'est pas seulement une extension et une optimisation des alliages traditionnels à haute densité, mais aussi un matériau clé reliant la sécurité nationale, la stratégie énergétique et la fabrication d'équipements haut de gamme. Chaque avancée majeure dans son développement résulte de la synergie entre les avancées technologiques des nouveaux matériaux et l'évolution des principaux scénarios d'application, et il occupe une position stratégique irremplaçable.

### 1.3 Application Force motrice et avantages matériels de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer (W-Mo-Ni-Fe), dotés de propriétés physiques exceptionnelles, d'une résistance mécanique et d'une adaptabilité environnementale exceptionnelles, sont largement adoptés comme matériaux hautes performances dans des applications critiques. L'expansion et l'approfondissement de leurs applications pratiques découlent de l'évolution des exigences technologiques et des défis d'ingénierie. Comprendre les moteurs de l'application de ce système d'alliage peut nous aider à mieux cerner ses avantages matériels et sa position stratégique dans des secteurs de pointe tels que la défense, l'énergie et l'industrie manufacturière.

#### 1. Analyse des principaux moteurs de l'application

##### 1. Poussé par des exigences de densité et d'inertie élevées

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer ont généralement une masse volumique comprise **entre 17,0 et 18,8 g/cm<sup>3</sup>**. Leur densité extrêmement élevée en fait des matériaux idéaux pour les contrepoids, l'équilibrage et le contrôle inertiel. À mesure que les engins spatiaux, missiles, satellites et autres systèmes modernes améliorent la précision de leur contrôle d'attitude en vol, la demande de matériaux de contrepoids haute densité, compacts et stables augmente considérablement.

Ces alliages sont couramment utilisés dans :

- Volants d'inertie de gyroscope, composants à haute densité dans les systèmes de navigation inertielle ;
- Réglage du centre de gravité et équilibrage des masses des avions ;
- Composants d'équilibrage dynamique des systèmes de contrôle d'attitude des lanceurs ;
- Les domaines civils comprennent des dispositifs à forte inertie tels que les pendules d'horloge et les contrepoids de voitures de course.

##### 2. Motivé par l'adaptabilité aux environnements extrêmes

Le tungstène et le molybdène possèdent des points de fusion élevés, une résistance élevée et une faible pression de vapeur, ce qui les rend stables dans des environnements extrêmes tels que les températures élevées, les radiations intenses et la corrosion sévère. Avec le développement des véhicules hypersoniques, des centrales nucléaires, des équipements sous vide et des sondes spatiales

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

lointaines, la stabilité à long terme des matériaux dans des environnements difficiles est devenue un enjeu majeur.

Alliage tungstène-molybdène-nickel-fer en raison de :

- Résistance aux chocs thermiques;
- Résistant aux irradiations neutroniques et gamma ;
- Résistant à la corrosion du métal en fusion et à la fragilisation par l'hydrogène ;
- Capacité à maintenir une résistance supérieure à 1000°C ;

Largement utilisé dans :

- Ensembles de blindage et structures de support des réacteurs nucléaires ;
- Revêtement de réacteur de fusion et structure d'échange à haute température ;
- Système de stockage d'énergie à sel fondu à haute température et paroi de four à ultra-haute température.

### 3. Motivé par les exigences d'usinabilité et de formage structurel

Bien que le tungstène pur offre d'excellentes propriétés, il est extrêmement difficile à usiner, notamment pour le formage de précision et la fabrication de pièces structurelles complexes. Cependant, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, grâce à l'introduction de phases liantes telles que le Ni et le Fe, améliorent considérablement la forgeabilité, l'usinabilité et la soudabilité du matériau, tout en conservant une densité et une résistance élevées.

Par conséquent, ce type d'alliage est devenu un matériau important pour la fabrication de pièces structurelles de précision, telles que :

- Peut traiter des noyaux de projectiles perforants et des ailerons de queue de vol ;
- Systèmes de contrepoids à géométries complexes ;
- Formage de composants creux de grandes dimensions et de pièces de formes spéciales.

Il présente une bonne compatibilité avec les technologies de formage modernes telles que la fabrication additive (AM), le pressage isostatique à chaud (HIP) et le laminage de précision, ce qui élargit son champ d'application industrielle.

### 4. Poussé par la demande d'intégration multifonctionnelle et d'applications composites

Avec la tendance croissante à la miniaturisation et à la haute efficacité des équipements, les matériaux doivent avoir de multiples fonctions telles qu'une densité élevée, une conductivité thermique, une résistance aux radiations, un blindage électromagnétique et un faible magnétisme.

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer présente l'avantage d'une « intégration structure-fonction ». En ajustant le rapport Ni/Fe et le dopage au Mo, il permet d'obtenir :

- **Contrôle non magnétique ou magnétique faible** pour répondre aux exigences de l'environnement médical IRM et de la navigation de précision ;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Excellente conductivité thermique** , peut être utilisé comme base de dissipation thermique pour les composants électroniques ou comme cible plasma ;
- **Performances de blindage électromagnétique** , utilisées pour la conception anti-interférence des systèmes électroniques radar et des dispositifs de traitement du signal ;
- **Résistant aux chocs et à la fatigue** , adapté à un service à long terme sous des charges dynamiques.

## 2. Avantages du matériau de base de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

Dimension de performance	Avantages en termes de performances
<b>Caractéristiques de haute densité</b>	≥17,0 g/cm <sup>3</sup> , supérieur à la plupart des alliages métalliques, ce qui en fait le matériau privilégié pour les composants inertiels et les structures de protection
<b>Propriétés mécaniques complètes et solides</b>	Possédant à la fois une résistance élevée (résistance à la traction ≥ 800 MPa) et une bonne ductilité (allongement > 10 %)
<b>Service stable à haute température</b>	Maintient l'intégrité structurelle dans des environnements > 1000 °C, avec une excellente résistance aux chocs thermiques et au fluage
<b>Conception multifonctionnelle et réglable</b>	Il peut réaliser l'intégration de fonctions antimagnétiques, de conductivité thermique, de résistance aux radiations, de résistance à la corrosion, de blindage électromagnétique et d'autres fonctions.
<b>Bonnes performances de traitement et de formage</b>	Il présente une bonne soudabilité et usinabilité, convient à la fabrication de composants complexes et est compatible avec la fabrication additive et le pressage isostatique.
<b>Forte adaptabilité environnementale</b>	Résistant à l'irradiation neutronique, à la corrosion, au brouillard salin et à l'oxydation à haute température, il convient à une variété d'environnements tels que l'aérospatiale, l'énergie nucléaire et les plates-formes embarquées.

## 3. Aperçu des tendances des applications industrielles

Domaines d'application	Utilisation spécifique	Tendances des applications
<b>Industrie de la défense nationale</b>	Noyau de projectile perforant, compartiment de queue de missile, structure antimagnétique radar, contrepoids inertiels	La demande de composites à haute densité, antimagnétiques et faciles à traiter a considérablement augmenté
<b>Aérospatial</b>	Contrepoids de réglage d'attitude, volant gyroscopique, système de propulsion de contrôle d'attitude	La tendance à la miniaturisation, à la légèreté et à l'intégration multifonctionnelle est évidente
<b>Système d'énergie nucléaire</b>	Blindage du réacteur à fusion, gaine du combustible, composants du modérateur de neutrons	La stabilité des matériaux et la résistance aux radiations sont les axes de recherche principaux
<b>Équipement médical</b>	Blocs de blindage d'accélérateur de radiothérapie, contrepoids d'IRM, composants de protection de tomographie	Les solutions d'alliages non magnétiques + haute densité + non toxiques sont progressivement standardisées

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Électronique de communication</b>	Support conducteur thermique, plaque de blindage contre les interférences électromagnétiques, fond de panier de contrôle thermique	Les matériaux composites fonctionnels remplacent progressivement les matériaux de structure traditionnels en cuivre et en aluminium
<b>Fabrication haut de gamme</b>	Composants de focalisation laser, structures de puissance de précision, bagues de champ thermique à ultra-haute température	Accélérer la synergie et l'intégration avec la fabrication avancée (AM, PVD)

#### IV. Évaluation complète et orientations futures

: L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est devenu le matériau de choix pour de nombreux projets haut de gamme, car il allie les excellentes propriétés des alliages traditionnels à haute densité à des améliorations systématiques en termes d'usinabilité, de polyvalence et d'adaptabilité aux environnements extrêmes. Sa valeur continuera de croître dans des domaines tels que la fabrication par intelligence artificielle, les systèmes de propulsion aérospatiale et les nouveaux systèmes d'énergie nucléaire.

Les principales orientations de développement comprennent :

- **Structure organisationnelle contrôlable** : raffinement du grain, optimisation de la phase de liaison et amélioration de l'interface ;
- **Processus de formage intelligent** : intégré à l'impression 3D, au pressage isostatique à chaud et au laminage intelligent ;
- **Conception et recyclage écologiques** : développement de formules d'alliages recyclables, peu toxiques et sans cadmium ;
- **Nouvelle conception de simulation multi-échelle** : Prédiction de la composition-structure-propriété à l'aide de CALPHAD et de la simulation de champ de phase.

#### 1.4 Analyse comparative de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer et des alliages traditionnels à base de tungstène

Les alliages à base de tungstène sont une classe de matériaux métalliques à haute densité, principalement composés de tungstène (W), complété par une faible quantité d'une phase liante métallique (comme le nickel, le fer et le cuivre). Ils sont largement utilisés dans l'aérospatiale, l'armée, l'énergie nucléaire et l'industrie manufacturière haut de gamme. Version améliorée des alliages à base de tungstène, le tungstène-molybdène-nickel-fer (TNI) conserve les caractéristiques de haute densité des alliages traditionnels à base de tungstène tout en optimisant significativement leur microstructure, leurs performances et leur diversité fonctionnelle grâce à l'introduction du molybdène (Mo) et à la régulation du rapport Ni/Fe. Cette section compare systématiquement les principales différences et les avantages en termes de performances du TNI par rapport aux alliages traditionnels à base de tungstène.

#### 1. Différences dans la composition chimique et la structure organisationnelle

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Projet de comparaison</b>	<b>Alliages traditionnels à base de tungstène (W-Ni-Fe ou W-Ni-Cu)</b>	<b>Alliage tungstène-molybdène-nickel-fer (W-Mo-Ni-Fe)</b>
<b>Élément principal</b>	W (85~98 % en poids )	W (80 ~ 93 % en poids ) + Mo (2 ~ 10 % en poids )
<b>liant métallique</b>	Ni-Fe ou Ni-Cu	Système principalement Ni-Fe, le rapport peut être ajusté avec précision
<b>Ajout d'éléments</b>	Aucune ou de petites quantités d'éléments de terres rares	Le Mo est le principal élément de renforcement, et certains alliages ajoutent du Co ou du Ti, etc.
<b>Morphologie organisationnelle</b>	Particules de tungstène + liant de phase $\gamma$	Particules de solution solide de tungstène + molybdène + phase de liaison Ni-Fe-Mo renforcée
<b>Stabilité microstructurale</b>	Moyen, facile à rendre grossier après chauffage	Plus élevé, le Mo inhibe la croissance des grains, structure résistante aux hautes températures

L'ajout de molybdène introduit une phase à haute température plus stable au niveau organisationnel, améliore la fluidité de la phase de liaison et la qualité de liaison de l'interface, améliorant ainsi la densité et la stabilité structurelle de l'alliage global.

## 2. Comparaison des propriétés physiques et mécaniques

Paramètres de performance	Alliages traditionnels à base de tungstène	Alliage tungstène-molybdène-nickel-fer
<b>Densité (g/cm<sup>3</sup>)</b>	17,0 à 18,5	17,2 ~ 18,8 (Mo réduit légèrement la densité mais a une structure plus serrée)
<b>résistance à la traction</b>	700 à 900 MPa	800 à 1 050 MPa
<b>Limite d'élasticité</b>	500 à 650 MPa	600 à 850 MPa
<b>Élongation</b>	8% à 15%	10% à 18% (certains types à faible magnétisme sont meilleurs)
<b>Dureté (HRC)</b>	25~35	30~42 (Mo-enhanced)
<b>Stabilité thermique</b>	850~950°C Maintient la résistance	$\geq 1100^{\circ}\text{C}$ maintient toujours l'intégrité structurelle
<b>Résistance à la corrosion à chaud</b>	Généralement, particulièrement instable dans les environnements acides/halogènes	Bonne résistance aux sels fondus, aux atmosphères corrosives et à l'oxydation à haute température

En termes de propriétés mécaniques, l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer présente une résistance, une ténacité et une durée de vie en fatigue supérieures à celles des alliages traditionnels à base de tungstène et convient aux exigences de service dans des conditions de charge plus complexes et des environnements difficiles.

## 3. Comparaison des performances de traitement et de l'adaptabilité du processus

Projet de comparaison	Alliages traditionnels à base de tungstène	Alliage tungstène-molybdène-nickel-fer
<b>Façonnabilité à chaud</b>	Bon, adapté au forgeage à chaud et à l'extrusion à chaud	C'est également bien, mais la mobilité apportée par Mo doit être correctement contrôlée

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Usinabilité</b>	Peut être tourné, fraisé, rectifié, etc.	L'usinabilité est meilleure que celle du tungstène pur, légèrement inférieure à celle du système W-Ni-Cu traditionnel
<b>Performances de soudage</b>	Pauvre, sensible aux fissures thermiques	Du Mo est ajouté pour améliorer les performances des joints et s'adapter au soudage laser
<b>Compatibilité isostatique</b>	Convient pour CIP et HIP	Plus adapté au HIP, taux de densification élevé et forte liaison d'interface
<b>Compatibilité de la fabrication additive</b>	L'adaptabilité de la poudre doit être ajustée	Il présente une bonne compatibilité avec le revêtement laser et peut développer des nuances spéciales pour l'impression 3D

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer présente une plus large gamme d'adaptabilité de processus et est particulièrement adapté aux voies de traitement haut de gamme telles que le pressage isostatique à chaud, le formage de précision et la fabrication additive moderne.

#### 4. Comparaison des fonctionnalités et de l'application complète

Caractéristiques	Alliages traditionnels à base de tungstène	Alliage tungstène-molybdène-nickel-fer
<b>Réactivité magnétique</b>	Peut être conçu pour être magnétique ou non magnétique	Il est plus facile d'obtenir des types magnétiques faibles ou faiblement magnétiques, adaptés à l'IRM et à d'autres environnements
<b>Conductivité thermique</b>	Excellent (système Ni-Fe)	Maintenir une bonne conductivité thermique, Mo réduit légèrement mais améliore la stabilité thermique
<b>Performances de blindage électromagnétique</b>	Peut protéger des rayons X et des rayons gamma	Effet de blindage plus fort, adapté à la radiothérapie profonde et aux structures accélératrices
<b>Résistance aux radiations</b>	Élevé, adapté à la radioprotection nucléaire	Plus le Mo est élevé, plus l'absorption des neutrons et la stabilité du réseau sont améliorées.
<b>Résistance à la corrosion et à l'oxydation</b>	Moyen, nécessite un revêtement de surface ou un contrôle environnemental	Excellent, en particulier à haute température, en atmosphère de sel fondu et acide avec une meilleure stabilité

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, avec son excellente intégration fonctionnelle, s'adapte aux environnements d'application complexes modernes, notamment dans les domaines du traitement médical, de la protection électromagnétique, des systèmes d'énergie nucléaire, etc.

#### 5. Analyse des différences dans les domaines d'application typiques

Scénario d'application	Alliages traditionnels à base de tungstène	Alliage tungstène-molybdène-nickel-fer
<b>Noyau perforant</b>	Utilisation intensive	Même application, avec une meilleure résistance aux chocs à grande vitesse

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Structure de contreponds inertiel pour l'aviation</b>	Matériaux standards	Convient aux structures de contrôle d'attitude de vol plus complexes et aux environnements à faible champ magnétique
<b>Composants du réacteur nucléaire</b>	Structure de blindage et de tampon	Peut être utilisé pour le revêtement, l'échange de chaleur et les principaux matériaux de structure
<b>Équipement de radiothérapie et poids médicaux</b>	Application locale	Système d'équilibrage de dose non magnétique et précis plus adapté à l'IRM
<b>Contrepoids pour équipement électronique/système radar</b>	Applications limitées	Les fonctions de blindage électromagnétique et de gestion thermique sont plus importantes

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer remplace progressivement les alliages traditionnels à base de tungstène et devient le matériau privilégié pour la nouvelle génération d'équipements haut de gamme. Il est particulièrement compétitif en termes d'intégration fonctionnelle, de fiabilité et de pérennité.

## VI. Résumé et perspectives

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer ont dépassé les limites d'application des alliages traditionnels à base de tungstène en termes de conception, de performances équilibrées et de fonctionnalités étendues. Grâce à un dosage rationnel et à un contrôle de la microstructure, ces alliages atteignent un équilibre optimal entre densité, résistance, maniabilité et adaptabilité environnementale, répondant ainsi aux exigences de plus en plus intégrées, multifonctionnelles et extrêmes des secteurs modernes de l'aviation, de l'énergie, de la santé et des technologies de l'information.

À l'avenir, à mesure que la demande de matériaux métalliques « à haute densité et haute fonctionnalité » augmentera, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer devraient continuer à remplacer les alliages traditionnels à base de tungstène dans les domaines suivants :

- Localisation et valorisation du matériel militaire ;
- Nouveaux matériaux pour le cœur des réacteurs à fusion et des réacteurs nucléaires spatiaux ;
- Pièces structurelles multifonctionnelles de protection électromagnétique et de blindage contre les radiations ;
- Poudres pré-alliées hautes performances pour la fabrication additive laser/plasma.

### 1.5 Évolution technologique et tendances de développement des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer au pays et à l'étranger

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer (W-Mo-Ni-Fe), composant essentiel des alliages haute densité, s'étend progressivement au-delà de ses applications militaires et de contreponds

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

traditionnelles pour couvrir un large éventail de secteurs manufacturiers haut de gamme, notamment l'aérospatiale, la protection nucléaire, la radioprotection médicale et les nouveaux équipements énergétiques. Son évolution technologique se reflète non seulement dans l'amélioration continue des ratios de matériaux et l'optimisation des performances, mais aussi dans les mises à niveau complètes des procédés de préparation, des technologies de traitement, de l'intégration fonctionnelle, des systèmes de normalisation et des approches de fabrication intelligente. L'analyse systématique suivante se concentre sur trois dimensions : les trajectoires de développement nationales et internationales, les jalons technologiques et les tendances futures.

## **1. Historique du développement de la technologie étrangère des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer**

### **1. Phase initiale (années 1950-1970)**

L'Europe et les États-Unis ont été les premiers à rechercher des alliages à base de tungstène haute densité (W-Ni-Fe) pour répondre aux exigences des projectiles perforants et des contrepoids de missiles pendant la Guerre froide. Les procédés de préparation initiaux reposaient principalement sur le compactage traditionnel des poudres par métallurgie, suivi d'un frittage en phase liquide. Le Mo n'était pas encore largement utilisé et la phase liante était souvent du Ni ou du Ni-Cu. Ces alliages présentaient des difficultés telles qu'une performance insuffisante à haute température, un magnétisme excessivement fort et une microstructure irrégulière.

### **2. Stade de maturité (des années 1980 aux années 2000)**

Du Mo a été progressivement ajouté aux alliages à base de tungstène pour former des alliages de tungstène W-Mo-Ni-Fe à moyenne et haute température, améliorant ainsi leur résistance à haute température et au fluage. Des instituts de recherche et des entreprises comme Kennametal et ALMT aux États-Unis, Plansee en Allemagne et le CEA en France ont successivement développé une série d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer faiblement magnétiques et à haute résistance, largement utilisés dans les systèmes inertiels, les composants haute température et les assemblages de réacteurs. Au cours de cette étape, l'évolution des technologies de base est la suivante :

- La teneur en Mo est contrôlée dans la plage de 2 à 10 % ;
- La technologie de dopage aux oligo-éléments (tels que Re et La) améliore la résistance aux chocs thermiques et la stabilité microstructurale ;
- Le rapport Ni/Fe de la phase liante est optimisé pour obtenir un compromis faible magnétisme/haute résistance ;
- Le pressage isostatique (CIP/HIP) est utilisé en conjonction avec le processus de traitement thermique par laminage à chaud.

### **3. Stade avancé (des années 2010 à aujourd'hui)**

Alors que des domaines tels que les moteurs d'aviation, la fusion nucléaire et l'impression 3D imposent des exigences plus élevées aux alliages multifonctionnels, les alliages étrangers tungstène-molybdène-nickel-fer évoluent vers « une organisation contrôlable, une préparation intelligente et des fonctions intégrées » :

- de nanopoudres de haute pureté (composite d'atomisation/réduction-revêtement) ;

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

- Fusion sélective par laser (SLM) + développement de pré-poudre d'alliage pour la fabrication additive ;
- Contrôle du gradient de surface et couches fonctionnelles composites (telles que couche composite tungstène-molybdène + substrat nickel-fer) ;
- Les revêtements en tungstène-molybdène amorphe sont utilisés dans les zones de résistance extrême à la corrosion ;
- Système d'alliage normalisé pour contrepoids de haute précision non magnétiques/faiblement magnétiques (ASTM B777 Classe 3 Non magnétique).

## 2. Aperçu de l'évolution de la technologie nationale des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

### 1. Phase initiale (vers 1990)

La Chine a entamé des recherches systématiques sur les alliages lourds à base de tungstène à la fin des années 1980, initialement utilisés dans les noyaux perforants pour l'aviation militaire et les masselottes de contrôle d'attitude des satellites. Les technologies initiales, largement basées sur des formules W-Ni-Fe ou W-Ni-Cu importées d'Union soviétique et d'Occident, manquaient de stabilité structurelle et de constance des performances.

### 2. Phase d'amélioration (à partir des années 2000)

Grâce aux efforts menés par l'AVIC, l'Académie chinoise d'ingénierie physique, la China National Nuclear Corporation et d'autres unités, le Mo a été progressivement introduit dans le système traditionnel W-Ni-Fe, et des alliages W-Mo-Ni-Fe produits localement avec une densité plus élevée et une meilleure stabilité thermique ont été développés.

Les résultats typiques incluent :

- Matériau de contrepoids de volant d'inertie en alliage tungstène-molybdène développé conjointement par CTIA GROUP et matériaux spéciaux AVIC ;
- Les alliages W-Mo-Ni-Fe à haute résistance et résistants aux chocs thermiques ont été utilisés avec succès dans les blocs de protection contre les rayonnements des réacteurs nucléaires ;
- Le Système industriel des sciences et technologies de la défense nationale a développé une série de nuances de matériaux tungstène-molybdène-nickel-fer résistants à la corrosion à haute température (par exemple W90Mo5Ni3Fe2) ;
- Le système de recherche scientifique de l'industrie nationale de défense et militaire a commencé à établir une base de données indépendante sur les propriétés physiques et les processus.

### 3. Phase d'intégration et de mise à niveau (2015 à aujourd'hui)

La nouvelle génération d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer produits localement privilégie une préparation écologique, une fabrication intelligente et une intégration fonctionnelle haut de gamme. Son évolution technologique est conforme aux normes internationales dominantes.

- Présynthèse de poudre de nano-tungstène + poudre d'alliage broyée à boulets à haute température ;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Intégration du pressage isostatique à chaud de poudre ;
- Revêtement laser de surface et fabrication de structures anticorrosion à gradient ;
- L'Institut de recherche sur les métaux, l'Académie chinoise des sciences, l'Institut de technologie de Harbin, l'Université du Hunan et d'autres institutions dirigent le développement de procédés de fabrication additive nationaux W-Mo-Ni-Fe ;
- Une série de clauses sur le rapport de dopage au Mo est ajoutée à la norme GB/T 38771-2020 sur les alliages de tungstène haute densité.

À l'heure actuelle, CTIA GROUP a construit un système de produits en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer relativement complet, couvrant des domaines tels que les noyaux perforants, les composants inertiels, les dispositifs de dissipation thermique, les structures de protection et les composants d'isolation électromagnétique.

### 3. Tendances du développement technologique et orientations stratégiques

#### 1. Évolution vers l'intégration composite multifonctionnelle

À l'avenir, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer ne se limiteront plus aux fonctions traditionnelles de « haute densité + propriétés mécaniques », mais mettront l'accent sur la combinaison de propriétés suivante :

- Conductivité thermique élevée + propriétés magnétiques faibles (comme les équipements IRM) ;
- Résistance à la corrosion + résistance aux radiations (comme les structures de réacteurs nucléaires spatiaux) ;
- Conducteur + absorbant les neutrons/rayons (comme une source de chaleur à faisceau d'électrons/un système de radiothérapie) ;
- Résistance + formabilité (pour l'impression 3D ou les pièces structurelles en feuille) ;

#### 2. Intégration de la préparation intelligente et de la fabrication additive

La métallurgie des poudres traditionnelle évolue vers l'intelligence et la numérisation :

- Pressage isostatique haute densité (HIP) + frittage à contrôle intelligent de la température ;
- Conception intégrée de fabrication additive (SLM, EBM) et de traitement thermique CIP ;
- Simulation numérique de microstructures (CALPHAD, simulation multi-échelles) ;
- Construction d'une plateforme de base de données intégrée processus-structure-performance ;
- Système de criblage à haut débit pour la composition des alliages (basé sur la conception de matériaux IA) ;

#### 3. Réserves matérielles stratégiques nationales et développement indépendant et contrôlable

Le tungstène et le molybdène sont des ressources rares et stratégiquement importantes en Chine. En tant que produit à haute valeur ajoutée, le développement et l'exportation des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont soumis à un contrôle politique strict. Les principales orientations futures du développement national comprennent :

- Ouvrir la chaîne complète de la poudre domestique → lingot d'alliage → composants de précision → intégration terminale ;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Atteindre l'objectif de remplacer le problème de goulot d'étranglement des alliages européens, américains et japonais dans l'industrie militaire, l'aérospatiale et l'énergie nucléaire ;
- Construire une base de données de nuances et de procédés spéciaux W-Mo-Ni-Fe conforme au « système standard avec des caractéristiques chinoises » ;
- Promouvoir les technologies vertes de préparation et de recyclage pour la nouvelle génération de matériaux, telles que la récupération de poudres d'alliages et le frittage à faible teneur en carbone.

#### IV. Résumé et perspectives

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est devenu un axe de développement clé dans le domaine actuel des alliages haute densité. Grâce à son excellente stabilité organisationnelle, sa capacité d'intégration fonctionnelle et son extrême adaptabilité aux services, il a progressivement remplacé les alliages traditionnels à base de tungstène et a servi de nombreux secteurs stratégiques tels que l'aviation, l'énergie nucléaire, les soins médicaux et l'électronique.

#### Les points clés de l'évolution future comprendront :

- La composition du matériau évolue vers un système multi-composants hautement stable et contrôlable ;
- Le processus est mis à niveau vers une préparation à faible coût, à haute densité et intelligente ;
- Les applications s'étendent vers l'intégration structurelle-fonctionnelle et le service dans des environnements extrêmes ;
- Les normes évoluent parallèlement vers l'internationalisation et la segmentation de l'industrie.

Avec l'accélération du processus de localisation et l'intégration des technologies de la chaîne industrielle, l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer deviendra l'un des piliers importants des « matériaux métalliques stratégiques à hautes performances ».

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Chapitre 2 Composition chimique et microstructure de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

### 2.1 Le rôle du tungstène, du molybdène, du nickel et du fer dans les alliages

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est un système à haute densité composé de quatre éléments principaux : le tungstène (W), le molybdène (Mo), le nickel (Ni) et le fer (Fe). Les proportions et les interactions de ces éléments dans l'alliage déterminent la microstructure du matériau, ses propriétés physiques et mécaniques, ainsi que son champ d'application. Comprendre le rôle spécifique de chaque élément dans l'alliage est crucial pour la conception, l'optimisation des performances et le contrôle des procédés.

#### 1. Le rôle du tungstène (W)

En tant qu'élément matriciel de l'alliage, le tungstène est le principal contributeur au poids et à la performance de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer. Ses principales fonctions sont les suivantes :

- , qui contribue à sa densité et à sa dureté élevées, présente une masse volumique d'environ  $19,3 \text{ g/cm}^3$ , ce qui en fait l'un des éléments les plus denses de tous les métaux industriels. Cela confère à l'alliage une densité extrêmement élevée, le rendant idéal comme contrepoids et bouclier protecteur. Sa dureté élevée et son point de fusion élevé ( $3422 \text{ °C}$ ) lui confèrent une excellente résistance à l'usure et de bonnes propriétés à haute température.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Propriétés mécaniques :**

Le tungstène a une résistance et une rigidité extrêmement élevées, formant une phase de renforcement des particules de tungstène dans l'alliage, qui supporte la majeure partie de la force externe et améliore la résistance à la traction et à la compression.

- **Stabilité du réseau**

Le point de fusion élevé du tungstène et sa structure de réseau cubique centrée sur le corps (BCC) stable offrent une bonne stabilité thermique, garantissant que l'alliage n'est pas sujet à la croissance des grains et au ramollissement dans les environnements à haute température.

## 2. Le rôle du molybdène (Mo)

En tant qu'élément d'alliage du tungstène, le molybdène est souvent ajouté aux alliages à base de tungstène par alliage, jouant les rôles clés suivants :

- **Effet de renforcement :**

le molybdène forme une solution solide dans les alliages à base de tungstène, ce qui améliore la résistance de la matrice, améliore la limite d'élasticité et la résistance au fluage de l'alliage et n'augmente pas de manière significative la densité de l'alliage.

- **Améliorer la stabilité thermique**

Le molybdène a un point de fusion élevé (2623°C) et un faible coefficient de dilatation thermique, ce qui peut inhiber la croissance des grains de tungstène à haute température et améliorer considérablement la résistance à haute température et la résistance aux chocs thermiques de l'alliage.

- **Améliorer l'uniformité organisationnelle**

Le Mo peut favoriser la densification entre les particules pendant le frittage, augmenter la densité de l'alliage, réduire les défauts de porosité et améliorer les propriétés mécaniques globales.

- **Optimisation des propriétés magnétiques :**

L'ajout de molybdène permet d'ajuster la réponse magnétique de l'alliage. En particulier, après ajustement du rapport Ni/Fe, des alliages faiblement magnétiques peuvent être préparés pour répondre à des besoins spécifiques dans les domaines de l'électronique et du médical.

## 3. Le rôle du nickel (Ni)

Le nickel est l'élément métallique de liaison clé dans les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, jouant de multiples rôles dans la liaison et le renforcement :

- **La phase de liaison formée**

par le nickel et le fer enrobe les particules de tungstène et de molybdène, assurant une bonne liaison mécanique entre les particules et réalisant une densification dans le processus de métallurgie des poudres.

- **Amélioration de la plasticité et de la ténacité des alliages**

Le nickel a une bonne ductilité et une bonne plasticité, ce qui peut améliorer considérablement la ténacité globale des alliages tungstène-molybdène, réduire le risque de fracture fragile et améliorer la ténacité à la fracture et la résistance aux chocs.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Résistance à l'oxydation et à la corrosion améliorées**  
Le nickel a une excellente résistance à la corrosion, ce qui peut améliorer la stabilité de l'alliage dans les environnements humides, acides et oxydants à haute température et prolonger sa durée de vie.
- **Ajustement des propriétés magnétiques.**  
Le nickel est un élément ferromagnétique. Sa teneur et sa proportion dans l'alliage affectent directement les caractéristiques de réponse magnétique du matériau et constituent des paramètres importants pour la conception d'alliages faiblement magnétiques ou non magnétiques.

#### 4. Le rôle du fer (Fe)

Le fer, en tant qu'autre composant majeur de la phase liante, forme généralement la matrice métallique de l'alliage avec le nickel et joue les rôles suivants :

- **Réduire les coûts et ajuster les propriétés mécaniques.**  
Le fer est relativement bon marché, et le remplacement du nickel en quantité appropriée permet de maîtriser efficacement les coûts des alliages. Parallèlement, l'ajout de fer permet d'ajuster l'équilibre entre dureté, résistance et plasticité de l'alliage.
- **Améliorer la résistance et la dureté de l'alliage**  
L'ajout de fer améliore l'effet de renforcement de la solution solide de l'alliage, augmente la résistance globale et améliore particulièrement la résistance à l'usure dans une certaine plage de température.
- **En ajustant le fer magnétique**  
à un élément magnétique puissant, sa teneur affecte les propriétés magnétiques globales de l'alliage. Combinée à la proportion de nickel, elle permet de répondre à diverses exigences de conception magnétique.
- **Favoriser le frittage et la formation de tissus**  
Le fer et le nickel favorisent ensemble la formation de phase liquide lors du frittage de l'alliage, améliorent l'effet de densification de l'alliage, réduisent les défauts et augmentent le taux de rendement.

#### 5. Effets synergétiques et impacts globaux des éléments

Les quatre éléments (tungstène, molybdène, nickel et fer) interagissent dans l'alliage pour former une matrice métallique complexe et un système de phases de renforcement. Cet effet synergétique spécifique se traduit par :

- **Optimisation de l'organisation**  
L'élément Mo agit comme un stabilisateur de renforcement et de grain, formant une microstructure uniforme et fine avec la phase liante Ni-Fe, améliorant efficacement la densité et l'uniformité de l'alliage.
- **Équilibre des performances**  
: Le rapport Ni et Fe est ajusté pour obtenir une correspondance optimale entre les propriétés magnétiques et mécaniques, répondant aux divers besoins des différents domaines en matière de magnétisme, de résistance et de ténacité.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Adaptabilité du processus**

La conception de différents rapports d'éléments rend l'alliage adapté à une variété de processus de métallurgie des poudres et de traitement thermique, tels que le pressage isostatique, le pressage isostatique à chaud, le laminage à chaud et la fabrication additive, garantissant ainsi la flexibilité du processus.

- **L'adaptabilité environnementale**

améliore la stabilité du matériau dans les environnements à haute température, à forte corrosion et à rayonnement, et élargit sa gamme d'applications.

## VI. Résumé

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer associent la densité et la résistance élevées du tungstène au renforcement et à la stabilisation thermique du molybdène, ainsi qu'à la ténacité et aux propriétés magnétiques de la phase liante nickel-fer. Ce système d'alliage hautes performances allie densité, résistance et ténacité élevées, stabilité à haute température et contrôlabilité multifonctionnelle. Une compréhension approfondie des mécanismes d'action et des interactions de ces éléments est essentielle pour faire progresser la conception et l'application industrielle de nouveaux alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

### 2.2 Rapport de composition et principes de conception de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

Les performances et les caractéristiques d'application des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dépendent largement de leur composition et de leurs principes de conception. Un ratio d'éléments raisonnable garantit non seulement d'excellentes propriétés mécaniques et physiques de l'alliage, mais détermine également son adaptabilité aux procédés, sa stabilité en environnement de service et sa rentabilité. Les paragraphes suivants détaillent le cadre de base de la conception de la composition, la plage de ratios d'éléments, les considérations de conception et les stratégies d'optimisation.

#### 1. Cadre de base de la conception des ingrédients

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est principalement composé d'une matrice de tungstène haute densité, d'un élément molybdène renforçant et d'une phase liante nickel-fer résistante. Lors de la conception de l'alliage, il est nécessaire de prendre en compte :

- **Base à haute densité et résistance** (dominée par le tungstène)
- **Performance et stabilité à haute température** (renforcé au molybdène)
- **Ténacité et propriétés de mise en œuvre** (phase liante nickel-fer)
- **Contrôle des propriétés magnétiques et de la résistance à la corrosion**

La conception des ingrédients suit le principe de l'équilibre multi-objectifs et se concentre sur le réglage fin d'un certain paramètre de performance en fonction du scénario d'application.

#### 2. Plage de proportions typiques de chaque élément

##### 1. Teneur en tungstène (W)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Plage typique : 80 % à 98 % (pourcentage pondéral)
- Les occasions de forte demande peuvent atteindre plus de 95 %
- Plus la teneur en tungstène est élevée, plus la densité et la dureté sont élevées, mais la fragilité augmente également et la plasticité diminue.

#### 2. Teneur en molybdène (Mo)

- Plage typique : 2 % à 10 %
- En tant qu'élément de renforcement de solution solide, l'augmentation de la teneur en molybdène peut améliorer considérablement la résistance à haute température et la résistance au fluage.
- Une teneur en molybdène trop élevée peut réduire la densité et affecter la densification de l'alliage.

#### 3. Teneur en nickel (Ni)

- Plage typique : 3 % à 10 %
- Le nickel est responsable de la formation d'une phase de liaison, de l'amélioration de la ténacité et de la plasticité et de l'amélioration des performances de traitement
- Un excès de nickel réduira la résistance et la résistance à la chaleur.

#### 4. Teneur en fer (Fe)

- Plage typique : 1 % à 6 %
- Le fer comme élément à coût optimisé, régulant les propriétés magnétiques et la force
- Une quantité excessive de fer augmentera les propriétés magnétiques et peut ne pas convenir aux applications nécessitant de faibles propriétés magnétiques.

### 3. Principes de conception et stratégies d'optimisation

#### 1. Conception axée sur la performance

En fonction des exigences de performance des applications spécifiques, ajustez le rapport des éléments pour atteindre l'objectif :

- **La priorité est donnée à la haute densité et à la haute résistance** : augmenter la teneur en tungstène, contrôler le molybdène à des niveaux faibles à moyens, réduire la phase liante nickel-fer mais maintenir une ténacité suffisante.
- **La résistance à la corrosion à haute température est prioritaire** : augmentez la teneur en molybdène, améliorez la stabilité thermique et ajustez l'alliage nickel-fer de manière appropriée pour améliorer la résistance à la corrosion.
- **Faibles exigences magnétiques** : Contrôler strictement la teneur en fer et modérer la teneur en nickel pour garantir que la perméabilité magnétique de l'alliage est réduite au minimum.
- **Bonne plasticité et aptitude au traitement** : augmenter de manière appropriée le rapport nickel-fer pour équilibrer la résistance et la ténacité avec l'adaptabilité du processus.

#### 2. Correspondance entre le point de fusion et la dilatation thermique de l'alliage

Le tungstène et le molybdène sont tous deux des métaux à point de fusion élevé. L'ajout de molybdène permet d'abaisser le point de fusion global de l'alliage, facilitant ainsi le contrôle des

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

processus de frittage et de traitement thermique. Parallèlement, il ajuste le coefficient de dilatation thermique aux exigences des composants en aval et réduit les contraintes thermiques.

### 3. Utilisation rationnelle des coûts et des ressources

Les prix du molybdène et du nickel sont légèrement supérieurs à ceux du tungstène, et leurs ressources sont limitées. Par conséquent, la maîtrise des coûts doit être prise en compte dès la conception :

- Réduisez raisonnablement le rapport nickel-fer pour éviter un gaspillage excessif.
- Optimiser au maximum la teneur en molybdène tout en répondant aux exigences de performance.

### 4. Conception de l'adaptabilité des processus

- La préparation de la métallurgie des poudres nécessite de garantir un mélange uniforme de la poudre, de bonnes propriétés de fluidité et de compactage, et la conception de la composition de l'alliage doit prendre en compte les propriétés de la poudre.
- Le rapport de la phase liante nickel-fer affecte la température de frittage de la phase liquide et le taux de nucléation, et doit être optimisé en conjonction avec le processus de frittage.

### 4. Exemples typiques de nuances d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Marque	Teneur en W (%)	Teneur en Mo (%)	Teneur en Ni (%)	Teneur en Fe (%)	Principales caractéristiques de performance	Domaines d'application
W90Mo5Ni3Fe2	90	5	3	2	Haute densité, haute résistance, bonne ténacité	Noyaux perforants militaires et contreponds inertiels
W85Mo8Ni4Fe3	85	8	4	3	Excellente résistance aux hautes températures et bonne résistance aux chocs thermiques	Composants de protection nucléaire
W92Mo2Ni4Fe2	92	2	4	2	Conception à faible magnétisme, adaptée aux équipements médicaux électroniques	Pièces structurales de radioprotection médicale

### 5. Tendances futures en matière de conception de composants

- **Le microalliage et le dopage multi-éléments**  
utilisent des métaux rares (Re, Ta, La) comme agents de renforcement des traces pour obtenir de plus grandes améliorations des performances.
- **La composition de conception des alliages à gradient fonctionnel**  
change progressivement dans le sens de l'épaisseur, optimisant la combinaison de la couche résistante à l'usure et de la couche de ténacité pour obtenir des performances composites.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **La conception d'alliages numériques**  
utilise la conception assistée par ordinateur (CALPHAD, apprentissage automatique) pour prédire les combinaisons de composition optimales et raccourcir les cycles de R&D.

## VI. Résumé

La composition de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer garantit une densité élevée, une résistance élevée et une bonne ténacité. L'ajustement des ratios tungstène-molybdène-nickel-fer en fonction des exigences de l'application permet d'obtenir un équilibre optimal entre performances et coût. Grâce aux progrès technologiques et à la diversification des besoins, la conception des alliages gagnera en précision et en intelligence, favorisant ainsi l'application des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer hautes performances dans un plus large éventail de domaines.

### 2.3 Microstructure et structure de phase de l'alliage W-Mo-Ni-Fe

La microstructure et la structure de phase des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont des facteurs clés pour déterminer leurs propriétés physiques et mécaniques. En manipulant la microstructure et en optimisant la structure de phase, la résistance mécanique, la ténacité, la résistance à l'usure et la stabilité à haute température de l'alliage peuvent être considérablement améliorées. Cette section détaille les caractéristiques microstructurales typiques, les principaux composants des phases et leurs schémas d'évolution des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

#### 1. Composition et caractéristiques microstructurales

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est généralement préparé par métallurgie des poudres et sa microstructure se compose principalement des éléments suivants :

- **La phase dure (riche en W et Mo)**  
est composée de tungstène et de molybdène, formant des particules métalliques dures, denses, uniformément réparties et de petite taille. Principale phase porteuse de l'alliage, elle supporte la majeure partie de la charge mécanique. L'ajout de molybdène favorise l'affinage et la répartition uniforme des particules de tungstène, inhibant ainsi efficacement le grossissement des grains.
- **La phase liante (matrice Ni-Fe),**  
formée de nickel et de fer, encapsule les particules de la phase dure, conférant à l'alliage sa ténacité et sa plasticité globales. Cette phase est généralement une solution solide à structure cubique à faces centrées (FCC) et présente une bonne ductilité.
- **L'interface entre la phase dure et la phase de liaison dans la zone d'interface est un facteur important affectant les performances de l'alliage. Une bonne liaison d'interface permet de transférer efficacement les contraintes et d'améliorer la résistance et la ténacité globales.**

#### 2. Analyse de la structure de phase

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 1. Le tungstène

et le molybdène présentent des structures réticulaires et des tailles atomiques similaires, ce qui en fait de bons candidats pour la formation d'une solution solide continue. Le molybdène, un élément de renforcement des solutions solides, se dissout dans le réseau du tungstène, améliorant ainsi sa résistance et sa stabilité à haute température. La solution solide W-Mo conserve une structure cubique centrée (BCC), garantissant une résistance mécanique et une résistance à l'usure élevées.

### 2. La phase liante à base de Ni-Fe

, une matrice nickel-fer, est principalement une solution solide cubique à faces centrées (FCC). Une teneur élevée en nickel tend à stabiliser la phase FCC, tandis qu'une teneur accrue en fer peut partiellement former une structure cubique à corps centré (BCC). Les propriétés de la phase liante déterminent la plasticité et la ténacité de l'alliage. L'ajustement du rapport Ni/Fe permet d'optimiser les propriétés magnétiques et mécaniques.

### 3. phase

de liaison, contenant une couche de transition, est généralement exempte de phase fragile, ce qui garantit la résistance de la liaison interfaciale. La densité et la continuité de la structure interfaciale jouent un rôle essentiel dans la résistance à la propagation des fissures.

## 3. Facteurs de formation et de contrôle de la microstructure

#### • Taille et distribution des poudres

La taille des particules des poudres brutes de tungstène et de molybdène affecte directement la microstructure après frittage. Les poudres fines augmentent la densité et favorisent la formation uniforme des grains.

#### • Les paramètres du procédé de frittage (

température, atmosphère et temps de maintien) déterminent la croissance des particules de phase dure et l'écoulement de la phase de liaison. Un contrôle raisonné des paramètres de frittage permet d'inhiber le grossissement des grains et d'obtenir une structure dense et uniforme.

#### • Processus de traitement thermique

Le traitement thermique peut ajuster la contrainte interne et la taille des grains de l'alliage, favoriser la liaison de l'interface et améliorer la ténacité et la résistance à la fatigue de l'alliage.

#### • dans le rapport de composition de l'alliage,

il contribue à affiner les grains de la phase dure ; le rapport nickel-fer affecte la stabilité structurelle et les propriétés mécaniques de la phase de liaison.

## 4. Techniques typiques de caractérisation de la microstructure

#### • La microscopie électronique à balayage (MEB) a été utilisée

pour observer la surface de l'alliage et la morphologie des fractures, et pour analyser la distribution et la taille des particules de la phase dure et de la phase liante.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **La microscopie électronique à transmission (MET)**  
a été utilisée pour analyser la structure atomique et les défauts de réseau de l'interface, révélant le mécanisme de renforcement de la solution solide.
- **La diffraction des rayons X (DRX)**  
a été utilisée pour déterminer la structure cristalline et la composition de chaque phase et analyser la formation de la solution solide.
- **L'analyse du spectre dispersif en énergie (EDS)**  
est utilisée pour analyser qualitativement et quantitativement la distribution des éléments dans chaque phase de la microstructure.

## 5. Influence de la microstructure sur les performances

- **résistance et dureté**  
Les fines particules de phase dure améliorent la capacité de partage de charge et améliorent la résistance et la dureté de l'alliage.
- **les phases de liaison dures et plastiques**  
empêchent efficacement la propagation des fissures et améliorent la ténacité à la rupture de l'alliage.
- **Stabilité à haute température**  
La phase dure renforcée au molybdène et la structure d'interface stable améliorent la stabilité structurelle de l'alliage à haute température et prolongent sa durée de vie.
- La microstructure avec une bonne **résistance à la corrosion et aux radiations aide à empêcher la pénétration de milieux corrosifs et la propagation des dommages causés par les radiations, garantissant ainsi l'adaptabilité environnementale du matériau.**

## VI. Résumé

La microstructure et la structure de phase des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer s'articulent autour d'une phase dure W-Mo à haute densité et d'une phase liante Ni-Fe résistante. L'optimisation des procédés de frittage et de traitement thermique permet d'affiner la phase dure et d'améliorer la liaison interfaciale, ce qui permet d'obtenir un alliage à haute résistance, à haute ténacité et à excellentes performances à haute température. À l'avenir, grâce à l'application des nanotechnologies et à des techniques de caractérisation avancées, le contrôle de la microstructure gagnera en précision, offrant ainsi une base solide pour améliorer les performances des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer et élargir leurs applications.

### 2.4 Effet du contrôle des impuretés sur les propriétés de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

En tant que matériau composite hautes performances à base de métaux lourds, les performances de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dépendent non seulement du bon rapport entre les principaux éléments et du contrôle de la microstructure, mais aussi de la teneur et de la répartition des impuretés, qui ont un impact significatif sur les propriétés mécaniques et physiques du matériau,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ainsi que sur sa durée de vie. Un contrôle efficace des impuretés est essentiel pour améliorer la qualité et la stabilité globales de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer.

## 1. Éléments d'impuretés courants et leurs sources

### 1. Oxygène (O)

- Source : Oxydation pendant le processus de pulvérisation, atmosphère de frittage impure ou adsorption pendant le traitement
- Impact : l'oxygène forme des inclusions d'oxyde, entraînant une fragilisation de l'interface et une dégradation des performances.

### 2. Carbone (C)

- Source : préparation de poudre, scories de frittage, résidus de lubrifiant, etc.
- Impact : Le carbone peut former des carbures avec le tungstène et le molybdène. En quantité appropriée, il peut renforcer la structure, mais une quantité excessive peut facilement entraîner la formation de phases cassantes.

### 3. Azote (N)

- Source : Infiltration d'azote de l'atmosphère, mauvaise étanchéité des équipements
- Impact : l'azote peut former des nitrures, modifier la dureté et la fragilité de l'alliage et affecter les performances de soudage.

### 4. Soufre (S) et phosphore (P)

- Source : Impuretés des matières premières, pollution liée au traitement
- Impact : Formation d'une phase d'impureté à bas point de fusion, induisant une fissuration fragile des joints de grains et réduisant la ténacité.

### 5. Hydrogène (H)

- Source : Décomposition de l'eau dans l'atmosphère, absorption d'hydrogène lors du frittage
- Impact : provoque une fragilisation par l'hydrogène, affectant considérablement la ténacité à la rupture de l'alliage.

## 2. Effets spécifiques des impuretés sur les propriétés des alliages

### 1. Impact des propriétés mécaniques

- Les inclusions telles que les oxydes et les sulfures se concentrent souvent aux joints de grains, devenant ainsi sources de fissures et entraînant une rupture fragile et une diminution de la ténacité. Une précipitation excessive de carbures peut entraîner une dureté et une fragilité localisées, réduisant ainsi la ductilité globale .

- **Performances en fatigue**

Les inclusions d'impuretés et les inclusions non métalliques peuvent devenir le point de départ de fissures de fatigue et réduire la durée de vie en fatigue.

### 2. Impact des propriétés physiques

- **thermoconductrices**

ont généralement une faible conductivité thermique et une teneur élevée en impuretés détruira la conductivité thermique de l'alliage.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Propriétés électriques et magnétiques**

Les impuretés telles que l'azote et le soufre ont un impact significatif sur la réponse magnétique, en particulier dans les alliages à base de fer, ce qui peut provoquer des anomalies magnétiques et affecter les applications électroniques de précision.

### 3. Impact de la stabilité chimique

- Les inclusions formées par **des éléments d'impureté résistants à la corrosion sont souvent les premiers sites de corrosion, réduisant la résistance globale à la corrosion du matériau.**

- **Performances d'oxydation à haute température :**

une teneur en oxygène trop élevée provoque la formation d'une couche d'oxyde non dense sur la surface de l'alliage, qui se décolle facilement et accélère la corrosion par oxydation.

### 3. Technologies et mesures de contrôle des impuretés

#### 1. Amélioration de la pureté des matières premières

- Sélectionnez de la poudre de tungstène-molybdène de haute pureté et de la poudre d'alliage nickel-fer de haute qualité .
- Contrôler strictement la teneur en impuretés telles que l'oxygène, le carbone et le soufre dans les matières premières.

#### 2. Technologie de traitement des poudres

- Le poudrage est réalisé sous protection de gaz inerte pour réduire l'adsorption d'oxygène et d'azote.
- Utiliser un dégazage sous vide ou un traitement de réduction à l'hydrogène pour réduire la teneur en oxygène.

#### 3. Atmosphère de frittage et optimisation du processus

- Utilisez de l'argon de haute pureté ou un frittage sous vide pour éviter l'entrée d'oxygène et d'azote.
- Contrôler la température et le temps de frittage pour réduire la précipitation excessive de carbures et de nitrures.

#### 4. Traitement de surface et transformation ultérieure

- Utilisez un environnement de traitement propre pour éviter la contamination par des impuretés étrangères.
- Le traitement thermique favorise une répartition uniforme des impuretés et réduit la concentration des contraintes.

### 4. Normes de teneur en impuretés et technologie de détection

- **Les limites standard pour**

les principaux éléments d'impureté dans les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer exigent généralement : une teneur en oxygène < 100 ppm, en carbone < 50 ppm, en soufre < 20 ppm et en azote < 50 ppm. Les normes spécifiques sont adaptées au domaine d'application.

- **Méthode de détection**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Analyseur de gaz (analyse d'oxygène et d'azote Leco)
- Analyseur de carbone et de soufre
- Microanalyse par sonde électronique (EPMA)
- Spectroscopie de fluorescence X (XRF)
- Analyse thermogravimétrique (ATG)

## 5. L'importance du contrôle des impuretés pour le développement futur des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Alors que la fabrication d'équipements haut de gamme et la technologie de défense augmentent les exigences de performance des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, le contrôle des impuretés devient un facteur important pour déterminer la limite de performance des alliages.

- **L'application de la technologie de fabrication intelligente** permettra une surveillance en ligne et un contrôle dynamique des impuretés.
- **Les nouvelles technologies d'élimination des impuretés** telles que la purification au plasma et le raffinage électrolytique amélioreront encore la pureté des matières premières.
- **La recherche théorique sur le contrôle des impuretés à plusieurs échelles** favorisera une compréhension plus approfondie de l'impact des impuretés sur la microstructure et les propriétés macroscopiques.

## VI. Résumé

Bien que les impuretés soient des traces, elles ont un impact profond sur les propriétés des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. Grâce à une stratégie systématique de contrôle des impuretés et à une gestion complète de l'ensemble du processus, de la sélection des matières premières à leur préparation, nous pouvons améliorer significativement la résistance, la ténacité, la résistance à la corrosion et la stabilité de service des matériaux, offrant ainsi une base solide pour une application généralisée des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer hautes performances.

## 2.5 Modèle de relation composition-structure-propriété de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

Les performances exceptionnelles des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer découlent de la complexité et de la sophistication de leur association composition-structure-propriétés. L'élaboration d'un modèle scientifique composition-structure-propriétés facilite la compréhension systématique du lien intrinsèque entre l'évolution microstructurale de l'alliage et son comportement mécanique macroscopique, fournissant ainsi une base théorique et des orientations pour la conception et l'optimisation des performances des alliages.

### 1. Relation composant-organisation

Le rapport de composition de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer détermine directement ses caractéristiques microstructurales, qui se manifestent spécifiquement dans :

- **Taille et distribution des particules de phase dure**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La teneur élevée en tungstène favorise une disposition dense et une croissance grossière des particules de phase dure ;
- L'ajout de molybdène est bénéfique pour le raffinement des grains de phase dure et la dispersion uniforme.
- **Modifications de la morphologie et de la composition de la phase liante**
  - Le rapport nickel/fer affecte la structure cristalline et la dureté de la phase de liaison. Plus la teneur en nickel est élevée, plus la phase de liaison est tendre et plus résistante. Plus la teneur en fer est élevée, plus la dureté augmente, mais plus la ténacité diminue.
  - La teneur en impuretés dans la phase liante affecte également la force de liaison interfaciale.
- **Structure de l'interface et épaisseur de la couche de diffusion**
  - La diffusion raisonnable des éléments et la compatibilité de l'interface déterminent la force de liaison entre la phase dure et la phase adhésive.

## 2. Relation organisation-performance

Les caractéristiques de la microstructure déterminent les propriétés mécaniques et physiques de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer :

- **Relation entre la taille des grains et la résistance**

L'effet d'affinement des grains (relation Hall-Petch) montre que la réduction de la taille des grains de la phase dure augmentera considérablement la limite d'élasticité et la résistance à la traction de l'alliage.
- **La composition et la ténacité des phases**

garantissent une bonne plasticité et une bonne ténacité à la rupture, et la force de liaison de l'interface améliore la résistance à la fatigue.
- **Défauts d'interface de phase et comportement à la rupture**

Les défauts d'interface, les inclusions et les trous deviennent la source d'initiation de fissures, affectant directement le mode de rupture et la ténacité à la rupture.
- **Rapport de phase et conductivité thermique et électrique**

Un rapport élevé de phase dure contribue à améliorer la conductivité thermique et la conductivité électrique, mais trop de phase dure entraînera une ténacité réduite.

## 3. Modèle de couplage composition-performance

La composition influence la microstructure, qui détermine à son tour les propriétés de l'alliage, formant ainsi un système couplé de composition, de structure et de propriétés. Sur cette base, l'élaboration du modèle comprend généralement :

- **Les calculs thermodynamiques (CALPHAD)**

simulent les diagrammes de phase des alliages et la formation de phases stables, et prédisent la composition des phases et les températures de transition à différentes compositions.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Le modèle cinétique**  
étudie la diffusion des éléments, la croissance des grains et la dynamique des précipitations, révélant les lois de l'évolution de la microstructure.
- **Le modèle de comportement mécanique**  
est basé sur les paramètres microstructuraux pour établir le modèle mécanique élastoplastique de l'alliage et prédire la résistance, la ténacité et la durée de vie en fatigue.
- **La simulation multi-échelle**  
couvre l'échelle atomique, la microstructure et les performances macroscopiques, en utilisant des méthodes d'éléments finis, de champ de phase et de dynamique moléculaire pour obtenir une simulation complète.

#### 4. Cas d'application typiques du modèle

- **La prédiction de l'optimisation de la composition**  
utilise des modèles informatiques pour sélectionner le rapport optimal de tungstène, de molybdène, de nickel et de fer afin de maximiser les performances combinées de résistance et de ténacité.
- **Le réglage des paramètres du processus**  
est basé sur le modèle d'évolution de la microstructure, ajustant la température et le temps de frittage pour obtenir la taille de grain et la distribution de phase idéales.
- **L'analyse des défaillances de performance**  
utilise des modèles de mécanique de la rupture pour analyser les effets des défauts microstructuraux sur la fatigue et le comportement de la rupture afin de guider le contrôle qualité.

#### 5. Défis et perspectives du développement de modèles

- **Modélisation précise de systèmes multiphasés complexes**  
Les alliages W-Mo-Ni-Fe contiennent plusieurs phases avec des interfaces complexes, et le modèle doit prendre en compte les interactions et l'hétérogénéité.
- **Les besoins en ressources informatiques des calculs couplés multi-échelles**  
nécessitent un support informatique haute performance pour obtenir un couplage efficace entre les modèles de différentes échelles.
- **Support et vérification des données expérimentales**  
Le modèle doit s'appuyer sur une grande quantité de données expérimentales précises pour l'étalonnage et la vérification afin de garantir des prédictions fiables.
- **L'intégration de l'intelligence et de l'apprentissage automatique**  
utilise la technologie de l'intelligence artificielle pour aider à l'analyse des données et à l'optimisation des modèles, améliorant ainsi l'efficacité de la conception.

#### VI. Résumé

Le modèle de relation composition-structure-propriétés est un outil essentiel pour comprendre et optimiser les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. Grâce à la construction systématique de modèles et à leur vérification expérimentale, il permet de prédire avec précision les propriétés des

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

alliages, d'orienter la conception des alliages et l'optimisation des procédés, et de fournir une base scientifique et un support technique solides pour le développement de matériaux en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer hautes performances.



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/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

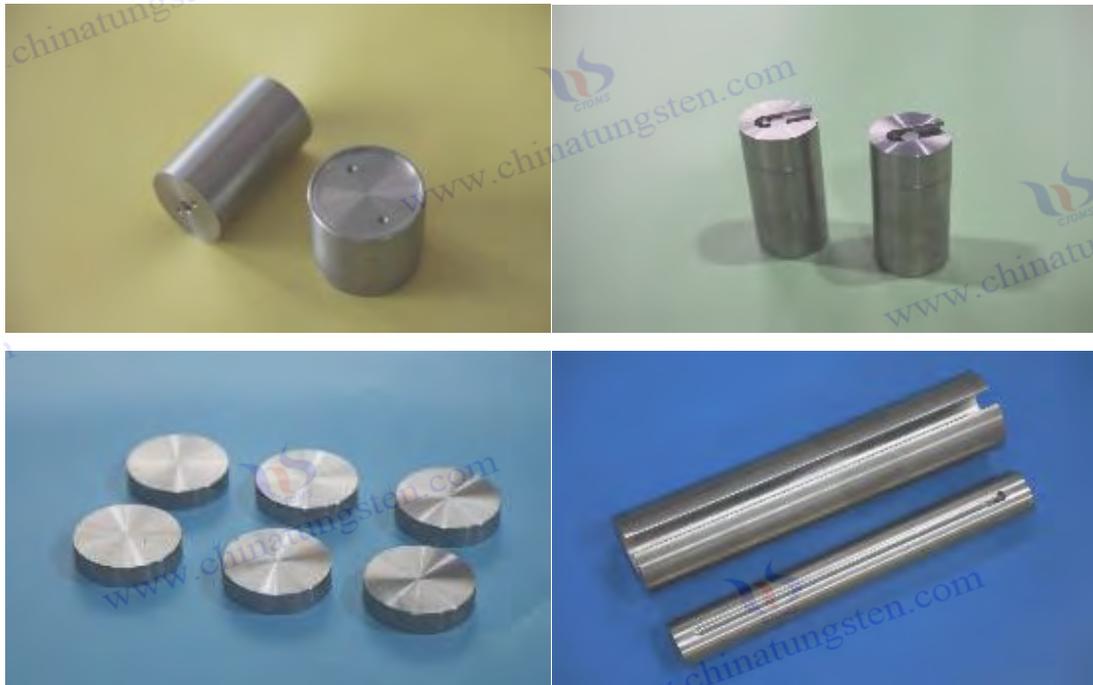
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 3 Propriétés physiques et mécaniques de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

### 3.1 Densité, gravité spécifique et précision dimensionnelle de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont largement utilisés dans les contrepoids de précision, les blindages anti-radiations haute performance et les composants structurels spécialisés en raison de leur densité élevée et de leurs excellentes propriétés mécaniques. La densité, la densité et la précision dimensionnelle sont des indicateurs clés pour évaluer la qualité et la stabilité des matériaux, et ont un impact direct sur les performances de l'alliage et la difficulté de mise en œuvre.

#### 1. Caractéristiques de densité et de gravité spécifique de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

##### 1. Définition et importance de la densité :

La densité est la masse d'un alliage par unité de volume et constitue un paramètre clé pour évaluer l'uniformité et la densification des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. Les alliages à haute densité présentent généralement une résistance mécanique et une radioprotection améliorées. Le tungstène ( $19,3 \text{ g/cm}^3$ ) et le molybdène ( $10,2 \text{ g/cm}^3$ ), métaux lourds, confèrent à l'alliage sa densité élevée. Le nickel et le fer, métaux liants de densité inférieure, déterminent collectivement la densité finale de l'alliage.

##### 2. Densité théorique et densité réelle

- La densité théorique est calculée sur la base de la moyenne pondérée de chaque composant et reflète la densité d'une structure dense idéale.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **La densité réelle** est influencée par le procédé de fabrication, notamment la porosité entre les particules de poudre et la densité frittée, ce qui entraîne une densité réelle légèrement inférieure à la valeur théorique. La densité réelle est un indicateur clé pour évaluer la qualité du frittage et de l'usinage ultérieur.

### 3. **La gravité spécifique est**

généralement mesurée à l'aide d'une méthode de déplacement de liquide (comme le déplacement d'eau) ou d'un densimètre pour garantir la précision et la répétabilité. Des mesures précises de la gravité spécifique et de la masse volumique permettent d'identifier les défauts de procédé et les défauts internes des matériaux.

### 4. **La technologie de contrôle de la densité**

améliore la densité de l'alliage et réduit la porosité grâce au contrôle de la taille des particules de poudre, à l'optimisation du processus de frittage et aux procédures de traitement thermique pour obtenir des produits en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer à haute densité et à faible défaut.

## 2. **Précision dimensionnelle et son contrôle**

### 1. **Définition et exigences de la précision dimensionnelle :**

La précision dimensionnelle désigne l'écart entre les dimensions d'un produit en alliage et les dimensions standard de conception. La forte densité des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer complique leur mise en œuvre, notamment dans les applications telles que les contrepois de haute précision et les micro-dispositifs, où les tolérances dimensionnelles doivent être rigoureusement contrôlées.

### 2. **Facteurs affectant la précision dimensionnelle**

- **Densité et uniformité du matériau** : La dilatation thermique différentielle causée par une densité inégale entraîne des changements dimensionnels.
- **Processus de formage** : Le formage par métallurgie des poudres, le retrait par frittage et les changements dimensionnels pendant le traitement thermique doivent être prédits et contrôlés avec précision.
- **Technologie d'usinage** : La précision des traitements ultérieurs tels que le meulage et le polissage affecte la stabilité dimensionnelle finale.

### 3. **La technologie de détection de précision dimensionnelle**

utilise des machines de mesure CNC (CMM) de haute précision, des machines de mesure tridimensionnelles et des scanners laser pour garantir que les dimensions répondent aux exigences de conception, en particulier la détection des pièces dimensionnelles clés.

### 4. **Les mesures d'amélioration de la stabilité dimensionnelle**

améliorent la stabilité dimensionnelle et la précision du traitement répétable grâce à l'optimisation des paramètres du processus (tels que la température de frittage et le temps de maintien), le réglage des tolérances de conception et de multiples traitements thermomécaniques.

## 3. **Influence de la densité et de la précision dimensionnelle sur les propriétés de l'alliage**

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Corrélation entre les propriétés mécaniques :**  
plus la densité est élevée et plus la porosité est faible, meilleures sont la résistance à la traction, la dureté et la durée de vie en fatigue de l'alliage. Un contrôle rigoureux de la précision dimensionnelle garantit la constance des performances des composants lors de l'assemblage et de l'utilisation.
- **Fiabilité d'utilisation**  
La haute densité et la stabilité dimensionnelle garantissent le fonctionnement stable à long terme des composants en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans des environnements à haute température, haute pression et rayonnement.

#### IV. Résumé

La masse volumique, la densité et la précision dimensionnelle des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont des indicateurs clés de la qualité et des performances des matériaux. L'optimisation des propriétés des poudres, des techniques de préparation et des procédés de transformation permet d'améliorer efficacement la masse volumique et le contrôle dimensionnel du matériau, posant ainsi les bases solides de l'application industrielle des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer hautes performances.

#### 3.2 Résistance, ductilité et ténacité à la rupture des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Grâce à leur composition et leur structure composite uniques, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer allient une résistance élevée à une ductilité modérée et présentent une excellente ténacité à la rupture, répondant ainsi aux exigences strictes des matériaux hautes performances dans des domaines tels que l'aérospatiale, l'industrie nucléaire et les machines de précision. Cette section analyse les propriétés mécaniques des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, notamment leur résistance, leur ductilité et leur ténacité à la rupture, et explore les facteurs clés influençant ces propriétés et les moyens de les améliorer.

#### 1. Caractéristiques de résistance

##### 1. Les

alliages molybdène-nickel-fer présentent généralement une résistance à la traction élevée, principalement grâce à l'effet de renforcement des phases dures tungstène et molybdène et à la ténacité de la phase liante nickel-fer. La limite d'élasticité reflète le niveau de contrainte critique auquel l'alliage commence à subir une déformation plastique et constitue un paramètre important pour la conception et l'application.

##### 2. Effet de la composition et du procédé sur la résistance

- **Rapport d'ingrédients :** Augmente la teneur en tungstène et en molybdène, augmente la proportion de phase dure et renforce la résistance de l'alliage.
- **Densité de frittage :** Plus la densité est élevée, plus la porosité est faible et plus la résistance est élevée.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Traitement thermique** : Un processus de traitement thermique raisonnable peut améliorer le raffinement du grain, améliorer la résistance de liaison de l'interface et ainsi améliorer la résistance globale.

### 3. Valeurs de résistance typiques

: Généralement, la résistance à la traction des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer peut atteindre 700 à 1 200 MPa et la limite d'élasticité est d'environ 400 à 900 MPa, selon la formule et le procédé.

## 2. Performance de ductilité (plasticité)

### 1. Définition de l'allongement :

L'allongement est la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement avant rupture par traction, généralement exprimée en pourcentage d'allongement après rupture. C'est un indicateur clé pour évaluer la ténacité et la formabilité d'un matériau.

### 2. Facteurs affectant la ductilité

- **Composition de la phase de liaison** : une teneur élevée en nickel rend la phase de liaison plus ductile et améliore la plasticité globale ; une teneur élevée en fer réduit légèrement la plasticité.
- **Taille des grains** : Le raffinement des grains peut augmenter la surface limite des grains et favoriser la déformation plastique.
- **Impuretés et défauts** : Les inclusions et les pores peuvent réduire considérablement la ductilité.

### 3. Plage d'allongement typique :

L'allongement de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est généralement de 5 % à 15 %, ce qui présente des avantages évidents par rapport aux matériaux en tungstène pur ou en molybdène pur.

## 3. Ténacité à la rupture

### 1. Définition de la ténacité à la rupture

La ténacité à la rupture reflète la capacité d'un matériau à résister à la propagation des fissures et constitue un indicateur important pour évaluer la sécurité structurelle, en particulier pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer utilisés dans des conditions de travail extrêmes.

### 2. Mode de fracture

La force de liaison de l'interface, la structure des joints de grains et le contrôle des défauts de la phase dure tungstène-molybdène et de la phase liante nickel-fer affectent directement le mode de fracture, qui peut se manifester par une fracture ductile ou une fracture fragile.

### 3. Mesures visant à améliorer la ténacité à la rupture

- Optimisez le rapport des ingrédients pour garantir que la phase de liaison soit continue et ductile.
- Affiner la granulométrie et renforcer la liaison de l'interface.
- Les impuretés et inclusions sont strictement contrôlées pour réduire l'origine des fissures.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4. L'indice de ténacité à la rupture

des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer typiques ( $K_{IC}$ ) est généralement compris entre 15 et 30  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ , et certains matériaux modifiés à haute ténacité peuvent atteindre des niveaux plus élevés.

#### 4. Optimisation complète des performances

La résistance, la ductilité et la ténacité à la rupture des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont mutuellement restrictives. Généralement, une augmentation de la résistance entraîne une diminution de la ductilité et de la ténacité. Grâce au microalliage, à la conception de nanostructures et à un traitement thermomécanique optimisé, un équilibre entre résistance et ténacité élevées peut être atteint pour répondre aux besoins de diverses applications.

#### V. Résumé

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, dotés d'une excellente résistance, d'une bonne ductilité et d'une ténacité à la rupture fiable, présentent un vaste potentiel d'application dans de nombreux domaines. Une compréhension approfondie des mécanismes sous-jacents à la formation et à la régulation de ces propriétés mécaniques est essentielle pour promouvoir le développement et l'application d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer hautes performances.

#### 3.3 Dureté, résistance à l'usure et propriétés d'impact de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer allie la dureté élevée du tungstène et du molybdène à la bonne ténacité de l'alliage nickel-fer, ce qui lui confère d'excellentes performances en termes de résistance mécanique, de résistance à l'usure et de résistance aux chocs. Cette section présente en détail la dureté, la résistance à l'usure et la ténacité aux chocs de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, et analyse les facteurs clés qui influencent ces propriétés.

#### 1. Caractéristiques de dureté

##### 1. Définition et méthodes de mesure de la dureté :

La dureté est la capacité d'un matériau à résister à une déformation plastique localisée. Elle est généralement mesurée par la dureté Vickers (HV), la dureté Rockwell (HRC) et la dureté Brinell (HB). La dureté des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer est généralement mesurée par l'essai de dureté Vickers, adapté à la mesure des structures fines.

##### 2. Facteurs affectant la dureté

- **Composition de l'alliage** : Plus la teneur en phases dures de tungstène et de molybdène est élevée, plus la dureté est élevée.
- **Densité de frittage** : la structure dense augmente la dureté et réduit la porosité.
- **Processus de traitement thermique** : Un traitement thermique approprié peut améliorer la dureté et la résistance à l'usure.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Taille des grains** : L'affinage des grains augmente le nombre de joints de grains et améliore la dureté (effet Hall-Petch).

### 3. Plage de dureté typique :

La dureté de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est généralement comprise entre HV350 et HV650. Une dureté élevée correspond à une résistance élevée à l'usure, mais peut compromettre une certaine ténacité.

## 2. Résistance à l'usure

### 1. Aperçu de la résistance à l'usure

La résistance à l'usure est la capacité d'un matériau à résister à l'usure de surface et à l'érosion par frottement mécanique, qui est directement liée à la durée de vie de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans les environnements de frottement et d'impact.

### 2. Mécanisme résistant à l'usure

- Les particules de phase dure résistent efficacement à l'usure abrasive et au grippage.
- La ténacité de la phase de liaison empêche la propagation des fissures et réduit l'écaillage et l'usure par fatigue.
- Une excellente interface de liaison réduit la perte de particules.

### 3. Méthodes pour améliorer la résistance à l'usure

- Augmenter la teneur en tungstène et en molybdène pour renforcer le réseau de phase dure.
- Le traitement thermique de surface et la technologie de revêtement (comme le revêtement PVD) améliorent la dureté de la surface.
- Le renforcement des nanoparticules améliore la résistance de la matrice et la résistance à l'usure.

### 4. Les tests de résistance à l'usure

utilisent une machine d'essai d'usure (comme un test d'usure à bille sur disque) pour mesurer le coefficient de frottement et le taux d'usure et évaluer la résistance à l'usure du matériau.

## 3. Performance d'impact

### 1. Définition de la résistance aux chocs :

la résistance aux chocs reflète la capacité d'un matériau à absorber l'énergie et à résister à la rupture sous une charge soudaine ou un impact. C'est un indicateur important pour évaluer la résistance aux chocs des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

### 2. Facteurs affectant la performance d'impact

- **Rapport de composition** : Le rapport de nickel et de fer dans la phase liante est raisonnable, ce qui peut améliorer la résistance aux chocs.
- **Microstructure** : La phase dure uniformément répartie et le réseau de phases de liaison continu améliorent la capacité d'absorption des chocs.
- **Contrôle des défauts** : Réduire les inclusions, les pores et les microfissures pour prévenir les fractures induites par les impacts.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Indicateurs typiques de ténacité aux chocs

La ténacité aux chocs des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer (exprimée en énergie d'impact Charpy absorbée) est généralement comprise entre 5 et 25 J/cm<sup>2</sup>, selon la formulation du matériau et le procédé.

### 4. Mesures de processus pour améliorer la performance d'impact

- Le processus de traitement thermomécanique est utilisé pour optimiser la structure organisationnelle.
- La technologie de nano-renforcement améliore la plasticité et la ténacité.
- Améliorez la résistance à la fatigue et à la croissance des fissures grâce au revêtement de surface et au traitement thermique.

## 4. Contrôle complet des performances

Il existe un équilibre entre la dureté, la résistance à l'usure et la résistance aux chocs des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. Une dureté élevée s'accompagne souvent d'une fragilité accrue, tandis qu'une bonne résistance aux chocs requiert un certain niveau de plasticité et de ténacité. Une conception rationnelle de la composition de l'alliage, l'optimisation du processus de préparation et l'utilisation de techniques de traitement de surface avancées permettent d'obtenir une amélioration synergique de la dureté et de la ténacité.

## V. Résumé

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, grâce à leur dureté, leur résistance à l'usure et leur résistance aux chocs exceptionnelles, sont devenus des matériaux clés irremplaçables dans de nombreux secteurs industriels haut de gamme. Une compréhension approfondie et une maîtrise efficace de leurs propriétés mécaniques faciliteront le développement d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer hautes performances, répondant aux exigences de conditions d'exploitation complexes.

## 3.4 Conductivité thermique, stabilité thermique et comportement de dilatation thermique de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont largement utilisés dans les environnements à haute température et les applications critiques de conduction thermique en raison de leurs excellentes propriétés thermophysiques. Cette section se concentre sur leurs caractéristiques de conductivité thermique, de stabilité thermique et de dilatation thermique, en analysant les mécanismes microscopiques qui influencent ces propriétés et les méthodes de contrôle des procédés.

### 1. Conductivité thermique

#### 1. Aperçu de la conductivité thermique :

Le tungstène et le molybdène sont deux métaux hautement conducteurs thermiquement, avec des conductivités thermiques d'environ 173 W/(m·K) et 138 W/(m·K) respectivement, ce qui confère à ces alliages une excellente conductivité thermique. Les alliages nickel-fer ont une conductivité thermique plus faible (inférieure à environ

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

90 W/( m·K )). Le rapport et la répartition de ces métaux influencent directement la conductivité thermique globale de l'alliage.

## 2. La conductivité thermique des alliages

est principalement obtenue par conduction électronique et par conduction vibratoire du réseau. La phase dure de tungstène et de molybdène constitue le principal canal de conduction thermique, tandis que la phase nickel-fer agit comme barrière et couche tampon. Les interfaces internes, les joints de grains et les défauts d'impuretés du matériau diffusent les électrons et les phonons, réduisant ainsi la conductivité thermique.

### 3. Facteurs affectant la conductivité thermique

- **Rapport de composition** : Plus la teneur en tungstène et en molybdène est élevée, meilleure est la conductivité thermique.
- **Densité** : La porosité est réduite, ce qui diminue la résistance thermique.
- **Microstructure** : Une phase dure uniformément répartie et une bonne liaison à l'interface favorisent le transfert de chaleur.
- **Technologie de traitement** : la température de frittage et le traitement thermique affectent la conductivité thermique grâce au contrôle de la microstructure.

### 4. Plage de conductivité thermique typique :

La conductivité thermique de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est généralement comprise entre 60 et 140 W/( m·K ), et la valeur spécifique varie en fonction du rapport et des différences de processus.

## 2. Stabilité thermique

### 1. La stabilité thermique

désigne la capacité d'un matériau à conserver des propriétés physiques, chimiques et mécaniques stables à haute température. Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer doivent présenter une bonne résistance à l'oxydation, à la fissuration thermique et une bonne stabilité structurelle à haute température.

### 2. Performances à haute température :

Les points de fusion élevés du tungstène et du molybdène (3 422 °C pour le tungstène et 2 623 °C pour le molybdène) assurent la stabilité thermique de l'alliage de base. La phase liante nickel-fer peut se ramollir ou subir une transformation de phase à haute température, ce qui affecte les performances globales.

### 3. Comportement à l'oxydation et à la corrosion :

L'oxydation à haute température est un facteur limitant important pour l'application des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. La formation et la densité du film d'oxyde sont cruciales pour les propriétés protectrices du matériau. Ils nécessitent généralement une utilisation dans des atmosphères spécifiques (vide, argon) ou des revêtements protecteurs.

### 4. Mesures visant à améliorer la stabilité thermique

- Optimiser la composition de l'alliage et contrôler le rapport nickel-fer.
- Technologie de traitement thermique de surface et de revêtement (céramique, revêtement d'oxyde).
- Le nano-renforcement et le raffinement du grain améliorent la stabilité thermique.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Comportement de dilatation thermique

#### 1. Aperçu du coefficient de dilatation thermique (CDT) :

Le coefficient de dilatation thermique est la vitesse à laquelle un matériau change de taille lorsqu'il est chauffé. Il s'agit d'un paramètre clé dans la conception de structures thermomécaniques. Les alliages tungstène-molybdène présentent généralement un faible coefficient de dilatation thermique, ce qui favorise la stabilité dimensionnelle dans les environnements à haute température.

#### 2. Effets de la composition et de l'organisation sur l'ETC

- Le coefficient de dilatation linéaire du tungstène et du molybdène est relativement faible, environ  $4,5 \sim 5,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .
- Le coefficient de dilatation thermique de l'alliage nickel-fer est relativement élevé, environ  $11 \sim 13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , ce qui affecte le CTE de l'alliage global.
- Plus la teneur en tungstène et en molybdène de l'alliage est élevée, plus le CTE est faible et meilleure est la stabilité thermique dimensionnelle.

#### 3. Adaptation et application de la dilatation thermique

Les caractéristiques CTE de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer le rendent adapté à l'adaptation de la dilatation thermique avec des matériaux tels que la céramique et les semi-conducteurs, réduisant ainsi les contraintes thermiques et améliorant la durabilité des composants.

#### 4. Méthodes techniques de contrôle de la dilatation thermique

- Le CTE peut être contrôlé avec précision en ajustant le rapport des éléments.
- Conception de nanostructures et préparation de matériaux composites pour obtenir une dilatation thermique fonctionnellement graduée.
- Un revêtement composite multicouche est utilisé pour contrôler la dilatation thermique de surface.

### IV. Évaluation globale

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer se distinguent par leurs propriétés combinées de conductivité thermique élevée, de stabilité thermique élevée et de faible dilatation thermique, répondant ainsi aux exigences strictes de performance thermophysique des secteurs de l'aérospatiale, du nucléaire et du refroidissement électronique. Grâce à la conception de leur composition et à l'optimisation de leurs procédés, leur conductivité thermique et leur stabilité thermomécanique peuvent être encore améliorées.

### V. Résumé

La conductivité thermique, la stabilité thermique et la dilatation thermique des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont essentielles à leur application dans des conditions de températures et de charges thermiques élevées. Une compréhension approfondie et un contrôle précis de ces propriétés thermophysiques constituent une base solide pour une application généralisée de cet alliage dans la fabrication de pointe et les conditions d'exploitation extrêmes.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.5 Propriétés électriques, réponse magnétique et résistance aux radiations de l'alliage W-Mo-Ni-Fe

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, grâce à leur combinaison élémentaire et à leur microstructure uniques, présentent d'excellentes propriétés électriques, une réponse magnétique ajustable et une bonne résistance aux radiations. Ils sont largement utilisés dans les appareils électroniques, l'industrie nucléaire et les environnements à champs magnétiques haute performance. L'article suivant détaille les mécanismes et les facteurs d'influence de ces propriétés.

#### 1. Propriétés électriques

##### 1. Conductivité et

résistivité : Le tungstène et le molybdène sont deux métaux hautement conducteurs. Le tungstène pur présente une conductivité d'environ  $1,79 \times 10^7$  S/m, et le molybdène, une conductivité de  $1,87 \times 10^7$  S/m. L'ajout de nickel-fer à l'alliage réduit sa conductivité globale en raison de sa faible conductivité, tandis que la résistivité augmente avec la teneur en nickel-fer.

##### 2. Effets de la composition et du procédé sur les propriétés électriques

- Le rapport élevé de tungstène à la phase dure de molybdène contribue à maintenir une conductivité électrique élevée.
- Plus la densité de frittage est élevée, plus la résistivité est faible.
- Le traitement thermique et la taille des grains affectent les chemins de migration et de diffusion des électrons, ce qui affecte à son tour la résistivité.

##### 3. Indicateurs de performance électrique typiques :

La résistivité de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est généralement comprise entre 20 et 80  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ , et la valeur spécifique dépend du rapport de composition et des conditions du processus.

#### 2. Performances de réponse magnétique

##### 1. Les métaux

confèrent aux alliages tungstène-molybdène-nickel-fer une certaine réponse magnétique. Le tungstène et le molybdène, éléments paramagnétiques, contribuent peu aux propriétés magnétiques globales.

##### 2. Contrôle des propriétés magnétiques

- Le réglage de la teneur et du rapport nickel-fer peut contrôler la perméabilité magnétique et la coercivité de l'alliage.
- La microstructure et la taille des grains de l'alliage affectent la structure du domaine magnétique et, à son tour, la réponse magnétique.
- Le processus de traitement thermique modifie l'état de contrainte interne et affecte également les propriétés magnétiques.

##### 3. Applications typiques de performances magnétiques

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont souvent utilisés dans les matériaux de blindage magnétique, les composants à haute perméabilité magnétique et les composants

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

électroniques pour répondre aux besoins d'environnements de champs magnétiques spéciaux.

### 3. Résistance aux radiations

#### 1. L'environnement radioactif affecte

l'énergie nucléaire, l'aérospatiale et la physique des hautes énergies. Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont souvent exposés à des rayonnements de forte intensité (tels que les neutrons et les rayons gamma), et ces matériaux doivent présenter une bonne tolérance aux radiations.

#### 2. Effets des rayonnements sur les matériaux

- La génération et l'accumulation de défauts structurels peuvent entraîner une fragilisation des matériaux.
- La distorsion du réseau entraîne une dégradation des propriétés physiques et mécaniques.
- Les changements chimiques induits par les radiations peuvent affecter la résistance à la corrosion.

#### 3. Mécanisme de résistance aux radiations de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

- Les points de fusion élevés et les structures en réseau denses du tungstène et du molybdène contribuent à supprimer la propagation des défauts de rayonnement.
- La ductilité de la phase liante nickel-fer atténue la croissance des microfissures induites par les rayonnements.
- La conception de l'alliage améliore la durabilité des radiations grâce à l'optimisation de la microstructure.

#### 4. Mesures visant à améliorer la résistance aux radiations

- Contrôle précis de la composition de l'alliage et de la structure du grain.
- Adopter une conception de structure de phase composite et de nano-renforcement.
- Effectuer un traitement thermique de pré-irradiation et un traitement de stabilisation appropriés.

### 4. Perspectives de performance globales

Les propriétés électriques, la réponse magnétique et la résistance aux radiations combinées des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer en font des matériaux fonctionnels idéaux pour les environnements extrêmes. Les progrès futurs dans la conception et la transformation des alliages amélioreront encore leur polyvalence et leur adaptabilité, favorisant ainsi leur application dans un plus large éventail de domaines.

### V. Résumé

Les propriétés électriques, la réponse magnétique et la résistance aux radiations des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer constituent leur principal atout dans les applications de haute technologie. Une compréhension approfondie de ces propriétés et de leurs mécanismes de régulation

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

est essentielle pour réaliser des avancées et des innovations en matière de performance des matériaux.

### 3.6 Analyse de la résistance à la corrosion et de la stabilité chimique de l'alliage W-Mo-Ni-Fe

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, en raison de leurs exigences d'application en environnements extrêmes, doivent présenter une excellente résistance à la corrosion et une excellente stabilité chimique. Cette section détaille le mécanisme de corrosion, les facteurs d'influence et les mesures techniques permettant d'améliorer la résistance à la corrosion.

#### 1. Caractéristiques de base de la résistance à la corrosion

##### 1. Types de corrosion

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer peuvent rencontrer diverses formes de corrosion dans les applications réelles, notamment la corrosion uniforme, la corrosion par piqûres, la corrosion caverneuse et la corrosion sous contrainte.

- La corrosion uniforme est principalement causée par des réactions chimiques dans des solutions acides et alcalines.
- La corrosion par piqûres et la corrosion caverneuse se produisent souvent dans des défauts microscopiques sur la surface de l'alliage ou dans les zones de soudage.
- La fissuration par corrosion sous contrainte est étroitement liée à l'état de contrainte du matériau et aux facteurs environnementaux.

##### 2. Cet alliage

présente une excellente inertie chimique, ce qui le rend particulièrement stable dans les environnements oxydants et acides à haute température. La phase liante nickel-fer est sensible aux attaques des milieux corrosifs, ce qui en fait une zone sensible à la corrosion.

#### 2. Facteurs clés affectant la résistance à la corrosion

##### 1. Rapport des ingrédients

- Plus la teneur en tungstène et en molybdène est élevée, plus la résistance à la corrosion de l'alliage est forte.
- Un rapport nickel-fer trop élevé peut réduire la résistance globale à la corrosion.

##### 2. Microstructure et densité

- La microstructure dense et uniforme aide à bloquer la pénétration des milieux corrosifs.
- Les pores, les fissures et les inclusions deviennent des points de départ de la corrosion.

##### 3. État de surface

- Une rugosité de surface élevée peut facilement induire une corrosion localisée.
- Le film d'oxyde de surface et la couche de passivation peuvent protéger efficacement le substrat.

##### 4. Facteurs environnementaux

- Les environnements acides, alcalins ou salins accéléreront le processus de corrosion.
- L'augmentation de la température augmente généralement le taux de corrosion.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Mécanisme de résistance à la corrosion

#### 1. L'effet protecteur des composants en tungstène et en molybdène :

Le tungstène et le molybdène peuvent former un film d'oxyde dense et stable sur la surface, empêchant l'oxygène et les milieux corrosifs de pénétrer à l'intérieur du métal et améliorant la stabilité chimique.

#### 2. Sensibilité à la corrosion de la phase nickel-fer

En tant que phase de liaison, le nickel-fer est plus sensible à la corrosion électrochimique que le tungstène et le molybdène. Une corrosion locale peut entraîner une dégradation des propriétés du matériau.

#### 3. Capacité de passivation et de régénération

Le film passif formé sur la surface de l'alliage a une fonction d'auto-réparation, ce qui aide à inhiber l'expansion de la corrosion.

### 4. Mesures techniques pour améliorer la résistance à la corrosion

#### 1. Optimisation de la composition des matériaux

- Augmenter la teneur en tungstène et en molybdène et réduire le rapport nickel-fer.
- Des traces d'éléments résistants à la corrosion (tels que le chrome et le titane) sont introduites pour améliorer la stabilité du film protecteur.

#### 2. Traitement thermique et modification de surface

- Améliorer la densité et l'uniformité grâce à un traitement thermique approprié.
- La surface est pulvérisée avec des revêtements résistants à la corrosion, tels que des revêtements céramiques et des revêtements PVD.
- Le traitement de passivation de surface forme un film d'oxyde stable.

#### 3. Conception structurelle et amélioration des processus de fabrication

- Réduire les défauts internes et la porosité des matériaux.
- Contrôler les processus de soudage et d'assemblage pour éviter la corrosion localisée.

### 5. Adaptation de l'environnement d'application et de la résistance à la corrosion

La résistance à la corrosion de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer le rend adapté à l'énergie nucléaire, aux équipements chimiques et aux atmosphères corrosives à haute température, mais la composition du matériau et les mesures de protection doivent être raisonnablement sélectionnées en fonction des conditions de travail spécifiques pour obtenir la meilleure durée de vie et les meilleures performances.

## VI. Résumé

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer présentent une excellente résistance à la corrosion grâce à la stabilité chimique du tungstène et du molybdène et à une conception rationnelle des matériaux. Face aux variations environnementales, la combinaison de traitements thermiques et de techniques de surface est essentielle pour améliorer leur stabilité chimique et prolonger leur durée de vie.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Chapitre 4 Technologie de préparation et de traitement de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

### 4.1 Préparation des matières premières et propriétés de la poudre d'alliage W-Mo-Ni-Fe

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer constituent une classe typique de matériaux de structure haute performance issus de la métallurgie des poudres. Leur préparation commence par la sélection de matières premières de haute qualité et un procédé scientifique de traitement des poudres. Cette section aborde de manière systématique la composition des matières premières, le contrôle des propriétés des poudres et leur impact sur le traitement ultérieur, fournissant ainsi une base théorique pour l'optimisation des propriétés des alliages.

#### 1. Composition et exigences des matières premières

##### 1. Principaux éléments métalliques

- **Poudre de tungstène (W)** : Principale phase de renforcement de l'alliage. On utilise généralement de la poudre de tungstène gris-noir de haute pureté ( $\geq 99,9\%$ ). Sa morphologie particulière peut être sphérique, dendritique ou spongieuse, ce qui influence le comportement au pressage et au frittage.
- **Poudre de molybdène (Mo)** : Pour améliorer les performances à haute température et la résistance à la corrosion, on utilise généralement de la poudre de molybdène atomisée de haute pureté ou de la poudre de molybdène par méthode de réduction.
- **Poudre de nickel (Ni)** : En tant que métal de liaison, elle contribue à améliorer la plasticité et la ductilité. La poudre de nickel réduite ou électrolytique est souvent utilisée et présente une bonne dispersibilité.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Poudre de fer (Fe)** : Améliore la résistance et la ténacité globales de l'alliage. Il s'agit généralement d'une poudre de fer de haute pureté produite par atomisation ou réduction électrolytique.
- 2. **Exigences en matière de contrôle des impuretés**
  - Les impuretés telles que le soufre (S), le phosphore (P), le carbone (C), l'oxygène (O), l'azote (N) et l'hydrogène (H), entre autres, affectent considérablement la densité de frittage et les propriétés mécaniques de l'alliage. Par conséquent, chaque poudre métallique doit respecter des exigences strictes en matière de limites d'impuretés, qu'elles soient de qualité métallurgique ou électronique.

## 2. Analyse des paramètres caractéristiques de la poudre

### 1. Distribution granulométrique

- La granulométrie de la poudre est généralement contrôlée entre 0,5 et 20  $\mu\text{m}$ . Bien que les particules fines favorisent la densification, elles présentent une faible fluidité et une teneur élevée en oxygène ; les particules grossières, quant à elles, ne favorisent ni le compactage ni le formage.
- Afin de garantir la fluidité et l'uniformité, la technologie **de dosage gradué à plusieurs étapes** est souvent utilisée pour l'optimisation.

### 2. Caractéristiques morphologiques

- Les poudres sphériques ont de bonnes propriétés de fluidité et de compactage, ce qui les rend adaptées au pressage isostatique et à la fabrication additive.
- Les poudres irrégulières (comme celles de type éponge) sont sujettes à un verrouillage mécanique et conviennent au moulage, mais il est difficile de contrôler le retrait de frittage.

### 3. Propriétés de surface

- Les paramètres de la poudre tels que la surface spécifique, l'épaisseur du film d'oxyde de surface et la mouillabilité ont une influence importante sur la liaison de frittage et la microstructure.
- Les additifs tensioactifs ou les prétraitements (par exemple, passivation, précalcination de réduction) peuvent optimiser la réactivité de la poudre.

## 3. Processus de mélange et de prétraitement des poudres

### 1. Méthodes hybrides

- Habituellement, le **broyeur à boulets**, le **mélangeur de type V**, le **mélangeur à double cône** et d'autres méthodes sont utilisés pour un mélange uniforme afin d'assurer une distribution uniforme de diverses poudres métalliques et d'éviter la ségrégation.
- **Des lubrifiants (tels que le stéarate de zinc et la paraffine)** peuvent être ajoutés pendant le processus de mélange pour améliorer l'effet de pressage et réduire l'usure du moule.

### 2. Technologie de préalliage

- Afin d'améliorer l'uniformité et l'activité de frittage de l'alliage, certaines technologies utilisent l'**alliage mécanique** ou le **co-dépôt** pour préfabriquer de la poudre pré-alliée de tungstène-molybdène-nickel-fer afin d'améliorer la capacité de liaison de l'interface.

### 3. Dégazage et séchage

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **séché sous vide ou dégazé dans une atmosphère inerte** avant formage pour éliminer l'humidité et les gaz adsorbés afin d'empêcher la formation de pores ou la précipitation d'inclusions lors du frittage ultérieur.

#### 4. Influence de la qualité de la matière première sur les propriétés de l'alliage

##### 1. Affecte la densité et le retrait de frittage

- Plus la taille des particules de poudre est fine et plus la distribution est uniforme, plus elle est propice à la formation d'un corps fritté dense.
- Plus la teneur en impuretés est élevée, plus il est facile de former une seconde phase ou des précipités aux joints de grains, réduisant ainsi les propriétés mécaniques.

##### 2. Affecte la stabilité microstructurale

- La morphologie de la poudre et la surface spécifique ont une influence importante sur le taux de diffusion de l'interface et la capacité de migration des composants, et déterminent le chemin d'évolution de la microstructure au cours du processus de frittage.

##### 3. Affecte la consistance du produit et la stabilité du lot

- Des matières premières instables entraîneront des fluctuations de performance d'un lot à l'autre, ce qui rendra difficile l'obtention de la cohérence et de la fiabilité du produit requises dans les applications haut de gamme.

#### V. Résumé

Des matières premières de haute qualité, à base de tungstène, de molybdène, de nickel et de fer, sont essentielles pour atteindre les performances souhaitées des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. En optimisant la granulométrie de la poudre, en contrôlant les niveaux d'impuretés et en améliorant les procédés de mélange et de prétraitement, nous pouvons améliorer efficacement la densité de formage, l'uniformité du frittage et les performances finales. Une gestion rigoureuse des matières premières est une étape cruciale de l'ensemble du processus de préparation des alliages.

#### 4.2 Technologie de compression et de formage par métallurgie des poudres d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont généralement produits par métallurgie des poudres en raison de leur point de fusion élevé, de leur densité élevée et de leur composition multi-éléments complexe. Le pressage et le formage sont des étapes clés qui influencent la précision de la forme, la densité et les propriétés mécaniques du matériau fini. Cette section se concentre sur les techniques courantes de pressage des poudres, notamment le moulage par compression, le pressage isostatique à froid (CIP), le pressage isostatique à chaud (CIC) et les nouvelles technologies de formage, en analysant leurs principes, leurs étapes clés et leurs domaines d'application.

##### 1. Pressage uniaxial

###### 1. Le principe de base du

moulage par compression consiste à utiliser un moule rigide pour appliquer une pression uniaxiale ou biaxiale afin de compacter la poudre libre et d'obtenir un « corps vert »

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

présentant une forme et une résistance spécifiques. Cette méthode convient aux produits de formes régulières et de petites et moyennes dimensions.

## 2. Caractéristiques principales

- Le procédé est simple, efficace et adapté à la production de masse.
- Il existe un gradient de densité verte le long de la direction de pression, la densité dans la zone centrale étant relativement faible.
- Il est facile de former des fissures ou un délaminage, et la vitesse de remplissage et de pressage de la poudre doit être contrôlée avec précision.

## 3. Points clés du contrôle des processus

- Concevez raisonnablement la structure du moule et l'angle de démoulage pour éviter les fissures après le pressage.
- Les lubrifiants sont utilisés pour réduire la friction du moule et améliorer l'uniformité de la densité.
- La pression de compactage optimale se situe généralement entre 150 et 600 MPa, en fonction de la fluidité de la poudre et de la taille de la cible.

## 2. Pressage isostatique à froid (NEP)

### 1. Principe de base

Le CIP utilise un milieu liquide (tel que de l'huile ou de l'eau) pour appliquer une pression isotrope à la poudre dans le moule en caoutchouc, obtenant ainsi un effet de pressage à haute densité et isotrope uniforme.

### 2. Avantages

- La densité du compact est uniforme et il n'y a presque aucune différence directionnelle.
- Des pièces aux formes complexes ou de grandes tailles peuvent être fabriquées.
- Il convient à la production de pièces structurelles qui sont ensuite usinées après frittage.

### 3. Paramètres clés

- La plage de pression couramment utilisée est de 100 à 400 MPa.
- Le temps de pressage est généralement de 1 à 5 minutes, selon le volume du moule et le type de poudre.
- La densité verte peut atteindre 65% à 75% de la densité théorique.

### 4. Considérations relatives au processus

- La conception du moule doit avoir une bonne résistance à la pression et des performances d'étanchéité.
- L'inclusion d'air ou la stratification de la poudre doit être évitée pendant le processus de pressage.

## 3. Pressage isostatique à chaud (HIP)

### 1. Principe technique :

le HIP est un procédé de pressage isotrope réalisé à haute température (1 000 à 1 400 °C) et haute pression (100 à 200 MPa). La poudre est frittée en phase solide et densifiée sous l'action du pressage à chaud.

### 2. Avantages du processus

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Des produits avec une densité proche de la densité théorique (> 98%) peuvent être obtenus.
- Réduisez la porosité résiduelle et améliorez la résistance à haute température et la ténacité à la rupture.
- Convient à la fabrication de précision de pièces structurales hautes performances, de composants nucléaires et de composants aéronautiques.

### 3. Inconvénients et défis

- Le coût est élevé et l'investissement en équipement est important.
- Les exigences en matière de moules sont très strictes et des récipients scellés en verre, en acier ou en graphite sont souvent utilisés.

## 4. Moulage par injection de poudre (PIM)

### 1. Présentation technique :

le PIM est une technologie de formage quasi-définitif, adaptée aux petites pièces aux formes complexes. Des poudres de tungstène, de molybdène, de nickel et de fer sont mélangées à des liants thermoplastiques et injectées dans la cavité du moule par une presse à injecter pour former les pièces.

### 2. Champ d'application

- Composants électroniques, petites pièces structurales, pièces de dispositifs médicaux, etc.
- Convient à la production automatisée de masse à haute efficacité.

### 3. Points de contrôle critiques

- Le processus de retrait de l'adhésif doit être lent et uniforme pour éviter les fissures.
- Les paramètres d'injection (température, pression) doivent correspondre aux propriétés rhéologiques de la poudre.

## 5. Technologies de formage émergentes telles que le moulage en gel et l'impression 3D

### 1. Le moulage en gel

consiste à mélanger une solution avec une poudre pour former une barbotine gélatineuse, qui est ensuite injectée dans un moule et solidifiée. Cette barbotine est ensuite séchée et frittée pour créer une structure dense. Ses avantages incluent la possibilité de produire des formes complexes avec un minimum de cavités de retrait.

### 2. La fabrication additive (impression 3D),

y compris le frittage sélectif par laser (SLS) et le formage par pulvérisation de métal (MJM), peut produire directement des pièces complexes sans avoir besoin de moules, mais les problèmes de haute densité et de liaison d'interface doivent encore être résolus.

## VI. Résumé

La technologie de formage des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer a évolué, passant du pressage traditionnel à l'emboutissage vers diverses méthodes, notamment le CIP à haute uniformité, le CIP de densification et le moulage par injection quasi-définitif. Le choix de la méthode de formage nécessite une prise en compte complète de la taille du produit, des exigences de performance, du coût et de l'adaptabilité du procédé. La qualité du formage a un impact direct sur

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

les performances globales de l'alliage lors du frittage, du traitement thermique et de l'application ultérieurs.

#### 4.3 Processus de frittage et contrôle de la densification de l'alliage W-Mo-Ni-Fe

Le frittage est une étape essentielle de la préparation par métallurgie des poudres des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. Sa qualité détermine directement la densité, les propriétés mécaniques, la microstructure et la durée de vie de l'alliage. Le tungstène et le molybdène, métaux réfractaires, présentent des températures de frittage élevées et des vitesses de diffusion lentes, tandis que le nickel et le fer agissent comme phases de frittage et de liaison en phase liquide. Cette section explique de manière systématique le mécanisme de frittage, les principaux paramètres du procédé et les stratégies de densification des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, et explore l'évolution de la microstructure et les mécanismes de contrôle des propriétés sous différentes atmosphères.

##### 1. Mécanisme de frittage de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

Le tungstène et le molybdène, en raison de leurs points de fusion élevés (respectivement 3 410 °C et 2 620 °C), sont principalement frittés par **diffusion en phase solide** ; le nickel et le fer, en revanche, ont des points de fusion plus bas et peuvent former une phase liquide, notamment dans une certaine proportion, ce qui favorise le mouillage, la diffusion et le réarrangement de l'interface de poudre, permettant ainsi le frittage en phase liquide (LPS).

Le procédé de frittage peut être divisé en :

1. **Étape de pré-combustion (500~900°C)**
  - Élimine les lubrifiants, les liants, l'humidité et les gaz adsorbés des poudres.
  - Le col de frittage initial est formé et les pores existent toujours.
2. **Étape de diffusion en phase solide (1000~1300°C)**
  - La croissance initiale du col de frittage se produit entre les particules de poudre de tungstène et de molybdène, et la densité augmente lentement.
  - Au cours de cette étape, la structure organisationnelle commence à se stabiliser.
3. **Étape de frittage assisté par phase liquide (1300~1500°C)**
  - Le fer nickel commence à fondre localement pour former une phase liquide, remplissant les pores et augmentant la densité.
  - La phase liquide aide les particules à se réorganiser, favorise la diffusion des éléments et réduit la température de frittage.
4. **Étape d'homogénéisation (isolation haute température)**
  - Les éléments se diffusent davantage, le tissu s'homogénéise et les pores se rétrécissent ou se ferment davantage.

##### 2. Contrôle de l'atmosphère de frittage

L'atmosphère de frittage a une influence déterminante sur les réactions intermétalliques, le comportement redox et la formation d'impuretés. Parmi les atmosphères courantes, on trouve :

1. **Atmosphère d'hydrogène (H<sub>2</sub>)**
  - Forte propriété réductrice, aide à éliminer les oxydes sur la surface de la poudre.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Il peut empêcher l'oxydation du tungstène et faciliter la densification par frittage.
  - Le taux d'humidité doit être strictement contrôlé ( $< -60^{\circ}\text{C}$  point de rosée) pour éviter la réoxydation.
- 2. Argon ( Ar ) ou mélange argon-hydrogène**
    - Atmosphère protectrice inerte, adaptée aux systèmes multiphasés au tungstène, au molybdène, au nickel et au fer.
    - L'équilibre entre réduction et protection peut être ajusté en fonction de la composition du matériau.
  - 3. Frittage sous vide**
    - La prévention de toute interférence atmosphérique favorise la formation d'une interface de frittage pure.
    - Convient aux matériaux en tungstène et en molybdène de haute pureté, mais avec une consommation d'énergie élevée et des coûts d'équipement élevés.

### 3. Contrôle des paramètres de frittage

- 1. Contrôle de la température**
  - Plage de température de frittage courante :  $1350^{\circ}\text{C} \sim 1550^{\circ}\text{C}$ .
  - Si le frittage assisté par phase liquide est utilisé, la température peut être abaissée de manière appropriée à  $1250^{\circ}\text{C} \sim 1350^{\circ}\text{C}$ .
- 2. Taux de chauffage**
  - Un chauffage trop rapide entraînera une surface dense et des pores intérieurs fermés, formant un défaut « dense à l'extérieur et lâche à l'intérieur ».
  - Il est recommandé d'augmenter la température progressivement : contrôle de la température par étapes + mesures d'isolation.
- 3. Temps de maintien**
  - En général, cela prend 1 à 3 heures, selon la taille de la pièce, l'atmosphère et le matériau.
  - Aide à favoriser une diffusion uniforme et une stabilisation microstructurale.
- 4. Méthode de refroidissement**
  - Le refroidissement contrôlé est généralement utilisé pour éviter les contraintes thermiques ou les fissures causées par des chutes soudaines de température.

### 4. Stratégie de contrôle de la densification

- 1. Optimiser la taille des particules de poudre et l'uniformité du mélange**
  - Utilisez un système de mélange de poudre gradué pour augmenter la densité apparente.
  - Une combinaison raisonnable de tailles de particules de poudre peut réduire le retrait de frittage et améliorer la densité.
- 2. Ajouter une petite quantité d'aide au frittage ou d'élément favorisant la phase liquide**
  - L'ajout d'une quantité appropriée de Ni-Fe peut favoriser le frittage en phase liquide, mais un ajout excessif doit être évité pour éviter la ségrégation structurelle.
  - Des éléments tels que Cr et Co peuvent également améliorer la mouillabilité du frittage et l'uniformité organisationnelle.
- 3. Frittage en deux étapes**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Effectuez d'abord une pré cuisson à basse température et une cuisson principale à haute température pour améliorer l'efficacité du frittage et le contrôle de la densité.
4. **Post-traitement : pressage isostatique à chaud (HIP)**
- Après le frittage, le HIP est utilisé pour éliminer davantage les pores résiduels, ce qui permet d'obtenir des produits en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer avec une densité proche de la densité théorique (> 99,5 %).

#### 5. Caractéristiques de l'évolution microstructurale

- Au cours du processus de frittage en phase liquide, les grains de tungstène et de molybdène sont sujets au réarrangement et à la recristallisation, et la croissance des grains doit être contrôlée.
- La phase nickel-fer pénètre entre les particules de tungstène-molybdène pour former une bonne interface de liaison.
- Si la température n'est pas correctement contrôlée, des défauts tels qu'une structure poreuse, une stratification et une ségrégation d'éléments peuvent se produire.

### VI. Résumé

Le frittage est un facteur clé pour déterminer la densité, la résistance et l'uniformité structurelle des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. Un contrôle rationnel de la température de frittage, de l'atmosphère, du régime d'isolation et du mécanisme de frittage en phase liquide favorise efficacement la liaison par diffusion et la densification au sein du matériau, maximisant ainsi les effets synergétiques de renforcement de chaque composant. Associé à un pressage isostatique à chaud ou à un traitement thermique de surface ultérieur, il permet d'améliorer encore la stabilité à haute température et la durée de vie du matériau.

#### 4.4 Traitement thermique et contrôle de la microstructure de l'alliage W-Mo-Ni-Fe

Les performances des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dépendent non seulement de leur composition et de la qualité du frittage, mais aussi du traitement thermique ultérieur. Un traitement thermique adapté permet d'optimiser la structure des grains, d'éliminer les contraintes internes, de favoriser une diffusion uniforme des éléments et de renforcer la liaison interphase, améliorant ainsi les propriétés mécaniques et la stabilité de service du matériau. Cette section se concentre sur les techniques de traitement thermique, les mécanismes d'évolution de la microstructure et les stratégies de contrôle de la microstructure des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, afin d'établir une corrélation systématique entre les paramètres de traitement thermique et les propriétés du matériau.

#### 1. Objectif et fonction de base du traitement thermique

- Élimine les contraintes résiduelles et les écarts de texture formés lors du frittage ;
- Optimiser la taille des grains et la distribution des limites de phase pour inhiber le grossissement des grains ;
- Renforcer la liaison d'interface entre la phase de solution solide et la phase de liaison ;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Favoriser une diffusion plus poussée des éléments d'alliage et améliorer l'uniformité organisationnelle ;
- Améliorer la plasticité, la ténacité, la résistance aux fissures et la résistance à la fatigue.

## 2. Technologies courantes de traitement thermique et leurs principes

### 1. Traitement par solution

- **Plage de température applicable** : généralement 1100°C~1350°C ;
- **Principe de traitement** : Grâce à une conservation thermique à long terme à haute température, les éléments nickel et fer de l'alliage sont entièrement dissous dans le squelette tungstène-molybdène, favorisant l'expansion de la zone de transition de l'interface de phase ;
- **Effet** : Améliore la ténacité du matériau, améliore la continuité et l'uniformité de la phase de liaison et réduit la source d'initiation des microfissures.

### 2. Traitement du vieillissement

- **Plage de température applicable** : 600°C~900°C ;
- **Principe et objectif** : Favoriser la précipitation de certains éléments de solutions solides sursaturées pour former des phases renforçant la dispersion (telles que Ni<sub>3</sub>Fe, FeMo, etc.), améliorant ainsi la limite d'élasticité et la résistance à la fatigue de l'alliage ;
- **Remarque** : Le temps de vieillissement et la température doivent être contrôlés pour éviter que des précipités grossiers ne détruisent la ténacité.

### 3. Pressage isostatique à chaud (HIP)

- **Paramètres typiques** : température 1200°C ~ 1400°C, pression 100200 MPa ;
- **Fonction** : La densification est réalisée simultanément pendant le processus de traitement thermique pour éliminer davantage les pores et les microfissures ;
- **Champ d'application** : pièces en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer haut de gamme, telles que les composants de l'industrie nucléaire et les pièces structurelles aérospatiales.

### 4. Recuit rapide

- **Convient aux plaques minces et aux petites pièces**, utilisant une méthode de chauffage rapide + refroidissement rapide pour stabiliser la structure ;
- **Avantages** : inhibe le grossissement des grains, maintient la structure fine et améliore la résistance et la durée de vie en fatigue.

## 3. Mécanisme d'évolution de la microstructure au cours du traitement thermique

### 1. Modifications de la morphologie des grains

- Le traitement thermique peut favoriser la recristallisation des grains et éliminer les grains non équiaxes restants du frittage ;
- Le contrôle de la température et de la durée du traitement thermique peut former de fins cristaux équiaxes, ce qui contribue à améliorer l'uniformité et la résistance aux fissures.

### 2. Effet de renforcement de l'interface

- Au cours du processus de traitement thermique, les éléments nickel et fer se diffusent à l'interface des particules de tungstène et de molybdène, formant une couche de transition avec une énergie de liaison élevée et améliorant la force de liaison de l'interface.

### 3. Régulation du comportement de séparation

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Lors du traitement de vieillissement, la précipitation de composés intermétalliques fins permet de fixer les dislocations et d'améliorer la résistance du matériau ;
- Si la phase précipitée est trop grande ou inégalement répartie, elle peut facilement provoquer une rupture par fracture fragile.

#### 4. Soulagement des contraintes résiduelles

- Le traitement thermique peut libérer les contraintes internes causées par le frittage, le pressage ou le traitement, et empêcher la propagation des fissures lors d'une utilisation ultérieure.

### 4. Stratégie de régulation de la microstructure

#### 1. Conception d'un système de traitement thermique à plusieurs étapes

- Par exemple, la combinaison « solution à haute température + vieillissement à température moyenne » peut prendre en compte à la fois la plasticité et la résistance ;
- « Le prétraitement à basse température + l'homogénéisation à haute température » aident à diffuser complètement les éléments et à purifier les joints de grains.

#### 2. Approche de raffinement du grain

- Ajout d'éléments de renforcement à grains fins (tels que Re, Ta, etc.) ou contrôle de la température et du temps pour inhiber la croissance par recristallisation ;
- La congélation des tissus est obtenue par refroidissement rapide local, préservant les structures à l'échelle nanométrique ou submicronique.

#### 3. Construction de la couche de transition d'interface

- En ajustant l'atmosphère de traitement thermique (par exemple en contenant des traces de C ou de N), une couche d'interdiffusion stable est induite dans la zone d'interface pour améliorer la liaison.

### 5. Équipement de traitement thermique et contrôle des paramètres du processus

- **Type d'équipement** : principalement four de traitement thermique sous vide, four de protection à l'hydrogène, four à boîte de contrôle d'atmosphère, dispositif HIP, etc.
- **Points de contrôle du processus** :
  - Uniformité de température (fluctuation  $< \pm 5^{\circ}\text{C}$ ) ;
  - Taux de chauffage et de refroidissement (pour éviter les chocs thermiques) ;
  - Pureté de l'atmosphère (par exemple point de rosée de l'hydrogène  $< -60^{\circ}\text{C}$ ) ;
  - Temps de maintien du traitement thermique (doit correspondre à l'épaisseur et à la taille).

### Conclusion :

Le traitement thermique des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer est plus qu'un simple processus de recuit ou de renforcement ; il implique un processus d'optimisation microstructurale intégrant la physique des matériaux, la thermodynamique et la théorie des diagrammes de phases. Un contrôle précis du parcours de traitement thermique et de l'évolution microstructurale maximise le potentiel de l'alliage, permettant d'obtenir une combinaison unique de densité élevée, de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance élevée et de stabilité élevée. La technologie du traitement thermique évolue également vers des approches intelligentes, contrôlables et respectueuses de l'environnement.

#### 4.5 Usinage et traitement de surface de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer présentent de nombreux défis en matière d'usinage et de traitement de surface en raison de leur forte densité, de leur dureté élevée, de leur point de fusion élevé et de leur structure multiphasée complexe. Cependant, l'optimisation des paramètres de procédé, le choix d'équipements et d'outils appropriés et l'utilisation de technologies de traitement de surface avancées permettent d'obtenir un usinage de haute précision et de haute qualité, ainsi que des fonctionnalités améliorées. Cette section aborde de manière systématique les principales approches techniques et stratégies d'application, allant de la découpe et du meulage à la trempe superficielle et aux traitements de revêtement.

##### 1. Caractéristiques d'usinage de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer combine le point de fusion élevé et les caractéristiques de résistance élevée du tungstène et du molybdène avec la plasticité et l'usinabilité modérées de la phase de liaison nickel-fer, présentant les caractéristiques de traitement suivantes :

- **Dureté et fragilité élevées** : les phases de tungstène et de molybdène conduisent à une résistance élevée à la coupe du matériau et sont sujettes à l'effondrement des bords et à la fissuration ;
- **conductivité thermique** : Beaucoup de chaleur est générée pendant le traitement et l'outil s'use facilement ;
- **Le phénomène de collage de l'outil est évident** : le fer nickel se fixe facilement à l'outil lorsqu'il rencontre de la chaleur, affectant la qualité de la surface traitée ;
- **Hétérogénéité tissulaire** : La microstructure multiphasique conduit à des réponses de traitement différentielles et nécessite un contrôle précis.

##### 2. Cheminement du processus d'usinage

###### 1. Tourner

- Convient pour le traitement primaire et fin des barres et des tubes ;
- Il est recommandé d'utiliser **des outils en carbure (série WC-Co)**, et le revêtement peut être TiAlN, AlCrN, etc.
- Les paramètres de coupe doivent être **une vitesse moyenne à faible (Vc = 40-80 m/min), une faible vitesse d'avance et une profondeur de coupe modérée** ;
- Un liquide de refroidissement à base d'huile ou un système de refroidissement à haute pression est recommandé comme liquide de refroidissement.

###### 2. Fraisage

- Utilisé pour former des structures géométriques complexes ou pour le traitement des contours ;
- Le nombre de dents de l'outil et le chemin de coupe doivent être contrôlés pour éviter l'effondrement des bords du matériau ;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Il est recommandé d'utiliser une fraise en bout ou une fraise à nez rond, et un angle d'inclinaison modéré peut réduire la charge d'impact.

### 3. Broyage

- C'est le plus couramment utilisé **procédé de traitement de haute finition pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer** ;
- Il est recommandé d'utiliser des meules CBN (nitride de bore cubique) ou diamantées ;
- Le meulage humide et le meulage fin peuvent améliorer considérablement la finition de surface ( $Ra < 0,2 \mu m$ ) ;
- Il est nécessaire d'éviter les fissures thermiques et les brûlures et de contrôler la température et le débit du fluide de coupe.

### 4. Perçage, taraudage et rainurage

- L'opération est difficile, il est donc recommandé d'utiliser une perceuse spéciale avec une conception de rainure à copeaux ;
- Lors du taraudage, pensez à utiliser des tarauds à formage à froid pour éviter les fissures du filetage ;
- Pour les plaques minces ou les pièces à parois minces, des supports doivent être utilisés pour éviter les vibrations et les déformations.

## 3. Technologie et application du traitement de surface

Afin d'améliorer la résistance à la corrosion, la résistance à l'usure, la résistance à la fatigue et la fonctionnalité de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, les méthodes de traitement de surface suivantes sont souvent utilisées :

### 1. Polissage de surface (polissage mécanique/électrolytique)

- Le polissage mécanique peut être utilisé pour éliminer les marques de traitement et améliorer la finition ;
- Le polissage électrolytique convient aux pièces de précision et peut réduire les microfissures et la concentration des contraintes de surface.

### 2. Traitement de décapage et de passivation

- Utilisez un mélange dilué d'acide nitrique/acide fluorhydrique pour décaper la surface afin d'éliminer le tartre et les microparticules ;
- Des traitements de passivation ultérieurs tels que la chromatisation peuvent aider à améliorer la résistance à la corrosion.

### 3. Revêtement de surface (PVD/CVD)

- **PVD (Physical Vapor Deposition)** : tels que les revêtements TiN, CrN et TiAlN pour améliorer la résistance à l'usure et les performances de frottement ;
- **CVD (Chemical Vapor Deposition)** : Forme une couche de film céramique très dense et hautement adhésive.

### 4. Revêtement laser et implantation ionique

- Un laser à haute énergie est utilisé pour faire fondre le matériau de revêtement afin de former une couche de liaison métallurgique avec le substrat en tungstène-molybdène-nickel-fer ;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- L'implantation ionique peut améliorer la dureté de surface, la conductivité électrique ou la résistance à la corrosion des composants utilisés dans des environnements extrêmes.

#### 5. Traitement thermique de modification de surface

- Un traitement thermique local (tel que le chauffage par induction) peut améliorer la dureté et la résistance à la fatigue des zones locales ;
- La technologie de modification de surface au plasma présente les avantages d'une faible déformation et d'une faible pollution, et convient aux composants de haute précision.

#### 4. Types de défauts de traitement et mesures de contrôle

Type de défaut	Analyse des causes	Mesures de contrôle
Écaillage d'outils	Force de coupe élevée et vitesse d'avance excessive	Réduisez la vitesse de coupe et utilisez des outils résistants à l'usure
Rayures/piqûres de surface	Le liquide de coupe n'est pas propre et la meule est obstruée	Remplacer la meule et renforcer le système de filtration
Fissures et brûlures thermiques	Accumulation de chaleur de broyage et refroidissement insuffisant	Refroidissement amélioré et broyage humide
Propagation de microfissures	Micro-défauts à l'interface des structures multiphasées	Traitement thermique pour optimiser la liaison des interfaces et ajouter des éléments de micro-alliage
décollement du revêtement	Adhérence insuffisante ou préparation de surface insuffisante	Prétraitement de surface (sablage, décapage), sélection du système de revêtement approprié

#### 5. Tendances en matière de numérisation et d'automatisation des technologies de traitement

- Utilisez un centre d'usinage CNC pour un contrôle de trajectoire de coupe de haute précision ;
- Utiliser un logiciel de simulation d'usinage pour pré-évaluer les paramètres du processus et prédire les défauts ;
- Des robots industriels et des systèmes de surveillance en temps réel sont introduits dans certains processus de fabrication haut de gamme pour améliorer la stabilité et la cohérence du traitement ;
- Mettre en place un mécanisme de surveillance en ligne de l'usure des outils pour obtenir un contrôle de rétroaction en boucle fermée de la qualité du traitement.

## VI. Résumé

Bien que l'usinage et le traitement de surface de haute précision des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer présentent des défis, une combinaison d'outils adaptés, d'optimisation des procédés et de techniques de modification de surface permet d'obtenir une intégration fonctionnelle, des performances améliorées et une durée de vie prolongée. Grâce aux progrès de la technologie CNC, de l'ingénierie de surface et des méthodes d'usinage automatisé, l'usinabilité et l'adaptabilité des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer continueront de progresser, répondant ainsi aux exigences

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'applications toujours plus exigeantes dans les domaines de l'énergie nucléaire, de l'aéronautique et de la médecine.

#### 4.6 Fabrication additive et méthodes de formage avancées des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer (W-Mo-Ni-Fe) sont largement utilisés dans des secteurs haut de gamme tels que l'industrie nucléaire, l'aérospatiale, l'armée et la médecine, en raison de leur densité élevée, de leur point de fusion élevé, de leur grande résistance et de leur excellente résistance aux radiations. Cependant, les méthodes traditionnelles de formage par métallurgie des poudres, telles que le moulage, le pressage isostatique et le frittage, présentent des limites pour la production de structures complexes ou de pièces de haute précision. Avec l'essor de la fabrication additive (FA) et des technologies de formage avancées, les méthodes de préparation des alliages W-Mo-Ni-Fe évoluent vers une efficacité accrue, une plus grande précision et des fonctions plus complexes.

Cette section abordera systématiquement l'état de développement, les technologies de processus clés, les défis de formation et les tendances futures des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans le domaine de la fabrication additive.

### 1. Analyse de faisabilité d'un alliage tungstène-molybdène-nickel-fer pour la fabrication additive

La poudre d'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer présente les propriétés typiques suivantes, ce qui la rend adaptée aux applications de fabrication additive :

- Les poudres sphériques à haute densité peuvent être préparées par atomisation et conviennent à la fusion sur lit de poudre par faisceau laser/électrons ;
- L'alliage présente une certaine plasticité et peut obtenir une structure continue et dense après fusion ;
- La régulation des tissus et la libération du stress peuvent être obtenues par traitement thermique ;
- Il convient à la fabrication de pièces complexes telles que des pièces creuses de forme spéciale et des pièces avec des structures de refroidissement.

Cependant, des défis se posent :

- Les points de fusion élevés (W 3420°C, Mo 2620°C) entraînent des besoins énergétiques très élevés ;
- Les points de fusion des différents éléments varient considérablement, ce qui peut facilement conduire à une ségrégation et à des microfissures ;
- La concentration de contraintes pendant le processus de formage peut provoquer des fissures ou des trous.

## 2. Technologie de fabrication additive pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

### 1. Fusion laser sur lit de poudre (LPBF)

- **Points techniques :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Utiliser un laser haute puissance pour faire fondre la couche de poudre point par point ;
- Le chemin de balayage doit être optimisé pour réduire les gradients thermiques ;
- **Poudre applicable** : poudre sphérique W-Mo-Ni-Fe de 20 à 45  $\mu\text{m}$  produite par atomisation ;
- **Caractéristiques de formage** : haute précision de formage ( $\leq \pm 50 \mu\text{m}$ ), adaptée à la fabrication de structures géométriques complexes ;
- **Défi** : Sujet aux fissures, aux déformations et à la séparation des éléments.

## 2. Fusion par faisceau d'électrons (EBM)

- **Points techniques** :
  - Fusion de poudre à l'aide d'un faisceau d'électrons dans un environnement sous vide ;
  - La température de préchauffage peut atteindre 800~1000°C, adaptée aux alliages à point de fusion élevé ;
- **Avantages** : Réduit les contraintes thermiques et convient aux structures de grande taille ;
- **Scénarios applicables** : Utilisé pour fabriquer de grands dispositifs nucléaires et des composants structurels aérospatiaux.

## 3. Revêtement laser et dépôt d'énergie dirigée (DED/LENS)

- **Principe** : Fusion laser lors de l'alimentation en poudre, et construction de la structure couche par couche ;
- **Avantages** : Convient à la réparation de pièces et à la conception de matériaux à gradient fonctionnel (FGM) ;
- **La vitesse de formage est rapide**, mais la rugosité de la surface est relativement élevée et nécessite un post-traitement.

## 4. Jet de liant

- **Principe** : Utiliser un liant pour lier la poudre en forme, puis fritter pour densifier ;
- **Avantages** : grande vitesse, faible consommation d'énergie, adapté à la production en série de pièces complexes ;
- **Défi** : Exigences de retrait de frittage important et de contrôle de précision dimensionnelle élevée.

## 3. Méthodes de formage avancées pour compléter les parcours techniques

### 1. Pressage isostatique à chaud (HIP)

- **Combiné à la fabrication additive** :
  - Densification de pièces formées de manière additive ;
  - Particulièrement adapté aux composants présentant des micropores, des fissures et des contraintes résiduelles importantes ;
- **Paramètres typiques** : température 1300-1500°C, pression 100-200 MPa, temps de maintien 2-4 heures.

### 2. Technologie de micro-étirage et de micro-estampage ( Microforming )

- Utilisé pour fabriquer des pièces en plaques minces W-Mo-Ni-Fe ou des micro-composants avec des structures à l'échelle du micron ;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La combinaison de la découpe laser avec le contrôle du micro-usinage permet la miniaturisation de composants de haute précision.

### 3. Matériaux à gradient fonctionnel (FGM) et formage intégré multi-matériaux

- Grâce à des méthodes telles que le DED, il est possible de concevoir un gradient de teneur en tungstène et en molybdène dans différentes zones de la structure ;
- Il peut améliorer la résistance locale à la chaleur/au rayonnement des pièces et réduire le poids global.

### 4. Stratégie d'optimisation des processus et de contrôle des performances des matériaux

#### 1. Contrôle de la taille des particules de poudre et de leur fluidité

- Utiliser la technologie d'atomisation au gaz ou de sphéroïdisation au plasma pour préparer des poudres à haute sphéricité ;
- Contrôler la teneur en oxygène (<300 ppm) pour réduire les risques de dilatation et de fissuration du frittage.

#### 2. Optimisation de l'apport énergétique et de la stratégie de numérisation

- Contrôlez avec précision la puissance du laser, la vitesse de balayage et le taux de chevauchement pour éviter le frittage ou la fissuration locale ;
- La stratégie de stratification et le contrôle du champ thermique peuvent réduire les contraintes résiduelles.

#### 3. Liaison post-traitement et traitement thermique

- Après le formage, les défauts internes doivent être éliminés par recuit, vieillissement ou HIP ;
- Le traitement de réhomogénéisation de la microstructure permet d'améliorer les propriétés mécaniques globales.

#### 4. Simulation multi-échelle et contrôle qualité

- Appliquer la simulation par éléments finis pour prédire l'écoulement du bain de fusion, la distribution des contraintes et le comportement de refroidissement ;
- L'évaluation de la fiabilité structurelle est réalisée à l'aide de technologies telles que la tomographie et les contrôles non destructifs par ultrasons.

### V. Exploration des applications et tendances de développement futures

- **Domaine de l'énergie nucléaire** : fabrication de structures complexes d'absorption de neutrons et de composants fonctionnels poreux en tungstène-molybdène-nickel-fer ;
- **Protection aérospatiale** : composants légers et hautement protecteurs (comme la structure d'équilibrage de la roue d'inertie du satellite) ;
- **Armes militaires à haute énergie** : noyaux perforants de forme spéciale, dispositifs inertiels pour autodirecteurs ;
- **Intégration multi-matériaux** : intégration avec un alliage de titane, un alliage d'aluminium, de la céramique et d'autres matériaux pour construire des composants structurels multifonctionnels ;
- **Fabrication verte** : Réduire le gaspillage de matériaux dans la fabrication additive et promouvoir le développement de systèmes de fabrication durables.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## VI. Résumé

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer présentent un potentiel technologique important et des perspectives d'applications en fabrication additive et en formage avancé. Bien qu'ils soient encore confrontés à des défis de procédé tels que des points de fusion élevés, la ségrégation multi-éléments et des défauts de formage, les progrès constants en matière de technologie des équipements, de conception des matériaux et de simulation numérique amélioreront la capacité de fabrication de structures complexes, favorisant ainsi leur utilisation généralisée dans les environnements extrêmes et la fabrication haut de gamme.

## 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 Essais de performance et évaluation de la qualité de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

### 5.1 Analyse de la composition et tests élémentaires de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

Le tungstène-molybdène-nickel-fer (W-Mo-Ni-Fe) est un alliage hautes performances et haute densité. Ses propriétés mécaniques, thermiques et électriques dépendent fortement de la teneur et de l'uniformité de chaque élément qui le compose. Par conséquent, une analyse précise de la composition et des tests élémentaires sont essentiels au contrôle qualité. Cela a un impact non seulement sur la cohérence et la traçabilité des produits, mais aussi sur la sécurité et la fiabilité du matériau dans des applications critiques telles que l'énergie nucléaire, l'armée et l'aérospatiale.

Cette section présente systématiquement les méthodes de détection de la composition chimique, les techniques d'analyse élémentaire, les normes courantes de contrôle des impuretés et les méthodes d'évaluation de la composition des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, fournissant un support technique pour la préparation des alliages, la surveillance des processus et les tests finaux.

#### 1. Méthodes d'analyse des principaux éléments d'alliage

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

- **Principe** : Une fois l'échantillon dissous, il est injecté dans un plasma à haute température pour analyser l'intensité du spectre caractéristique de chaque élément ;
- **Avantages** :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Large plage de détection, capable d'analyser simultanément des éléments majeurs tels que le tungstène, le molybdène, le nickel et le fer ;
- Haute précision, adapté aux tests par lots ;
- **Application** : Largement utilisé dans l'analyse des composants et l'évaluation de l'uniformité des produits à mi-parcours et à la fin de leur développement.

## 2. Spectrométrie de fluorescence X (XRF)

- **Principe** : Après que l'échantillon soit excité par des rayons X, l'intensité du rayonnement de fluorescence est analysée pour déterminer la teneur en éléments ;
- **Avantages** :
  - Non destructif, rapide et adapté aux échantillons solides ;
  - La précision est légèrement inférieure à celle de l'ICP humide, mais elle convient au dépistage rapide ;
- **Limitations** : Insensible aux éléments légers (tels que O, C, N).

## 3. Spectroscopie d'absorption atomique (SAA)

- **Utilisé pour l'analyse quantitative d'éléments à teneur moyenne tels que le nickel et le fer** ;
- Il présente une grande précision mais un débit de mesure limité et convient à la détermination précise d'éléments individuels.

## 2. Méthodes de détection des éléments impurs et des éléments gazeux

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont soumis à des exigences strictes en matière de contrôle des impuretés (telles que C, O, N, H, S et P), notamment en service à haute température et dans des environnements d'irradiation. La présence de traces d'impuretés peut également entraîner une fragilisation des joints de grains, une précipitation de gaz ou une perte de résistance.

### 1. Analyseur d'oxygène, d'azote et d'hydrogène (analyse ONH)

- **Instruments applicables** : analyseur de conductivité thermique ONH ;
- **Principe** : O, N et H libérés après fusion à haute température sont détectés séparément ;
- **Importance** : Utilisé pour évaluer la rétention de gaz dans les poudres ou les pièces denses, notamment après fabrication additive.

### 2. Analyseur de carbone et de soufre (analyse CS)

- **Utilisé pour détecter la teneur en carbone libre, graphite et carbure** ;
- **Technologie applicable** : analyse infrarouge du carbone et du soufre ;
- **Norme de contrôle** : L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer de haute pureté nécessite que la teneur en C et S soit inférieure à 0,01 %.

## 3. Analyse de l'uniformité des éléments et de la composition des micro-zones

Afin d'éviter la ségrégation de la composition et la séparation de phase lors de la fusion ou du frittage, une analyse de micro-zone et une évaluation de l'uniformité de la composition sont également nécessaires :

### 1. Microscopie électronique à balayage (MEB) + spectroscopie dispersive en énergie (EDS)

- **Observer le modèle de distribution des éléments et la précipitation de la phase secondaire** ;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Convient à la détection d'inclusions, d'agglomération de particules et de ségrégation à l'échelle micro .

## 2. Microscopie à sonde électronique (EPMA)

- Résolution plus élevée et limite de détection plus basse ;
- Il peut être utilisé pour la numérisation multipoint afin d'analyser les changements de gradient de composition de l'ensemble de la section transversale .

## IV. Normes de contrôle des ingrédients et exigences de qualité

Différents domaines d'application ont des tolérances différentes pour les fluctuations de composition des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer :

élément	Gamme de teneur (% en poids)	Plage de contrôle typique (qualité militaire/nucléaire)
W	85-95	±0,5%
Moi	1-5	± 0,2 %
Ni	2-6	± 0,2 %
Fe	1-4	± 0,2 %
C	≤0,02	≤ 0,005
O	≤0,03	≤0,01
N	≤0,015	≤ 0,005
S/P	≤0,01	≤0,003

Remarque : Les données du tableau ci-dessus sont des plages indicatives. Les plages réelles seront déterminées en fonction des qualités et des normes des produits (telles que GB/T, ASTM, AMS, etc.).

## 5. Processus de test et stratégie de contrôle qualité

### 1. Étape de la matière première

- Détection de composition de poudre (ICP, ONH, CS) ;
- Vérification de la cohérence des ingrédients d'un lot à l'autre.

### 2. Étape de frittage/formage

- Réexamen de la composition des matériaux en vrac;
- Analyse de micro-zones et surveillance des impuretés.

### 3. Étape du produit fini

- Échantillonnage par lots + confirmation de l'uniformité des éléments ;
- Comparez avec la base de données des ingrédients pour garantir la conformité des ratios.

## VI. Résumé

L'analyse de la composition des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer constitue non seulement la première étape de l'évaluation de la qualité, mais aussi une étape cruciale pour optimiser le processus de fabrication et garantir la régularité du produit. Face à l'exigence croissante de stabilité et de fiabilité accrues des matériaux pour les applications haut de gamme, l'avenir s'appuiera de plus en plus sur des méthodes d'essai multi-techniques intégrées (telles que l'ICP-MS, le TOF-SIMS et

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

le XPS) et des systèmes de surveillance des procédés pour assurer un contrôle de la composition en boucle fermée, de la poudre au produit fini.

## 5.2 Caractérisation de la microstructure et de la densité de l'alliage W-Mo-Ni-Fe

En tant qu'alliage composite haute densité classique, les performances ultimes de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer (W-Mo-Ni-Fe) sont largement déterminées par sa microstructure et sa densité globale. La microstructure reflète non seulement la composition de la phase interne, la distribution des grains, les caractéristiques de l'interface et les inclusions d'impuretés de l'alliage, mais détermine également ses propriétés mécaniques (résistance, ténacité et dureté), ses propriétés thermophysiques (conductivité et dilatation thermiques), ses propriétés électromagnétiques et sa stabilité en service. Par conséquent, une caractérisation systématique et détaillée de la microstructure et de la densité est essentielle pour évaluer la qualité des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

Cette section se concentrera sur les méthodes d'analyse de la microstructure de l'alliage, les méthodes de mesure de la densité, les défauts structurels courants et leur impact sur les performances, et présentera des techniques avancées de caractérisation multi-échelles et des méthodes d'évaluation de la qualité.

### 1. Technologie d'analyse de la microstructure

#### 1. Microscopie optique (MO)

- **Objectif** : Observation à faible grossissement et évaluation préliminaire de la taille des grains, des pores et de la distribution des phases ;
- **Préparation des échantillons** : un polissage mécanique + une gravure chimique sont utilisés, et la solution de gravure couramment utilisée est un mélange HCl + FeCl<sub>3</sub> + alcool ;
- **Points d'observation** :
  - répartition des joints de grains;
  - Conditions de transition d'interface multiphasée ;
  - Précipitation de structures sphériques ou dendritiques.

#### 2. Microscopie électronique à balayage (MEB)

- **utiliser** :
  - Observez attentivement la morphologie de la surface de l'alliage, la connexion du col de frittage et la morphologie des pores ;
  - Analyser les liaisons d'interface, les précipitations aux joints de grains et les types d'inclusion des alliages ;
- **Elle est souvent utilisée en conjonction avec la spectroscopie dispersive en énergie (EDS)** pour déterminer la composition élémentaire de chaque région de phase.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Microscopie électronique à transmission (MET)

- **Objets applicables** : phase nano-renforcée, structure de dislocation et analyse de précipité ;
- **Caractéristiques techniques** :
  - Structure de réseau observable et structure d'interface ;
  - Révéler l'existence d'une solution solide ou d'une phase interstitielle W-Mo, Ni-Fe à haute résolution ;
- **Préparation des échantillons** : La préparation d'échantillons en film mince par faisceau d'ions ou la technologie FIB (faisceau d'ions focalisés) est requise.

### 4. Diffraction des rayons X (DRX)

- **Objectif** : Analyser qualitativement et quantitativement la structure de la phase cristalline et identifier les solutions solides, les précipités, les oxydes, etc.
- **Informations typiques** :
  - W et Mo ont une structure cubique centrée sur le corps ;
  - Ni-Fe peut former une solution solide  $\gamma$  ;
  - Les changements observés dans l'intensité du pic de la deuxième phase peuvent refléter l'effet de frittage et l'influence du traitement thermique.

### 5. Diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD)

- **Avantages** :
  - Obtenez avec précision l'orientation des grains, la distribution de la texture et les caractéristiques des limites des grains ;
  - Il peut être utilisé pour analyser la distorsion du grain et la recristallisation dynamique provoquées pendant le traitement ;
- **Applications typiques** : Analyse de l'évolution de la morphologie des grains après extrusion, laminage ou fabrication additive.

## 2. Méthodes de mesure de la densité et d'analyse de la porosité

La densité d'un alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est un indicateur important pour mesurer son intégrité mécanique, sa conductivité thermique et sa résistance à la fatigue. Plus la densité est élevée, meilleures sont ses propriétés physiques et sa durabilité.

### 1. Méthode d'Archimède

- **matériaux en vrac frittés** ;
- **méthode** :
  - Déplacement avec un liquide (tel que l'éthanol ou l'eau distillée) et mesure de la variation de flottabilité ;
  - Formule de calcul :  $\rho = W_{\text{air}} / (W_{\text{air}} - W_{\text{liquide}}) \times \rho_{\text{liquide}}$  ;
- **Avantages** : fonctionnement simple, bonne répétabilité, adapté aux tests par lots.

### 2. Pycnomètre à hélium (méthode de déplacement de gaz)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Convient aux matériaux poreux et aux échantillons de poudre ;**
- **Principe :** Mesurer le volume de gaz déplacé par l'échantillon et calculer la vraie densité en fonction de la masse ;
- **Avantages :** L'influence des cellules fermées peut être éliminée et les résultats de mesure sont plus proches de la densité réelle.

### 3. Tomodensitométrie à rayons X (X-CT)

- **Imagerie 3D :** Obtenir la distribution des défauts tels que les pores, les fissures et le manque de fusion à l'intérieur de l'échantillon ;
- **Résolution :** jusqu'à 1~3  $\mu\text{m}$  ;
- **utiliser :**
  - Analyser la porosité, la distribution de la taille des pores et la fraction volumique des défauts ;
  - Soutenir l'évaluation non destructive de la qualité des produits finis fabriqués de manière additive.

### 3. Caractéristiques typiques de la structure organisationnelle et identification des défauts

#### 1. Distribution de phase et structure de l'interface

- Les particules de W-Mo ont généralement une structure squelettique principale et sont sphériques ou polygonales ;
- Le Ni-Fe constitue une phase continue, distribuée à l'interface entre les particules, et forme parfois une zone de remplissage eutectique ;
- Un excès de Ni peut conduire à la précipitation de composés intermétalliques Ni-W ou Ni-Mo à bas point de fusion lors du frittage en phase liquide et doit être modérément contrôlé.

#### 2. Type de défaut

Type de défaut	Cause	Impact sur les performances
Trous non frittés	Température de frittage insuffisante et temps de frittage court	Résistance et conductivité thermique réduites
fissure	Vitesse de refroidissement trop rapide et accumulation de contraintes thermiques	Réduire la durée de vie en fatigue
Phase d'impuretés précipitées	Éléments d'impuretés en excès (tels que Si, O)	Induit une fragilisation et réduit la ductilité
Séparation de phases	Répartition inégale des éléments et frittage insuffisant	Réduire l'isotropie du matériau

#### 4. Stratégie d'organisation et de contrôle de la densité

- **Optimisation de la poudre :** L'utilisation de poudre prémélangée sphérique W-Mo-Ni-Fe avec une distribution granulométrique étroite favorise la densification pendant le processus de frittage ;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Contrôle du frittage** : Optimisation de la température (1350–1500°C), du temps de maintien et de l'atmosphère (H<sub>2</sub> / Ar ) pour favoriser la croissance du col du joint ;
- **Contrôle post-traitement** : Le pressage isostatique à chaud (HIP) est utilisé pour éliminer les micropores et augmenter la densité globale à plus de 99,5 % ;
- **Contrôle de la microstructure** : Le traitement thermique + la déformation plastique (comme le forgeage et le laminage) peuvent favoriser le raffinement du grain et améliorer l'uniformité de la texture.

## V. Résumé

La microstructure et la densité des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer déterminent non seulement leurs propriétés physiques intrinsèques, mais ont également un impact direct sur leur sécurité d'utilisation et leur fiabilité technique. L'association de techniques de microscopie optique et électronique à la mesure de densité multidimensionnelle permet une évaluation complète de la qualité, de l'échelle macroscopique à l'échelle nanométrique. À l'avenir, grâce aux progrès des tests intelligents et de la caractérisation numérique, le contrôle de la microstructure et la cohérence du produit fini des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer seront encore améliorés, jetant les bases de leur application généralisée dans la fabrication haut de gamme.

### 5.3 Propriétés mécaniques des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer et comparaison avec les normes

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer (W-Mo-Ni-Fe) sont largement utilisés dans des applications clés telles que les domaines militaire, aérospatial, nucléaire et médical, en raison de leur densité élevée, de leur résistance, de leur excellente ténacité et de leur résistance aux radiations. Leurs propriétés mécaniques constituent non seulement un critère essentiel de sélection des matériaux, mais aussi une base essentielle pour l'évaluation de la qualité, le contrôle de la production et l'optimisation des procédés. Pour garantir que les matériaux répondent aux exigences de sécurité et de fonctionnalité des différentes applications, leurs propriétés mécaniques doivent être systématiquement testées et normalisées conformément aux normes internationales.

Cette section présentera de manière exhaustive les éléments de test des propriétés mécaniques, les méthodes de test courantes, la comparaison des systèmes standard (ASTM, GB, ISO, MIL, etc.) de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, ainsi que l'importance de l'évaluation et les précautions des résultats des tests en application.

#### 1. Principaux éléments de test des propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques typiques des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer comprennent :

Indicateurs de performance	Signification du test
résistance à la traction	La limite de résistance du matériau sous charge maximale
Limite d'élasticité	La valeur de contrainte critique à laquelle le matériau produit une déformation irréversible

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Allongement à la rupture</b>	Paramètres clés qui caractérisent la plasticité des matériaux et reflètent la ductilité
<b>Rétrécissement sectionnel</b>	Caractériser les capacités de striction et de déformation pour aider à évaluer l'adaptabilité du traitement
<b>Dureté (HV/HB)</b>	Caractérise la résistance à la compression locale et reflète indirectement la résistance à l'usure et la difficulté de traitement
<b>Résistance aux chocs</b>	Caractérise la capacité à absorber les charges d'impact et constitue un jugement important de la fragilité ou de la ductilité
<b>La fatigue de la vie</b>	Évaluer la durée de vie des matériaux sous des charges alternées
<b>Résistance à haute température/fluage</b>	Stabilité mécanique dans des conditions de service à haute température

## 2. Méthodes et équipements d'essai couramment utilisés

### 1. Essai de traction

- **Normes applicables :**
  - ASTM E8 (Méthode standard pour les essais de traction des matériaux métalliques)
  - GB/T 228.1 (Méthodes d'essai de traction des matériaux métalliques à température ambiante)
  - ISO 6892-1 (Norme internationale pour les essais de traction des matériaux métalliques)
- **Équipement d'essai :** Machine d'essai de matériaux universelle
- **Forme de l'échantillon :** barre ronde ou éprouvette de traction standard plate
- **Sortie des paramètres :**
  - Résistance à la traction (UTS)
  - Limite d'élasticité (YS)
  - Allongement (EL)
  - Réduction de surface (RA)

### 2. Test de dureté

- **Dureté Vickers (HV) :** utilisée pour mesurer précisément la microdureté après frittage ou traitement thermique
  - Normes : ASTM E384, GB/T 4340, ISO 6507
- **Dureté Brinell (HB) :** convient pour tester la dureté globale des grandes pièces forgées ou laminées
  - Normes : ASTM E10, GB/T 231, ISO 6506

### 3. Essai de résistance aux chocs

- **Méthode d'essai :** essai de choc Charpy
- **Normes :** ASTM E23, GB/T 229, ISO 148
- **Sortie de paramètres :** énergie d'absorption d'impact (J), taux de rupture fragile
- **Température applicable :** température normale ou basse température (-40°C voire -196°C)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4. Essais de fatigue

- **Méthode d'essai** : fatigue à haut cycle (HCF), fatigue à faible cycle (LCF)
- **Normes** : ASTM E466, GB/T 3075, ISO 1099
- **Données de sortie** : courbe contrainte-durée de vie (SN), limite de fatigue

#### 5. Test de performance à haute température

- **Essais de résistance au fluage et à la rupture** : utilisés pour évaluer la déformation et le comportement à la rupture des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer en service à long terme à 600°C~1000°C
- **Normes** : ASTM E139, GB/T 2039, ISO 204

### 3. Comparaison des normes de propriétés mécaniques

#### 1. Aperçu des normes communes dans différents pays/systèmes

Projet de performance	Chine (GB/T)	États-Unis (ASTM)	Européen/International (ISO)
extensible	GB/T 228.1	ASTM E8/E8M	ISO 6892-1
dureté	GB/T 231/4340	ASTM E10/E384	ISO 6506/6507
Impact	GB/T 229	ASTM E23	ISO 148-1
Ramper	GB/T 2039	ASTM E139	ISO 204
fatigue	GB/T 3075	ASTM E466	ISO 1099

#### 2. Plage de performances typique de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer (pour référence)

Indicateurs de performance	Plage numérique	Conditions de test
résistance à la traction	800 – 1100 MPa	Température ambiante
Limite d'élasticité	600 – 900 MPa	Température ambiante
Élongation	10% – 30%	Température ambiante
Dureté (HV)	200 – 350	
Résistance aux chocs	> 30 J (test Charpy)	température normale
Durée de vie par rupture par fluage	> 100 h (1000°C)	Chargement persistant

Remarque : les performances spécifiques varient en fonction de la densité de frittage, de la méthode de traitement thermique, du rapport d'alliage, etc. En utilisation réelle, veuillez vous référer au rapport de test du fabricant ou aux données de certification.

#### 4. Principaux facteurs affectant les performances mécaniques

- **Qualité de la poudre** : La taille des particules de poudre, la pureté et la distribution affectent directement la densité et la résistance ;
- **Densité** : Plus la porosité est faible, meilleures sont les propriétés de traction et d'impact ;
- **Taille des grains** : Les petits grains augmentent la résistance (effet Hall-Page) mais peuvent réduire la ductilité ;
- **Système de traitement thermique** : Le processus de trempe, de vieillissement ou de recuit détermine l'équilibre entre la résistance et la ténacité de l'alliage ;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Composition de phase** : L'uniformité de la phase continue Ni-Fe est cruciale pour la plasticité et les propriétés d'impact ;
- **Défauts structuraux** : inclusions, fissures, délaminage et ségrégation peuvent tous entraîner des fluctuations de performance.

## V. Résumé et suggestions

L'évaluation des propriétés mécaniques des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer exige le respect de normes internationales strictes, ainsi que des méthodes d'essai précises et des procédures de préparation d'échantillons normalisées. Différents éléments d'essai se complètent et fournissent ensemble une évaluation scientifique des performances globales du matériau. Des exigences de performance et des procédures d'essai ciblées sont requises pour différents scénarios d'application (tels que les noyaux de projectiles perforants, les composants de réacteurs nucléaires ou les véhicules inertiels d'aviation).

À l'avenir, avec la demande croissante de matériaux composites fonctionnels et d'environnements de service extrêmes, la technologie de test à haut débit, l'analyse de modélisation multi-échelle, la prédiction de l'intelligence artificielle, etc. entreront progressivement dans le système d'évaluation des propriétés mécaniques des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, réalisant une gestion complète des performances du processus, de la conception du matériau au déploiement de l'application.

## 5.4 Méthodes d'essai des propriétés thermiques et électriques des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont largement utilisés dans les environnements à haute température, à fort rayonnement et extrêmes en raison de leur densité exceptionnellement élevée, de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leurs propriétés physiques stables. Leurs propriétés thermophysiques et électriques ont un impact direct sur l'efficacité de dissipation thermique de l'alliage, la compatibilité électromagnétique et la stabilité de service dans les applications d'ingénierie pratiques. Par conséquent, tester et analyser avec précision les propriétés thermophysiques et électriques des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer est une étape essentielle de la recherche et du développement des matériaux, du contrôle qualité et de l'optimisation des performances.

Cette section se concentre sur les méthodes d'essai et les technologies d'instruments pour des indicateurs clés tels que la conductivité thermique, le coefficient de dilatation thermique, la capacité thermique spécifique, la diffusivité thermique, la conductivité électrique, la réponse magnétique et la résistance aux rayonnements des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

### 1. Méthode d'essai des propriétés thermiques

#### 1. Mesure de la conductivité thermique

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Principe du test** : Mesure la capacité d'un matériau à conduire la chaleur, généralement à l'aide d'une méthode à l'état stationnaire ou d'une méthode transitoire ;
- **Équipements couramment utilisés** :
  - **Analyse du flash laser (LFA)**
    - Principe : Utiliser des impulsions laser pour chauffer un côté de l'échantillon, mesurer la réponse en température de l'autre côté, calculer la diffusivité thermique, puis déduire la conductivité thermique ;
    - Domaine d'application : de la température ambiante à la température élevée (jusqu'à 2000°C) ;
    - Norme : ASTM E1461 ;
  - **Méthode de l'état stationnaire**
    - La conductivité thermique est calculée en appliquant une différence de température constante et en mesurant le flux de chaleur et le gradient de température ;
    - Convient aux grands échantillons et aux plages de basses températures.
- **Remarques** :
  - La taille de l'échantillon et l'état de surface ont un impact significatif sur les résultats ;
  - La précision de mesure des matériaux à haute densité est plus élevée.

## 2. Mesure du coefficient de dilatation thermique (CTE)

- **Principe du test** : Le rapport entre la variation de longueur d'un matériau lorsqu'il est chauffé et sa longueur d'origine change généralement avec la température ;
- **Instrument de mesure** : Dilatomètre ;
- **Normes** : ASTM E228, GB/T 3366, ISO 11359 ;
- **Plage de test** : température ambiante à haute température (généralement jusqu'à 1000 °C et plus) ;
- **application** :
  - Prédire les contraintes thermiques et les déformations thermiques ;
  - Coopérer avec l'adaptation thermique des pièces structurales conçues.

## 3. Chaleur spécifique et diffusivité thermique

- **Capacité thermique massique** : Capacité d'un matériau par unité de masse à absorber la chaleur et à provoquer une augmentation de température, généralement mesurée par calorimétrie différentielle à balayage (DSC) ;
- **Diffusivité thermique** : vitesse à laquelle la chaleur se propage dans un matériau, qui peut être obtenue par la méthode du flash laser ;
- **Relation** : Conductivité thermique = diffusivité thermique × capacité thermique massique × densité.

## 2. Méthodes d'essai des propriétés électriques et physiques

### 1. Mesures de conductivité et de résistivité

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Méthode des quatre sondes**
  - Normes : ASTM B193, GB/T 24523 ;
  - Mesurer la résistance de l'échantillon et calculer la conductivité ou la résistivité ;
  - Avantages : évite efficacement l'influence de la résistance de contact, convient aux matériaux métalliques et alliés ;
- **Mesure de l'effet Hall**
  - Utilisé pour déterminer la concentration et la mobilité des porteurs et évaluer le mécanisme de conductivité de l'alliage ;
  - Appliqué à l'étude de la structure électronique des alliages tungstène-molybdène hautes performances.

## 2. Détection de réponse magnétique

- **Mesure de boucle d'hystérésis**
  - Instruments : magnétomètre à échantillon vibrant (VSM), dispositif d'interférence quantique supraconducteur (SQUID) ;
  - Mesurer le changement d'intensité de magnétisation avec un champ magnétique externe pour déterminer si le matériau est paramagnétique, ferromagnétique ou antiferromagnétique ;
- **Test de perméabilité magnétique CA**
  - Évaluer la réponse magnétique des matériaux dans les champs magnétiques alternatifs pour une utilisation dans la conception d'appareils électroniques.

## 3. Test de résistance aux radiations

- **Simulation de l'environnement radiologique**
  - Réaliser des tests d'irradiation à l'aide de sources de neutrons et de sources de rayons gamma ;
  - Observer les changements dans les propriétés mécaniques, la microstructure et les propriétés électriques des alliages ;
- **Test de performance post-irradiation**
  - Comprend des tests de ténacité à la rupture, de dureté, de résistivité électrique et de conductivité thermique pour évaluer la dégradation des matériaux induite par les rayonnements.

## 4. Préparation et précautions des échantillons de test

- L'échantillon doit être représentatif et éviter l'oxydation de surface et les dommages mécaniques ;
- La plage de température du test et le contrôle de l'atmosphère (comme le gaz inerte) affectent les résultats du test ;
- Des tests répétés garantissent l'exactitude et la répétabilité des données.

## V. Résumé

Les propriétés thermophysiques et électriques des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont essentielles à la performance de leurs applications. Une instrumentation de pointe, comprenant des

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

méthodes de flash laser, des instruments de dilatation thermique, des mesures à quatre sondes et des essais de réponse magnétique, permet de mesurer avec précision des données clés telles que la conductivité thermique, les caractéristiques de dilatation thermique, la conductivité électrique et les propriétés magnétiques du matériau, fournissant ainsi une base scientifique pour l'optimisation de la conception des matériaux et les applications techniques. À l'avenir, grâce à des essais et simulations de performance couplés multi-champs, notre compréhension et notre maîtrise des propriétés multiphysiques des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer seront encore améliorées.

## 5.5 État de surface et technologie de détection des défauts de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

En tant que métal lourd hautes performances, l'état de surface de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer influence directement ses propriétés mécaniques, sa résistance à la corrosion et sa durée de vie. De plus, de minuscules défauts de surface, tels que fissures, pores et inclusions, sont souvent à l'origine de défaillances prématurées des matériaux. Par conséquent, une détection précise et efficace de l'état de surface et des défauts internes de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est essentielle pour garantir la qualité du matériau et la sécurité de son application.

Cette section présente systématiquement la technologie de caractérisation de surface et les principales méthodes de détection des défauts des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, y compris l'inspection visuelle, les technologies de contrôle non destructif (contrôle par ultrasons, imagerie par rayons X, inspection par particules magnétiques, contrôle par courants de Foucault, etc.), ainsi que les technologies émergentes d'inspection numérique et d'analyse assistée par intelligence artificielle.

### 1. Caractérisation de l'état de surface de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

#### 1. Mesure de la rugosité de surface

- **Instruments et méthodes :**
  - Profilomètres (avec contact, sans contact) ;
  - Microscopie à balayage laser;
  - La microscopie à force atomique (AFM) est utilisée pour la mesure de la rugosité à l'échelle nanométrique.
- **Paramètres clés :**
  - Ra (rugosité moyenne arithmétique) ;
  - Rz (rugosité de hauteur à dix points) ;
  - Rt (rugosité de hauteur maximale).
- **Importance de l'application :**
  - Évaluer les effets du processus d'usinage (tels que le meulage et le polissage) ;
  - Affecte l'adhérence du revêtement et les performances en fatigue ;
  - Une rugosité excessive peut entraîner une concentration de contraintes et une corrosion accrue.

#### 2. Analyse de la morphologie de surface et de la microstructure

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Microscopie électronique à balayage (MEB) :**
  - Utilisé pour observer les fissures de surface, la distribution des particules et l'état de la couche d'oxyde ;
- **Spectroscopie dispersive en énergie (EDS) :**
  - Analyser la distribution des éléments de surface et détecter les inclusions et les contaminants ;
- **Spectroscopie de photoélectrons à rayons X (XPS) :**
  - Analyse qualitative de la composition chimique de surface et de l'état d'oxydation.

## 2. Technologie de détection des défauts

### 1. Inspection visuelle

- **méthode :**
  - Inspection visuelle manuelle ;
  - Systèmes de vision industrielle automatisés combinant des caméras haute résolution et des algorithmes de traitement d'images.
- **Avantages :**
  - Intuitif et rapide ;
  - Convient pour détecter les défauts de surface de grande surface tels que les rayures, les pores et le pelage.

### 2. Contrôle par ultrasons (UT)

- **principe :**
  - Utiliser les caractéristiques de propagation et de réflexion des ondes ultrasonores dans les matériaux pour détecter les défauts internes ;
- **méthode :**
  - Méthode d'écho d'impulsion, méthode de transmission ;
  - La technologie ultrasonore à réseau phasé (PAUT) permet une imagerie haute résolution.
- **Champ d' application :**
  - Détecter les fissures internes, les inclusions, la séparation intercouche et les pores ;
- **avantage :**
  - Haute sensibilité, non destructif ;
  - Peut être utilisé pour des plaques épaisses et des structures complexes.

### 3. Radiographie et tomographie (TDM)

- **Inspection aux rayons X :**
  - Utilisez le pouvoir pénétrant des rayons X pour révéler les structures internes ;
  - Convient pour trouver des défauts plus importants tels que des pores, des inclusions et des fissures.
- **CT industriel :**
  - Technologie d'imagerie non destructive tridimensionnelle pour localiser et mesurer avec précision le volume des défauts ;
  - Particulièrement efficace pour les géométries complexes et les structures multicouches.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4. Test de particules magnétiques (MPT)

- **Matériaux applicables** : Convient aux matériaux conducteurs magnétiques. L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer a généralement une réponse magnétique ;
- **Principe** : Après aimantation, le champ magnétique fuit au niveau du défaut et la poudre magnétique adsorbée apparaît ;
- **Avantages** : haute sensibilité, utilisation facile, adapté à la détection des défauts de surface et proches de la surface.

#### 5. Essai par courants de Foucault (ECT)

- **Principe** : Détecter les défauts de surface et proches de la surface des matériaux conducteurs en utilisant le principe de l'induction électromagnétique ;
- **Application** : Détection très sensible des microfissures, de la corrosion et des défauts de revêtement ;
- **Avantages** : sans contact, rapide, adapté à la détection de surface et peu profonde.

#### 3. Numérisation avancée et technologie de détection intelligente

- **Traitement d'images numériques et assistance IA** :
  - Associé à des algorithmes d'apprentissage automatique, l'identification et la classification automatiques des défauts peuvent être réalisées ;
  - Améliorez l'efficacité et la précision de la détection et réduisez les erreurs humaines.
- **Numérisation optique 3D et reconstruction de la topographie de surface** :
  - Acquérir avec précision des données topographiques complexes pour faciliter le traitement ultérieur et l'évaluation des performances.
- **Système de détection en ligne** :
  - Intégrez des capteurs et un contrôle automatique pour réaliser une surveillance de la qualité en temps réel de la ligne de production.

#### IV. Normes d'essai et exigences de contrôle de la qualité

- **Normes connexes** :
  - ASTM E165 (norme d'inspection par particules magnétiques) ;
  - ASTM E213 (norme de test par ultrasons) ;
  - ISO 17638 (essais de tomographie industrielle) ;
  - GB/T 13810 (Terminologie des essais non destructifs), etc.
- **Contrôle de qualité** :
  - Établir un processus de test complet pour garantir la fiabilité des données de test ;
  - Plusieurs méthodes de détection se complètent pour améliorer l'exhaustivité de la détection des défauts.

#### V. Résumé

La technologie de détection de l'état de surface et des défauts des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer est essentielle pour garantir la stabilité des performances des matériaux et leur sécurité d'utilisation. L'intégration de multiples techniques de contrôle non destructif à des méthodes

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'analyse numériques et intelligentes modernes permet une détection précise et efficace des défauts de surface et internes des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. À l'avenir, grâce aux progrès des technologies de contrôle, l'automatisation et l'intelligence des tests de matériaux continueront de progresser, offrant ainsi une base solide pour les applications haut de gamme des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

## 5.6 Essais non destructifs et évaluation de la durée de vie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont largement utilisés dans l'aérospatiale, le nucléaire, l'armée et la fabrication haut de gamme. Ces applications impliquent souvent des conditions complexes telles que des contraintes élevées, des températures élevées et un fort rayonnement. Pour garantir la sécurité et la fiabilité de ces alliages en service, des essais non destructifs (END) précis et un système scientifique d'évaluation de la durée de vie sont essentiels. Cette section se concentre sur les techniques d'END et les méthodes de prévision de la durée de vie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

### 1. Le rôle de la technologie des essais non destructifs dans la surveillance de service des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

En tant que matériaux à haute densité et haute résistance, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer peuvent présenter des défauts internes et de surface susceptibles d'entraîner une dégradation des performances et une défaillance soudaine. Les technologies de contrôle non destructif (CND) permettent de détecter précocement les fissures, les inclusions, les pores et les dommages dus à la fatigue, permettant ainsi une surveillance en temps réel de l'état du matériau.

#### 1. Principales méthodes d'essais non destructifs

- **Le contrôle par ultrasons (UT)**

utilise les caractéristiques de propagation des ondes sonores dans les matériaux pour détecter les défauts internes. Il est adapté aux plaques épaisses et aux pièces en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer de formes complexes. Le contrôle par ultrasons multiéléments (PAUT) permet d'obtenir une imagerie tridimensionnelle et offre une grande précision de positionnement.

- **Les contrôles radiographiques (rayons X et gamma)**

identifient les défauts internes des matériaux grâce à l'imagerie pénétrante et permettent de détecter les pores et les fissures de grande taille. La technologie de tomographie industrielle permet d'obtenir des images tridimensionnelles haute résolution de la structure des défauts.

- **La magnétoscopie (MT)**

est adaptée à la détection des défauts de surface et proches de la surface. Les propriétés de réponse magnétique des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer rendent cette méthode efficace.

- **Les tests par courants de Foucault (ECT)**

ciblent les microfissures superficielles et superficielles ainsi que la corrosion, présentent

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

une sensibilité de détection élevée et sont particulièrement adaptés aux pièces électroniques et de précision.

- **Les tests d'émission acoustique (AE)**  
surveillent les signaux d'ondes élastiques émis par les matériaux lorsqu'ils sont soumis à des contraintes et peuvent capturer la propagation des fissures et le processus de dommages par fatigue en temps réel.

## 2. Méthode d'évaluation de la durée de vie utile

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont souvent soumis à des charges complexes et à des environnements extrêmes dans leurs applications réelles. Un système d'évaluation de la durée de vie raisonnable ne repose pas uniquement sur les propriétés du matériau, mais doit également combiner les données d'essais non destructifs et les conditions de service.

### 1. Prédiction de la durée de vie en fatigue

- **Essais de fatigue Des**  
essais de fatigue à faible cycle (LCF) et de fatigue à grand cycle (HCF) ont été réalisés dans des conditions de laboratoire pour obtenir des courbes SN et des paramètres de ténacité à la rupture.
- **La théorie de la tolérance aux dommages**  
prédit la durée de vie en fatigue pendant le service en fonction de la taille initiale du défaut et du taux de croissance des fissures du matériau.
- **Le modèle de mécanique de la rupture**  
utilise des paramètres de mécanique de la rupture (tels que le facteur d'intensité de contrainte K et l'intégrale J) pour analyser la croissance des fissures.

### 2. Impact de l'environnement à haute température et à rayonnement

- **L'analyse du fluage à haute température**  
évalue la déformation par fluage et la durée de vie des matériaux soumis à une charge à haute température à long terme.
- **L'évaluation des dommages causés par les radiations**  
intègre la dégradation des matériaux induite par les radiations pour ajuster les modèles de prédiction de la durée de vie.

### 3. Évaluation de la durée de vie en fatigue du couplage multi-champs

- Compte tenu de l'impact de divers facteurs environnementaux tels que la température, la contrainte, le rayonnement et la corrosion sur les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, une simulation numérique avancée et des modèles expérimentaux basés sur des données sont utilisés pour obtenir une prédiction précise de la durée de vie.

### 3. Application intégrée des essais non destructifs et de l'évaluation de la durée de vie

- **Le système de surveillance en ligne**  
permet de surveiller en temps réel l'état de santé des pièces clés de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer grâce à un agencement de capteurs.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **La maintenance intelligente basée sur les données**  
utilise l'apprentissage automatique et les technologies d'analyse de Big Data, combinées aux données CND, pour prédire la durée de vie restante et guider les décisions de réparation et de remplacement.
- **La gestion du cycle de vie complet**  
couvre la conception, la fabrication, l'utilisation et la mise au rebut, en établissant un système complet de suivi de l'état des matériaux et de gestion de la durée de vie.

#### IV. Tendances futures du développement

- **La technologie de contrôle non destructif multimodal à haute sensibilité**  
intègre des tests par émission acoustique, par ultrasons, par courants de Foucault et optiques pour améliorer les capacités d'identification des défauts.
- **La technologie des jumeaux numériques et de simulation**  
combine la microstructure des matériaux et les données de service pour réaliser une simulation de vie multi-échelle.
- **La plate-forme intelligente de gestion de l'état des matériaux**  
permet un diagnostic intelligent et une alerte précoce de l'état de service de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer.

#### V. Résumé

Les essais non destructifs et l'évaluation de la durée de vie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont des technologies essentielles pour garantir leur utilisation sûre et stable dans les applications haut de gamme. L'intégration de multiples méthodes d'essais non destructifs avec des modèles avancés de fatigue et d'impact environnemental permet d'anticiper la dégradation des matériaux et de prévoir avec précision leur durée de vie. À l'avenir, les technologies intelligentes et numériques amélioreront considérablement la gestion de la fiabilité des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer et favoriseront leur utilisation généralisée dans des conditions d'exploitation extrêmes.

#### 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

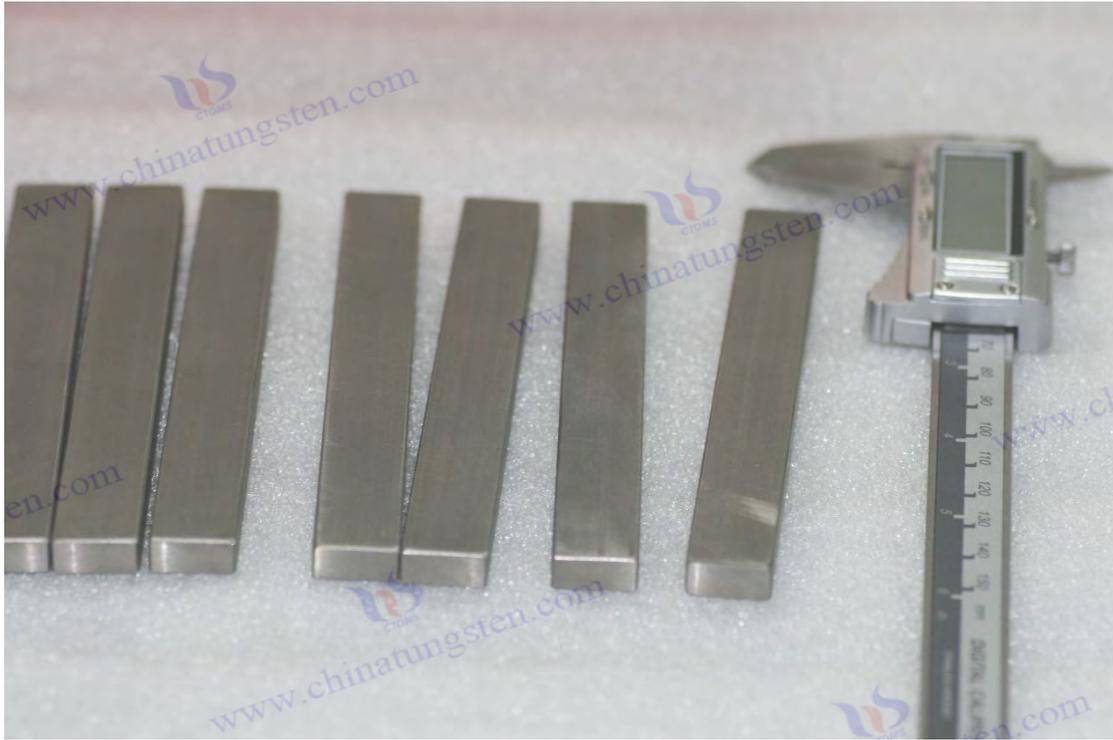
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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 6 Applications typiques et cas industriels de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

### 6.1 Applications structurelles et de blindage des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans l'énergie nucléaire

Grâce à leur densité exceptionnelle, leur grande résistance et leur excellente résistance aux radiations, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont devenus des matériaux de structure et de protection contre les radiations importants dans le secteur de l'énergie nucléaire. Avec le développement des technologies nucléaires, les performances des matériaux ont été renforcées. Grâce à leurs propriétés physiques et chimiques uniques, ces alliages sont largement utilisés dans des domaines clés tels que les composants des réacteurs nucléaires, les absorbeurs de neutrons et le stockage des déchets radioactifs.

#### 1. Avantages de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer en termes de protection physique et de radioprotection

Le tungstène et le molybdène, avec leur densité extrêmement élevée (environ  $19,3 \text{ g/cm}^3$  pour le tungstène et  $10,2 \text{ g/cm}^3$  pour le molybdène) et leur numéro atomique, constituent des matériaux de blindage efficaces contre les rayons gamma et les neutrons. Le liant nickel-fer confère à l'alliage non seulement d'excellentes propriétés mécaniques, mais renforce également sa résistance aux radiations. La structure composite de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer offre un équilibre optimal entre efficacité de blindage et résistance mécanique, répondant ainsi aux exigences de résistance et de densité élevées des équipements nucléaires.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Application aux composants structurels des réacteurs nucléaires

### 1. tungstène

-molybdène-nickel-fer sont couramment utilisés comme réflecteurs de neutrons et boucliers contre les rayons gamma dans les réacteurs nucléaires, réduisant ainsi les fuites de rayonnement et protégeant les équipements et les opérateurs critiques. Leur densité élevée réduit efficacement la transmittance des rayonnements et prolonge la durée de vie des équipements.

### 2. Les barres de contrôle et les absorbeurs de neutrons

, l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer peuvent atteindre une section efficace d'absorption de neutrons spécifique, préparer des matériaux de barres de contrôle à haute efficacité et ajuster avec précision le taux de réaction en chaîne des réacteurs nucléaires.

### 3. Dans les environnements à fort rayonnement, la résistance et la ténacité élevées ainsi que l'excellente résistance aux rayonnements de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer garantissent que les pièces structurelles résistantes aux rayonnements ne souffrent pas de fissures fragiles et de déformations sévères, maintenant ainsi l'intégrité structurelle du réacteur nucléaire .

## 3. Traitement et blindage des déchets radioactifs

Les barrières de protection en alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont largement utilisées dans les conteneurs de stockage et de transport des déchets nucléaires. Leur densité élevée bloque efficacement les rayons radioactifs, prévenant ainsi les fuites et garantissant la sécurité de l'environnement et des personnes. De plus, la stabilité mécanique de l'alliage favorise le stockage à long terme, réduisant ainsi les risques liés au vieillissement des matériaux.

## 4. Équipement de médecine nucléaire et de radioprotection

En médecine nucléaire, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont utilisés pour fabriquer des composants de blindage et des pièces structurelles de précision dans les équipements de radiothérapie. Leur densité élevée assure un contrôle précis des radiations, améliorant ainsi l'efficacité du traitement tout en protégeant le personnel médical des effets des radiations.

## V. Analyse de cas sectoriels

### 1. Les fabricants nationaux de matériaux pour l'énergie nucléaire en alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

disposent de lignes de production complètes, équipées d'équipements de pointe en métallurgie des poudres et d'usinage de précision. Leurs produits sont largement utilisés dans les centrales nucléaires et les réacteurs de recherche nationaux.

### 2. Exemples d'application sur le marché international de l'énergie nucléaire :

Les produits en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer sont exportés vers les pays dotés de l'énergie nucléaire tels que l'Europe, les États-Unis, le Japon et la Corée du Sud, répondant à leur demande en matériaux de radioprotection haute performance et favorisant

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

les échanges et la coopération technologiques mondiaux en matière de matériaux pour l'énergie nucléaire.

## VI. Tendances futures du développement

- **Les matériaux composites tungstène-molybdène-nickel-fer hautes performances**  
améliorent la résistance aux radiations et les propriétés mécaniques des matériaux grâce à la nanotechnologie et au microalliage, améliorant ainsi la sécurité et la durée de vie des équipements d'énergie nucléaire.
- **L'intégration de la technologie de surveillance intelligente et de prédiction de la durée de vie**  
avec la technologie de test non destructif permet la surveillance en ligne de l'état de santé et la maintenance prédictive des composants en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans les équipements d'énergie nucléaire.
- **L'énergie nucléaire verte et le développement durable des matériaux**  
favorisent le processus de préparation respectueux de l'environnement et la technologie de recyclage de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans les matériaux d'énergie nucléaire, ce qui est conforme à la stratégie durable du développement futur de l'énergie nucléaire.

## VII. Résumé

En tant que matériau de structure et de blindage essentiel dans le secteur de l'énergie nucléaire, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, grâce à leurs propriétés physiques uniques et à leurs excellentes capacités de radioprotection, contribuent à la sécurité et à la stabilité du fonctionnement de la technologie nucléaire. Grâce aux progrès de la science des matériaux et de la technologie nucléaire, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer joueront un rôle de plus en plus important dans la chaîne industrielle de l'énergie nucléaire, favorisant un développement efficace et écologique de l'énergie nucléaire.

### 6.2 Application de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans les noyaux de projectiles militaires et les composants inertiels

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, grâce à sa densité élevée, sa grande résistance et son excellente résistance à l'usure et aux températures élevées, est devenu un matériau clé dans l'industrie militaire pour la fabrication de noyaux de projectiles perforants et de composants clés des systèmes de guidage inertiels. Ses propriétés physiques et mécaniques uniques répondent aux exigences strictes des équipements militaires en matière de pénétration, de précision et de durabilité des ogives.

#### 1. Principaux avantages de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans les noyaux de projectiles perforants

##### 1. Une densité élevée concentre l'énergie cinétique

. La densité de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est généralement comprise entre

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

17 et 18 g/cm<sup>3</sup>, ce qui est bien supérieur à celle de l'acier. Cela permet au noyau perforant de concentrer une énergie cinétique considérable lors de l'impact à grande vitesse, obtenant ainsi un excellent effet de pénétration.

## 2. Excellente résistance mécanique et ténacité

La résistance à la traction et la ténacité à la rupture élevées de l'alliage garantissent que le noyau n'est pas facilement cassé ou déformé lors de la pénétration du blindage, améliorant ainsi la profondeur de pénétration et l'effet de frappe.

## 3. Résistance aux hautes températures et à l'usure.

Les températures élevées instantanées et les frottements importants générés par les impacts à grande vitesse imposent des exigences extrêmement élevées aux performances des matériaux. La résistance aux hautes températures et à l'usure de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer garantit la stabilité de la forme du noyau et le maintien de l'efficacité de pénétration.

## 2. Application des composants inertiels militaires

### 1. un composant structurel clé dans les systèmes de navigation inertielle

, est souvent utilisé pour fabriquer des rotors, des boîtiers de gyroscopes et des contrepoids dans les systèmes de navigation inertielle en raison de sa densité élevée et de sa résistance élevée, améliorant ainsi la stabilité du système et sa résistance aux vibrations.

### 2. La stabilité dimensionnelle et les bonnes performances de traitement des alliages de pièces mécaniques de haute précision les rendent adaptés aux composants inertiels aux formes complexes, garantissant le fonctionnement fiable à long terme des instruments de précision.

## 3. Cas d'application typiques

### • fabrique un certain type de noyau de projectile perforant

en utilisant un matériau en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer au lieu du carbure cémenté traditionnel, ce qui augmente la capacité de pénétration du noyau de 20 %, améliorant considérablement l'efficacité au combat du système d'armes.

### • Composants de système de navigation inertielle haute performance

Les équipements de navigation inertielle haut de gamme au pays et à l'étranger utilisent un alliage tungstène-molybdène-nickel-fer pour fabriquer des composants de rotor, obtenant une précision et des capacités anti-interférences plus élevées.

## 4. Processus de fabrication et exigences techniques

### • Le formage par métallurgie des poudres

utilise des poudres de tungstène et de molybdène de haute pureté et un processus de frittage à température strictement contrôlée pour garantir que l'alliage est dense et uniforme, évitant ainsi les défauts de performance.

### • L'usinage de précision

combiné à des technologies avancées de meulage et de polissage permet une fabrication de haute précision de composants complexes.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Le traitement de renforcement de surface**  
améliore la résistance à l'usure et à la corrosion de l'alliage grâce au revêtement de surface ou au traitement thermique, prolongeant ainsi la durée de vie du noyau et des composants inertiels.

## V. Tendances et défis du développement

- **Le renforcement nanométrique et l'optimisation de la microstructure**  
améliorent encore les propriétés mécaniques globales et la ténacité des matériaux grâce au renforcement par nanoparticules et à la technologie de micro-alliage.
- Tout en garantissant les performances, **la conception légère développe des matériaux composites à faible densité pour remplacer une partie de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer afin d'obtenir un allègement global de l'équipement.**
- **L'adaptabilité environnementale améliorée**  
cible les températures extrêmes et les environnements de champ de bataille complexes, optimise la résistance à la corrosion des matériaux et la stabilité thermique et améliore la fiabilité du service des composants.

## VI. Résumé

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, grâce à leur excellente densité, leur robustesse et leur résistance à l'usure, jouent un rôle essentiel dans les noyaux de missiles et les composants inertiels de l'industrie militaire. Grâce à l'innovation continue des matériaux et aux progrès technologiques de transformation, ces alliages répondront mieux aux exigences strictes en matière de matériaux haute performance des futurs équipements militaires et favoriseront la modernisation des technologies militaires.

### 6.3 Application des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans les structures aérospatiales à haute température

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, grâce à leur densité, leur résistance et leur stabilité exceptionnelles à haute température, sont devenus le matériau privilégié pour les structures critiques à haute température de l'industrie aérospatiale. Face à l'amélioration continue des performances et de la sécurité des engins spatiaux, ces alliages jouent un rôle essentiel dans les composants des moteurs, l'isolation thermique et les structures haute température.

#### 1. Avantages des performances à haute température

Le tungstène et le molybdène, métaux à point de fusion élevé (tungstène environ 3 422 °C, molybdène environ 2 623 °C), confèrent à l'alliage une excellente résistance aux hautes températures et une excellente stabilité thermique. La matrice nickel-fer améliore non seulement la résistance mécanique, mais aussi la compatibilité du matériau à la dilatation thermique et sa résistance à l'oxydation, garantissant ainsi une utilisation stable à long terme dans des environnements thermiques complexes.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Application des composants clés des moteurs d'avion

- **pour les structures de buses et de chambres de combustion,**  
il est adapté à une utilisation comme composants clés à haute température tels que les buses et les chambres de combustion, qui peuvent résister à un flux d'air extrême et à un impact à haute température.
- **Les aubes de turbine et les structures de support**  
améliorent la résistance au fluage à haute température et la durée de vie en fatigue des aubes, garantissant un fonctionnement efficace et à long terme du moteur.

## 3. Matériaux d'isolation thermique et de protection des engins spatiaux

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer joue un double rôle d'isolation thermique : il protège contre les rayonnements à haute température et conduit la chaleur. Sa densité élevée empêche efficacement le transfert de chaleur vers les structures sensibles, tout en offrant une excellente résistance à l'oxydation et à la corrosion, améliorant ainsi la fiabilité des systèmes de protection thermique des engins spatiaux.

## 4. Pièces structurelles et contrepoids aérospatiaux

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont largement utilisés dans les composants structurels et les systèmes de contrepoids des engins spatiaux en raison de leur densité élevée et de leur stabilité mécanique. Leur résistance élevée garantit la sécurité structurelle, tandis que leur stabilité dimensionnelle précise assure l'équilibre dynamique et la fiabilité du système.

## 5. Défis liés à la technologie et aux processus de fabrication

- **La métallurgie des poudres et le traitement thermique optimisent**  
et contrôlent la densité et la microstructure des alliages, améliorant ainsi les performances à haute température et la stabilité thermique.
- **Le traitement de formes complexes**  
utilise un usinage de haute précision et une technologie de renforcement de surface pour répondre aux exigences de fabrication de composants aérospatiaux complexes.
- **La technologie de revêtement antioxydant**  
développe des revêtements à haute efficacité et résistants aux hautes températures pour prolonger la durée de vie des alliages dans des environnements oxydants à haute température.

## VI. Cas typiques de l'industrie

- **L'application de buses en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans un certain type de moteur d'avion**  
a permis d'obtenir une durée de vie ultra-longue des buses dans des environnements à haute température et haute pression grâce à des améliorations dans la composition de l'alliage et le processus de fabrication.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Développement de matériaux d'isolation thermique à haute température pour les engins spatiaux**

De nombreuses agences aérospatiales nationales et étrangères utilisent des alliages de tungstène-molybdène-nickel-fer comme matériaux d'isolation thermique pour assurer la sécurité des systèmes clés.

## 7. Tendances de développement futures

- **La surveillance intelligente des environnements à haute température**  
intègre des capteurs pour surveiller l'état des composants à haute température en temps réel et prévenir les défaillances des matériaux.
- **Recherche et développement de nouveaux matériaux composites :**  
les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont combinés avec des céramiques et d'autres matériaux haute température pour améliorer les performances globales.
- **La conception en alliage léger haute température**  
réduit la densité de l'alliage grâce au microalliage et au nano-renforcement pour atteindre l'objectif de légèreté et de hautes performances.

## 8. Résumé

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, dotés de propriétés mécaniques et d'une stabilité thermique exceptionnelles à haute température, sont devenus un choix incontournable pour les matériaux de structure haute température dans les applications aérospatiales. Grâce à l'innovation continue des matériaux et à l'amélioration des procédés, leurs perspectives d'application dans les technologies aérospatiales futures sont prometteuses et continueront de contribuer au fonctionnement sûr et fiable des équipements aérospatiaux haute performance.

### 6.4 Application de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer en radiothérapie médicale et protection haute densité

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont largement utilisés dans le domaine médical, notamment dans les équipements de radiothérapie et de radioprotection, en raison de leur densité élevée, de leur résistance élevée et de leurs excellentes propriétés de protection contre les radiations. Leurs excellentes propriétés physiques garantissent non seulement la précision des traitements, mais aussi une protection efficace du personnel médical et des patients.

#### 1. Principales applications des équipements de radiothérapie médicale

1. **Protection contre les radiations des équipements de radiothérapie.**  
L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, matériau haute densité, absorbe et protège efficacement des rayons X et gamma, réduit l'impact des radiations sur les zones non traitées et protège les tissus sains du patient.
2. **structurels à haute densité**  
dans les équipements de radiothérapie sont utilisés pour fabriquer des plaques d'isolation, des collimateurs et des couvercles de protection dans les équipements de radiothérapie afin

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de garantir que les rayons irradient avec précision la zone cible, améliorent les effets du traitement et réduisent les effets secondaires.

### 3. Emballages et conteneurs de protection des sources radioactives

Les conteneurs en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer ont d'excellentes propriétés de protection et sont utilisés pour encapsuler les médicaments et les nucléides radioactifs afin d'empêcher les fuites de rayonnement et d'assurer la sécurité opérationnelle.

## 2. Avantages des matériaux de protection haute densité

- **Excellentes performances de blindage**

La haute densité et le numéro atomique élevé de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer lui confèrent une capacité d'absorption importante des rayonnements à haute énergie, ce qui en fait un matériau de radioprotection médicale idéal.

- **De bonnes propriétés mécaniques**

assurent un effet de blindage tandis que l'alliage conserve une bonne résistance et une bonne ténacité, répondant aux exigences de sécurité structurelle des équipements médicaux.

- **Stabilité dimensionnelle et adaptabilité du traitement**

Les capacités de formage et de traitement de précision prennent en charge la fabrication de pièces structurelles complexes et s'adaptent aux diverses exigences de conception des équipements médicaux.

## 3. Cas d'application typiques en radiothérapie médicale

- **Composants de blindage dans les systèmes de radiothérapie par accélérateur linéaire**

De nombreux accélérateurs linéaires nationaux et étrangers avancés utilisent un alliage tungstène-molybdène-nickel-fer pour fabriquer des lames de protection et des couvercles de blindage, améliorant considérablement la sécurité de l'équipement et la précision du traitement.

- **Conteneurs de transport et de stockage de radionucléides**

Les conteneurs en alliage sont largement utilisés dans le secteur de la médecine nucléaire pour assurer le transport et le stockage sûrs des produits radiopharmaceutiques.

## 4. Processus de production et contrôle qualité

- **Le processus de métallurgie des poudres à haute densité**

utilise des matières premières de haute pureté et une technologie de frittage de précision pour garantir que le matériau est dense et non poreux, améliorant ainsi l'efficacité du blindage.

- **Traitement de surface et amélioration de la résistance à la corrosion**

Grâce au revêtement de surface et au traitement thermique, la résistance à la corrosion et la durée de vie de l'alliage sont améliorées.

- **Des normes de test de qualité strictes**

incluent l'analyse de la composition chimique, l'observation de la microstructure et les tests d'efficacité du blindage contre les radiations pour garantir que le produit répond aux exigences de sécurité médicale.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## V. Tendances de développement et innovation technologique

- **La recherche et le développement de matériaux de protection composites fonctionnels** combinent des alliages de tungstène-molybdène-nickel-fer avec des matériaux polymères pour développer des matériaux de radioprotection légers et efficaces afin de réduire le poids des équipements médicaux.
- **Les équipements de protection médicale intelligents** intègrent des capteurs et des systèmes de surveillance pour permettre une surveillance et un contrôle en temps réel des rayonnements pendant la radiothérapie.
- **Les processus de préparation respectueux de l'environnement** favorisent la technologie de fabrication verte, réduisent l'impact environnemental pendant le processus de production et répondent aux exigences de développement durable de l'industrie médicale.

## VI. Résumé

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, grâce à sa densité exceptionnelle et à ses propriétés de protection contre les radiations, joue un rôle essentiel en radiothérapie médicale et en protection haute densité. À l'avenir, grâce aux progrès constants de la science des matériaux et des technologies médicales, cet alliage contribuera à garantir la sécurité des traitements et à améliorer les performances des équipements.

### 6.5 Application de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans les moules de précision et les composants mécaniques résistants à l'usure.

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, avec sa dureté élevée, sa résistance élevée et son excellente résistance à l'usure, présente des avantages significatifs dans la fabrication de moules de précision et de composants mécaniques résistants à l'usure. Ses propriétés physiques et mécaniques supérieures prolongent non seulement la durée de vie des moules, mais améliorent également considérablement la durabilité et la fiabilité des composants mécaniques dans des conditions de fonctionnement difficiles.

#### 1. Principaux avantages de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans les moules de précision

1. **à haute dureté et résistance à l'usure**  
présente une excellente dureté, qui peut résister efficacement à l'usure du moule dans des conditions de haute fréquence et de haute pression, maintenir la stabilité de la taille du moule et assurer la précision et la qualité de surface de la pièce.
2. **Bonne résistance à la fatigue thermique.**  
Lors du formage à grande vitesse et du traitement thermique, la surface du moule est soumise à des cycles thermiques répétés. La grande stabilité thermique de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer lui permet de résister à la fatigue thermique et de réduire l'apparition de fissures et de déformations.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. dimensionnellement stables

présentent peu de changements dimensionnels sous haute température et contrainte mécanique, garantissant que la forme et la taille des moules de précision restent inchangées après une utilisation à long terme, répondant aux exigences de fabrication de haute précision.

## 2. Avantages de l'application dans les pièces mécaniques résistantes à l'usure

### 1. Prolongez la durée de vie des composants mécaniques.

La haute résistance à l'usure de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer réduit considérablement l'usure des pièces mécaniques, diminue la fréquence d'entretien et de remplacement et améliore l'efficacité opérationnelle globale des équipements.

### 2. Adaptable aux conditions de travail extrêmes

, l'alliage peut toujours maintenir des performances stables dans des environnements à haute température, haute pression et corrosifs, et est largement utilisé dans les pièces clés résistantes à l'usure dans les machines minières, les équipements métallurgiques, les machines de fabrication de papier et d'autres industries.

### 3. Bonnes performances de traitement

En optimisant le processus de traitement thermique et de renforcement de surface, un traitement de haute précision de pièces de forme complexe peut être réalisé pour répondre aux exigences de conception de diverses pièces mécaniques.

## 3. Cas d'application typiques

- **Les composants principaux du moule d'injection,**

la tige du noyau du moule et la broche de guidage du moule en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, améliorent considérablement la durée de vie du moule et la précision du moulage et réduisent les coûts de production.

- **Revêtement résistant à l'usure pour équipement minier**

Le revêtement résistant à l'usure en alliage est utilisé pour les concasseurs de minerai et les équipements de transport, prolongeant efficacement le cycle de vie de l'équipement et améliorant l'efficacité de la production.

- **Les bagues de roulement mécaniques à grande vitesse**

bénéficient d'une grande robustesse et d'une grande résistance à l'usure. Les bagues de roulement en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer résistent aux frottements et à l'usure causés par une rotation à grande vitesse.

## 4. Exigences relatives au processus de fabrication

- **Le formage par métallurgie des poudres à haute densité**

utilise une technologie de frittage à haute densité pour garantir l'uniformité et la densité du matériau et améliorer les propriétés mécaniques et la résistance à l'usure.

- **L'usinage de précision et le traitement de surface**

permettent d'obtenir une haute précision et une qualité de surface élevée des moules et des

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pièces résistantes à l'usure grâce aux technologies de meulage, de polissage et de traitement thermique CNC.

- **Les technologies de renforcement de surface**  
comprennent le revêtement PVD, la trempe au laser, etc., qui améliorent encore la dureté de la surface et la résistance à la corrosion et prolongent la durée de vie.

## V. Tendances de développement

- **Technologie de renforcement des nanostructures**  
Les nanoparticules renforcent l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, améliorant la résistance à l'usure et la ténacité, réalisant une percée dans les performances des matériaux de moulage.
- **La fabrication et le recyclage écologiques**  
favorisent une faible consommation d'énergie et des technologies de fabrication à haute efficacité, favorisent le recyclage et la réutilisation des matériaux d'alliage et réduisent l'impact environnemental.
- **La fabrication intelligente intégrée**  
une surveillance intelligente et un contrôle des processus pour réaliser la numérisation et l'automatisation de la fabrication de moules et de composants résistants à l'usure.

## VI. Résumé

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, dotés d'une résistance à l'usure et d'une résistance mécanique supérieures, sont largement utilisés dans les moules de précision et les composants mécaniques résistants à l'usure. À l'avenir, grâce à l'amélioration continue des technologies des matériaux et des procédés de fabrication, leur position dans la fabrication haut de gamme gagnera en importance, propulsant l'industrie vers un développement efficace, précis et durable.

### 6.6 Application composite des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans l'ingénierie environnementale complexe

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, grâce à leurs excellentes propriétés physiques et mécaniques et à leur stabilité chimique, sont largement utilisés dans des applications d'ingénierie dans des environnements variés et complexes. Face à des conditions de fonctionnement extrêmes telles que températures élevées, pressions élevées, rayonnements intenses et corrosion, un seul matériau peine souvent à répondre aux exigences de performance. Cependant, combinés à d'autres matériaux, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer offrent une synergie multifonctionnelle, améliorant considérablement la sécurité et la durabilité des ouvrages d'art.

#### 1. Concept de conception de matériaux composites multifonctionnels

Les matériaux composites en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer adoptent généralement une technologie de composite à base de métal, de renforcement en céramique ou de revêtement de surface pour combiner la haute densité, la haute résistance et la résistance à la chaleur de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer avec les caractéristiques d'autres matériaux pour former un système

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

composite multifonctionnel avec résistance, ténacité, résistance à l'usure, résistance à la corrosion et résistance aux radiations.

## 2. Scénarios d'application composites typiques

### 1. Les matériaux de blindage composites de l'industrie nucléaire sont

composés d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, associés à des polymères, des céramiques ou des matériaux à base de plomb. Ils permettent de fabriquer des blindages neutroniques et gamma à haute efficacité, prenant en compte à la fois le contrôle du poids et l'efficacité du blindage. Ils sont largement utilisés dans les réacteurs nucléaires, la radiothérapie et le traitement des déchets nucléaires.

### 2. Les pièces structurales composites destinées aux environnements corrosifs à haute température

sont combinées à des revêtements céramiques résistants aux hautes températures, à des renforts en fibres d'alumine et de carbure de silicium et à des matériaux composites en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer pour améliorer la résistance à l'oxydation et à la corrosion à haute température. Elles conviennent aux composants clés des turbines à gaz, des fours à haute température et d'autres équipements.

### 3. Les composants composites résistants à l'usure destinés aux environnements à contraintes mécaniques extrêmes

utilisent une couche durcie en surface et des composites renforcés de particules de céramique pour améliorer la résistance à l'usure et la durée de vie en fatigue des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. Ils sont largement utilisés dans les machines minières, les équipements métallurgiques et la construction navale.

### 4. La structure de protection composite du vaisseau spatial

est constituée d'un alliage tungstène-molybdène-nickel-fer et de plastique renforcé de fibres de carbone, qui prend en compte à la fois la structure légère et les performances de protection à haute résistance, et est utilisée dans les boucliers de protection du vaisseau spatial et les systèmes de contrepoids inertiels.

## 3. Processus de fabrication et défis techniques

### • Collage d'interface et coordination des contraintes

La qualité du collage d'interface multiphasé dans les matériaux composites affecte directement les performances globales. Il est nécessaire d'améliorer la résistance du collage d'interface et la compatibilité de la dilatation thermique grâce à une technologie de collage avancée et à l'optimisation de l'ingénierie d'interface.

### • La technologie de traitement collaboratif multi-matériaux

combine la métallurgie des poudres, le pressage isostatique à chaud, le revêtement laser et la fabrication additive pour réaliser la fabrication de formes complexes et de structures composites hautes performances.

### • La conception à gradient de performance

permet d'obtenir une combinaison efficace de dureté de surface et de couche interne

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistante grâce à la conception à gradient fonctionnel du matériau, améliorant ainsi la résistance aux chocs et à l'usure.

#### IV. Cas typiques de l'industrie

- **Matériaux composites de protection contre les radiations des centrales nucléaires**  
De nombreuses centrales nucléaires utilisent des matériaux composites à base d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer pour obtenir l'équilibre optimal entre l'effet de blindage et la résistance structurelle.
- **La couche protectrice des aubes de turbine à gaz à haute température**  
est composée d'un revêtement en céramique et d'une matrice en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer pour améliorer la résistance des aubes à la corrosion et à l'usure à haute température.
- **Pour l'ingénierie marine, des composants composites résistants à la corrosion et à l'usure**  
sont utilisés dans les pompes, les vannes et les structures de plates-formes marines, prolongeant considérablement leur durée de vie.

#### V. Tendances futures du développement

- **Le système de matériaux composites intelligents**  
développe des matériaux composites intelligents en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer avec des fonctions d'auto-réparation et de surveillance de détection pour améliorer la sécurité des structures d'ingénierie.
- **La fabrication verte et les matériaux composites recyclables**  
favorisent les technologies de fabrication respectueuses de l'environnement, augmentent les taux de recyclage des matériaux et répondent aux exigences du développement durable.
- **La conception structurelle intégrée multifonctionnelle haute performance**  
intègre la structure, la fonction et l'adaptabilité environnementale pour créer un matériau intelligent composite en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer adapté aux conditions de travail extrêmes.

#### VI. Résumé

L'application combinée des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans l'ingénierie environnementale complexe a considérablement élargi leurs fonctionnalités et leur champ d'application. Grâce à la composition des matériaux et à l'intégration multi-processus, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer répondent non seulement aux exigences de performance en conditions de travail extrêmes, mais offrent également des solutions diversifiées pour le secteur de l'ingénierie, favorisant l'innovation et la modernisation des technologies industrielles associées.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Chapitre 7 Système standard et exigences de conformité pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

### 7.1 Résumé des nuances et normes industrielles des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer chinois (GB/YS)

En tant que matériau métallique haute performance, l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer bénéficie d'un large champ d'application et d'un cadre réglementaire étendu en Chine. Afin de réguler la production, de garantir la qualité des produits et de promouvoir le développement sain de l'industrie, le gouvernement et l'industrie ont élaboré une série de normes pertinentes définissant clairement les nuances, la composition, les performances et les méthodes d'essai des alliages.

#### 1. Principal système de marque d'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer en Chine

Les nuances d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer de la Chine sont principalement basées sur la composition et les performances, combinées aux règles de dénomination des normes nationales (GB) et des normes industrielles (YS), comprenant principalement :

- **Alliage tungstène-molybdène-nickel-fer haute densité** : à base de tungstène (W) et de molybdène (Mo) à haute teneur, avec du nickel (Ni) et du fer (Fe) comme métaux de liaison. Les nuances sont généralement nommées en fonction de leur teneur en tungstène et de leurs principaux indicateurs de performance, tels que WMoNiFe-90, WMoNiFe-95, etc.
- **Nuances d'alliages fonctionnels spéciaux** : les nuances spéciales sont conçues pour différents domaines d'application (tels que la résistance aux températures élevées, la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance à la corrosion et la résistance à l'usure) avec des ajustements de composition clairs et des indicateurs de performance.

## II. Aperçu des principales normes nationales (GB)

Les normes nationales chinoises couvrent les matières premières, le contrôle de la composition, les propriétés mécaniques et chimiques, ainsi que les méthodes d'essai des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. Parmi les normes représentatives, on peut citer :

- **Les conditions techniques générales GB/T XXXX-XXXX pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer**  
spécifient la gamme de composition chimique, les propriétés mécaniques, les tolérances dimensionnelles et les exigences de qualité de surface des alliages.
- **La spécification du procédé de métallurgie des poudres d'alliage de tungstène-molybdène-nickel-fer GB/T XXXX-XXXX**  
établit des normes de contrôle de processus pour les processus de préparation, de pressage et de frittage des poudres.
- **Les méthodes de test de performance des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer GB/T XXXX-XXXX**  
comprennent l'observation de la microstructure, les tests de densité, les tests de dureté et les méthodes de test des propriétés mécaniques.

## 3. Prise en charge des normes industrielles (YS)

- Les normes industrielles sont principalement formulées par les départements concernés tels que la métallurgie, les matériaux et l'industrie militaire, fournissant des spécifications plus détaillées pour des utilisations spécifiques et des exigences techniques pour garantir la qualité et la sécurité des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans des domaines clés.
- Par exemple, **les exigences techniques de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer haute performance YS/T XXXX-XXXX** conviennent aux domaines haut de gamme tels que l'industrie aérospatiale et nucléaire.

## IV. Rôle et mise en œuvre du système de normes

- **Garantir la qualité des produits**  
grâce à un système unifié d'indices de marque et de performance pour assurer la cohérence et l'interchangeabilité des produits de différents fabricants.
- **Promouvoir**  
les normes de modernisation industrielle pour promouvoir l'application standardisée de nouveaux matériaux et de nouveaux procédés, et contribuer à améliorer le progrès technologique industriel et la compétitivité du marché.
- **Soutenir les exportations pour s'aligner sur**  
les normes internationales, se référer aux normes nationales avec les normes internationales et améliorer la reconnaissance internationale des produits nationaux en alliage de tungstène-molybdène-nickel-fer.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5. Tendance de développement de la normalisation

- **Perfectionnement et amélioration du système standard :**  
Avec le développement de la technologie, des normes d'application et des méthodes de test plus segmentées seront introduites pour répondre à des besoins divers.
- **Les normes de fabrication verte et de protection de l'environnement**  
mettent l'accent sur l'établissement de normes de protection de l'environnement dans le processus de production, le recyclage des matériaux et l'utilisation durable.
- **Les normes de soutien à la fabrication intelligente**  
favorisent l'établissement de normes de production intelligente, de surveillance de la qualité en ligne et de gestion numérique.

## VI. Résumé

Le système de normes chinois pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer couvre les nuances de matériaux, les spécifications des procédés, les tests de performance et d'autres aspects, offrant ainsi une base technique solide à l'industrie. Avec les progrès technologiques et l'évolution de la demande du marché, le système de normes continuera de s'améliorer, favorisant ainsi le développement sain et durable de l'industrie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

### 7.2 Spécifications des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans les normes ASTM/MIL

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, grâce à leur densité élevée, leur résistance élevée et leurs excellentes performances globales, sont largement utilisés dans des secteurs clés tels que l'aérospatiale, l'armée et l'énergie nucléaire. Afin de garantir la fiabilité et la sécurité de ces applications, les États-Unis ont établi plusieurs normes pertinentes, principalement l'ASTM (American Society for Testing and Materials) et la MIL (Military Standards). Ces normes détaillent les exigences relatives aux matériaux, les méthodes d'essai et les processus de contrôle qualité des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

#### 1. Système de normes ASTM

En tant qu'organisme de normalisation des matériaux de renommée internationale, l'ASTM a publié des normes relatives aux alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, couvrant la composition chimique, les propriétés mécaniques, le procédé de préparation et les méthodes d'essai de ces alliages. Parmi les normes couramment utilisées, on trouve :

- **ASTM B777** – Spécification technique pour les tiges en alliage lourd à base de tungstène définit la plage de composition chimique, les propriétés mécaniques (par exemple, la résistance à la traction, la dureté) et les tolérances dimensionnelles pour les alliages à haute densité tels que le tungstène, le molybdène, le nickel et le fer.
- **La norme ASTM E8/E8M** - Méthodes d'essai de traction pour les matériaux métalliques spécifie les procédures standard pour les essais de traction et s'applique à l'évaluation des propriétés mécaniques des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ASTM E18** – Norme d’essai de dureté couvrant les méthodes de mesure de dureté Rockwell, Vickers et Brinell, garantissant une détermination précise de la dureté des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.
- **La norme ASTM E112** – Évaluation des microstructures métalliques fournit des méthodes d’observation microstructurale et de détermination de la taille des grains pour soutenir l’analyse microstructurale des alliages.

## 2. Norme militaire MIL

En tant que spécification importante pour le contrôle de la qualité des matériaux militaires, la norme MIL propose des exigences plus strictes pour l'application des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, notamment :

- **MIL-DTL-46008** – Spécification des matériaux pour alliages à base de tungstène haute densité. Cette spécification définit la composition chimique, les propriétés mécaniques, les procédés de traitement thermique et les méthodes d’essai des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, garantissant ainsi la conformité des alliages militaires aux exigences des environnements de service extrêmes.
- **MIL-STD-810** - Considérations d'ingénierie environnementale et méthodes d'essai en laboratoire  
- Bien qu'elle ne limite pas directement la composition du matériau, elle fournit une base de test pour l'environnement de service des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, comme la température, les chocs, les vibrations, etc.
- **La norme MIL-STD-461** – Exigences de contrôle des interférences électromagnétiques (EMI) spécifie les performances de compatibilité électromagnétique des composants en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer utilisés dans les équipements militaires.

## 3. Comparaison du contenu de base standard

aspect	normes ASTM	Norme MIL
<b>Champ d'application</b>	Matériaux en alliage à base de tungstène à usage civil et militaire	Spécialement conçu pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer hautes performances militaires
<b>Contrôle de la composition chimique</b>	Dispositions détaillées concernant les teneurs en tungstène, molybdène, nickel et fer	Plus strict, mettant l'accent sur la pureté et la stabilité des ingrédients
<b>Propriétés mécaniques</b>	Indicateurs tels que la résistance à la traction, la dureté et l'allongement	Une attention particulière est portée à la résistance à la fatigue et aux performances à haute température
<b>Méthodes d'essai</b>	Essais normalisés de traction, de dureté et de microstructure	Test de simulation complet combiné à un environnement de service

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Gestion de la qualité</b>	Normalisation du processus de production et contrôle final	Accent mis sur le contrôle des processus et la fiabilité des performances du service
------------------------------	--	--

#### IV. Mise en œuvre et certification

- Assurance qualité de la chaîne d'approvisionnement**  
 Les fabricants d'alliages W-Mo-Ni-Fe doivent établir un système de gestion de la qualité complet conformément aux normes ASTM et MIL pour garantir la cohérence et la fiabilité des produits.
- L'équipement de test et la certification du laboratoire**  
 doivent être équipés d'équipements de test répondant aux exigences des normes, et le laboratoire doit passer la certification pour garantir l'exactitude et la traçabilité des résultats des tests.
- Mise à jour des normes et amélioration technique**  
 Les organismes de normalisation révisent régulièrement les spécifications pertinentes pour améliorer le niveau de normalisation des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer en combinaison avec les progrès de la technologie des matériaux et les besoins d'application.

#### V. Tendances de développement

- Les normes internationales intègrent**  
 les normes ASTM et MIL et se connectent progressivement aux normes internationales telles que l'ISO pour promouvoir la normalisation et la reconnaissance mutuelle de l'industrie mondiale des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.
- Les mises à niveau standard axées sur les performances**  
 sont passées du contrôle traditionnel de la composition et de la taille aux performances fonctionnelles, à la durée de vie et à l'adaptabilité environnementale.
- La fabrication intelligente et la gestion de la qualité numérique**  
 introduisent la technologie de détection numérique et l'analyse des mégadonnées pour réaliser une surveillance de la qualité en temps réel et une maintenance prédictive.

#### VI. Résumé

Les normes ASTM et MIL fournissent des spécifications systématiques pour la conception, la production et l'application des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, garantissant la sécurité et la stabilité des matériaux dans les applications critiques. Avec les progrès technologiques, les normes pertinentes sont constamment affinées, favorisant ainsi l'innovation et la modernisation continues du secteur des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

#### 7.3 Normes UE/ISO relatives aux exigences relatives aux matériaux en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

En tant que matériaux hautes performances clés, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont soumis à des normes de qualité et de sécurité strictes à l'échelle mondiale, notamment au sein des

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

États membres de l'UE et de l'Organisation internationale de normalisation (ISO). Ces normes européennes et ISO couvrent non seulement la composition chimique et les propriétés mécaniques, mais aussi la protection de l'environnement, la sécurité des matériaux et la fabrication durable, garantissant ainsi la conformité et la compétitivité de l'alliage sur le marché international.

## 1. Cadre normatif de l'UE relatif aux alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

L'UE réglemente les matériaux en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer au moyen de multiples réglementations et systèmes de normes, dont le contenu principal comprend :

- **Les normes,**  
élaborées par l'organisme de normalisation de l'Union européenne, fournissent des spécifications techniques pour la composition chimique, les propriétés mécaniques et les tolérances dimensionnelles des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. Par exemple, la norme EN 12502-1 traite du contrôle qualité des alliages haute densité à base de tungstène.
- **Règlement REACH (Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques)**  
Le règlement REACH exige que les fabricants et les fournisseurs d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer enregistrent, évaluent et déclarent toutes les substances chimiques contenues dans leurs produits, contrôlent les substances dangereuses et garantissent que les matériaux répondent aux exigences environnementales et de sécurité.
- **La directive RoHS (Restriction des substances dangereuses)**  
restreint l'utilisation de certaines substances dangereuses, telles que le plomb, le mercure et le cadmium, dans les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer et les produits électroniques associés, favorisant l'utilisation de matériaux verts et respectueux de l'environnement.
- **Conformité au marquage CE :**  
L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, en tant que matériau composant clé, doit être conforme aux normes de certification CE lorsqu'il est utilisé dans des équipements mécaniques et des produits électroniques afin de garantir que les produits répondent aux exigences de sécurité, de santé et d'environnement de l'UE.

## 2. Alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans le système de normes internationales ISO

L'ISO, organisation internationale de normalisation reconnue mondialement, a publié de nombreuses normes portant sur les propriétés des matériaux, les méthodes d'essai et la gestion de la qualité. Parmi les points saillants, on peut citer :

- **ISO 9001 - Système de gestion de la qualité**  
Les fabricants d'alliages W-Mo-Ni-Fe doivent établir un système de gestion de la qualité conforme à la norme ISO 9001 pour garantir la normalisation de la conception, de la fabrication et du service des produits.
- **La norme ISO 4948 – Classification des matériaux métalliques,**  
y compris les principes de classification des alliages de tungstène et de molybdène, fournit une norme internationale harmonisée pour la nomenclature et la classification des alliages de tungstène-molybdène-nickel-fer.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ISO 6507 / ISO 6508** – Essais de dureté  
spécifient les méthodes d'essai pour la dureté Vickers et la dureté Brinell, et sont applicables à l'évaluation des performances de dureté des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.
- **La norme ISO 6892** – Les méthodes d'essai de traction  
sont utilisées pour déterminer les propriétés de traction des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer afin de garantir que le matériau répond aux spécifications mécaniques de conception.
- **La norme ISO/TR 16266** – Rapport technique sur la gestion environnementale des matériaux en métaux rares  
se concentre sur l'évaluation de l'impact environnemental et la gestion du tungstène et de ses alliages, favorisant ainsi la fabrication verte.

### 3. Exigences complètes des normes UE/ISO

- **Les exigences de composition et de performance**  
stipulent clairement la gamme de teneur et les limites d'impuretés du tungstène, du molybdène, du nickel et du fer pour garantir des performances matérielles stables et fiables.
- **La conformité environnementale**  
met l'accent sur la restriction et la substitution des substances dangereuses dans les matériaux, est conforme aux réglementations environnementales de l'UE et soutient les stratégies de développement durable.
- **Les normes de sécurité et de santé**  
ciblent les précautions de sécurité pendant les processus de fabrication et d'application afin de protéger la santé des travailleurs et la sécurité des utilisateurs.
- **Les procédures de test et de certification**  
nécessitent des tests stricts des propriétés physiques et chimiques, des tests non destructifs et un contrôle des processus de production pour garantir la qualité du produit.

### IV. Défis de mise en œuvre et stratégies de réponse

- **En raison de la diversité et des mises à jour fréquentes des réglementations,**  
les entreprises doivent continuer à prêter attention aux évolutions réglementaires européennes et internationales et ajuster leurs systèmes de production et de gestion en temps opportun.
- **L'équilibre entre les normes techniques et les exigences de protection de l'environnement**  
tout en garantissant la performance des matériaux favorise le développement et l'application de technologies vertes de protection de l'environnement.
- **Connectez-vous au système de certification international**  
et renforcez la coopération avec les organismes de certification internationaux pour parvenir à une reconnaissance mutuelle des normes et promouvoir le commerce d'exportation.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## V. Tendances futures du développement

- **La normalisation des matériaux en alliages verts tungstène-molybdène-nickel-fer** renforce la formulation de normes pour les matériaux respectueux de l'environnement et favorise les technologies de fabrication et de recyclage à faible émission de carbone.
- **Les normes de fabrication intelligente et de gestion de la qualité numérique** introduisent des technologies de big data et d'intelligence artificielle pour réaliser une surveillance et une optimisation intelligentes de la production d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.
- **L'intégration et le développement coordonné des normes mondiales** favorisent la coordination et la cohérence des normes ISO, EN, ASTM et autres normes régionales, et favorisent les normes unifiées de l'industrie mondiale des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

### Résumé :

Les normes européennes et ISO fournissent une réglementation complète pour la production et l'application des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, couvrant les exigences tout au long de leur cycle de vie, de la composition chimique à la conformité environnementale, des propriétés mécaniques à la gestion de la qualité. Les entreprises doivent intégrer les exigences réglementaires internationales et améliorer continuellement leur technologie et leur gestion afin de promouvoir un développement de haute qualité, écologique et durable de l'industrie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

## 7.4 Réglementations environnementales et certification de sécurité des matériaux (RoHS/REACH) pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Dans un contexte mondial axé sur la protection de l'environnement et le développement durable, la production et l'application des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, en tant que matériau stratégique clé, doivent respecter scrupuleusement une série de réglementations environnementales internationales et d'exigences de certification de sécurité des matériaux, notamment les réglementations RoHS et REACH de l'UE. Ces réglementations affectent non seulement l'approvisionnement en matières premières, les procédés de production et la conception des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, mais aussi leur commerce international et leur accès aux marchés.

### 1. Directive RoHS (Restriction des substances dangereuses)

- **vise** à restreindre l'utilisation de substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques, prévenant ainsi les dommages causés à l'environnement et à la santé humaine par le plomb, le mercure, le cadmium et les polybromobiphényles (PBDP). Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, matériaux clés dans des secteurs comme l'électronique et l'aéronautique, doivent respecter les restrictions RoHS.
- **Les substances restreintes pertinentes dans l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer** se concentrent sur les limites de teneur en plomb (Pb), cadmium (Cd), mercure (Hg),

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chrome hexavalent (Cr6+), polybromobiphényles (PBB) et polybromodiphényléthers (PBDE), exigeant que la teneur dans les produits et matériaux ne dépasse pas les limites spécifiées (généralement 0,1 % ou 0,01 %).

- **Stratégie de conformité :**

Les fabricants d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer doivent contrôler strictement l'approvisionnement en matières premières, éviter d'utiliser des matières premières contenant des substances restreintes et établir un système complet de suivi de la chaîne d'approvisionnement et de test des ingrédients pour garantir que leurs produits sont conformes aux exigences RoHS.

- **Processus de certification et étiquetage**

Les entreprises doivent vérifier que leurs produits sont conformes à la directive RoHS par l'intermédiaire d'un organisme de test tiers, obtenir une déclaration de conformité et appliquer les étiquettes appropriées sur leurs produits et emballages pour répondre aux exigences d'accès au marché de l'UE.

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

- REACH, officiellement mis en œuvre dans l'UE en 2007, est le règlement de gestion des produits chimiques le plus complet et le plus strict à ce jour. Il exige que toutes les substances chimiques produites ou importées sur le marché de l'UE soient soumises à un enregistrement, une évaluation et une autorisation afin de garantir leur utilisation en toute sécurité.

- **Impact sur les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer :**

Si les éléments métalliques et les additifs d'alliage des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont inclus dans la liste réglementaire REACH, les entreprises doivent procéder à l'enregistrement et à l'évaluation correspondants. En particulier, s'agissant des matériaux métalliques sous forme de poudre, les risques potentiels pour l'environnement et la santé humaine liés à la taille des particules et au traitement de surface doivent faire l'objet d'une attention particulière.

- **Exigences relatives aux fiches de données de sécurité (FDS) :**

Les produits en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer doivent être équipés d'une FDS conforme aux exigences REACH, détaillant les ingrédients, les informations sur les dangers, le fonctionnement sûr et les mesures d'urgence pour protéger le droit de savoir des utilisateurs et de la chaîne d'approvisionnement.

- **Responsabilité de la chaîne d'approvisionnement :**

les fabricants, les importateurs et les utilisateurs en aval doivent travailler ensemble pour garantir la transparence des informations et la mise en œuvre de la responsabilité, et promouvoir une gestion verte de la chaîne d'approvisionnement.

## 3. Autres certifications et réglementations environnementales pertinentes

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Directive RoHS 3 et mises à jour ultérieures**

La directive RoHS continue d'être mise à jour, ajoutant une liste de substances restreintes, obligeant les entreprises d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer à maintenir une surveillance dynamique et à réagir rapidement aux changements réglementaires.

- **Les réglementations environnementales internationales convergent.**

La Californie, la Corée du Sud, le Japon, la Chine et d'autres pays ont également introduit des réglementations similaires à RoHS/REACH, favorisant ainsi l'internationalisation des normes de protection environnementale dans l'industrie mondiale des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

- **Fabrication verte et économie circulaire**

Les entreprises d'alliages de tungstène-molybdène-nickel-fer mettent progressivement en œuvre une conception verte, des économies d'énergie et une réduction des émissions, ainsi que le recyclage des matériaux pour répondre à la stratégie mondiale de développement durable.

#### IV. Défis de mise en œuvre et contre-mesures

- **Les réglementations complexes et en constante évolution**

nécessitent la mise en place d'une équipe dédiée à la conformité réglementaire pour suivre les évolutions réglementaires et ajuster la conception des produits et la gestion de la chaîne d'approvisionnement.

- **Coûts des tests et de la certification :**

Renforcez les capacités de test internes, coopérez avec les organismes de certification, réduisez les coûts de conformité et améliorez l'efficacité des tests.

- **L'innovation technologique stimule**

la recherche et le développement de formules d'alliages et de procédés de production à faible impact environnemental et favorise une fabrication sans danger.

#### V. Résumé

Les réglementations environnementales et la certification de la sécurité des matériaux sont devenues essentielles pour l'industrie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. En se conformant pleinement aux réglementations telles que RoHS et REACH, et en améliorant la gestion des données de sécurité et les systèmes de fabrication écologiques, les entreprises du secteur renforcent non seulement leur compétitivité sur le marché, mais contribuent également à la protection de l'environnement mondial et favorisent un développement durable et de haute qualité de l'industrie.

#### 7.5 Système qualité pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans les domaines aéronautique, nucléaire et médical (AS9100 / ISO13485)

Matériau stratégique clé, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont de plus en plus utilisés dans des secteurs haut de gamme tels que l'aérospatiale, l'énergie nucléaire et les équipements médicaux. Ces secteurs imposent des exigences extrêmement élevées en matière de qualité, de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sécurité et de traçabilité des matériaux. Par conséquent, la mise en œuvre de systèmes de gestion de la qualité pertinents est devenue essentielle pour garantir la performance et la fiabilité des produits en alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

## 1. Application du système de gestion de la qualité AS9100 dans le domaine aérospatial

- **Introduction à la norme AS9100 La**

norme AS9100 est une norme de système de gestion de la qualité conçue spécifiquement pour l'industrie aérospatiale, basée sur la norme ISO 9001. Elle renforce les exigences de sécurité, de conformité réglementaire, de gestion des risques et d'amélioration continue.

- **Applicabilité de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer :**

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont utilisés dans des applications aérospatiales clés telles que les contrepoids inertiels, les composants élastiques et les pièces structurelles haute température. Le système AS9100 garantit un approvisionnement en matériaux conforme à des spécifications techniques et à des processus de fabrication stricts.

- **Configuration requise**

- **Gestion des risques** : Identifier et contrôler les risques liés à la performance des matériaux et à la chaîne d'approvisionnement.
- **Contrôle de conception** : prend en charge la gestion standardisée de la formule et du processus d'alliage.
- **Suivi des processus** : Mettre en œuvre un contrôle qualité tout au long du processus, y compris les matières premières, le traitement, les tests et la livraison.
- **Gestion de la chaîne d'approvisionnement** : assurer l'assurance qualité des fournisseurs et la conformité aux réglementations de l'industrie.
- **Traçabilité** : Réalisez un suivi complet du processus des lots d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer et des composants d'application.

## II. Gestion de la qualité et normes de sécurité dans le secteur de l'énergie nucléaire

- **Caractéristiques de l'industrie nucléaire :**

Le secteur de l'énergie nucléaire impose des exigences extrêmement élevées en matière de stabilité aux radiations, de performance à haute température, de sécurité et de fiabilité des matériaux. Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont principalement utilisés dans les structures d'absorption neutronique et les dispositifs de blindage.

- **Normes applicables**

- **ISO 19443** : Exigences spécifiques pour le management de la qualité dans l'industrie nucléaire.
- **NQA- 1** : La norme américaine d'assurance qualité nucléaire couvrant la conception, l'approvisionnement, la fabrication et l'inspection.
- **Code ASME sur les équipements nucléaires** : normalise la conception et la fabrication d'équipements et de matériaux nucléaires.

- **Points clés de la mise en œuvre du système qualité**

- **Vérification des performances des matériaux** : testez strictement la stabilité aux radiations et la résistance à la corrosion.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Management de la sécurité** : garantir la conformité des matériaux et des produits aux réglementations de sûreté nucléaire.
- **Contrôle des documents et tenue des registres** : répondre aux besoins de traçabilité et d'audit à long terme de l'industrie de l'énergie nucléaire.

### 3. ISO 13485 Système de gestion de la qualité dans le domaine médical

- **Introduction à la norme ISO 13485**

La norme ISO 13485 est une norme de système de gestion de la qualité pour l'industrie des dispositifs médicaux, mettant l'accent sur la gestion des risques, le contrôle de la conception et la conformité réglementaire pour garantir la sécurité et l'efficacité des matériaux et dispositifs médicaux.

- **Les applications médicales des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer**

sont utilisées dans les dispositifs de radiothérapie, les matériaux de blindage médical et les composants structurels haute densité. Ces matériaux doivent respecter des normes de biocompatibilité et de qualité strictes.

- **Exigences fondamentales du système qualité**

- **Contrôle de la conception et du développement** : garantir que la formulation et les performances des matériaux répondent aux exigences des dispositifs médicaux.
- **Gestion des risques et évaluation clinique** : Évaluer la sécurité des matériaux et les risques d'application.
- **Supply chain et gestion des achats** : assurer la conformité des matières premières et des produits semi-finis.
- **Vérification et validation** : Assurez la qualité du produit et des performances stables grâce à des tests stricts.

### 4. Intégration des systèmes de gestion de la qualité intersectoriels

- **Stratégie d'intégration système** :

les entreprises d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer doivent généralement respecter simultanément plusieurs normes industrielles. L'intégration des normes AS9100, ISO 13485 et celles du secteur de l'énergie nucléaire permet de mettre en place une plateforme unifiée de gestion de la qualité.

- **L'amélioration continue et l'innovation**

utilisent le système de qualité pour promouvoir l'optimisation des processus de production, promouvoir l'innovation technologique et améliorer les performances des matériaux.

- **La gestion de l'information**

introduit des systèmes d'information tels que l'ERP et le MES pour réaliser la gestion numérique des données produit, le contrôle des processus et la traçabilité de la qualité.

### 5. Le rôle du système qualité dans la promotion du développement de l'industrie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Améliorer la compétitivité des produits.**  
Un contrôle qualité rigoureux et une certification renforcent la confiance du marché et contribuent au développement de domaines d'application haut de gamme.
- **Assurer la sécurité et la conformité**  
pour répondre aux exigences de sécurité et de réglementation dans les domaines à haut risque tels que l'aviation, l'énergie nucléaire et la médecine, et réduire les risques d'utilisation.
- **Promouvoir le commerce international**  
grâce à une certification de qualité reconnue internationalement, simplifier les processus d'exportation et élargir les marchés mondiaux.

## VI. Résumé

Les secteurs de l'aviation, de l'énergie nucléaire et de la médecine imposent des normes très strictes en matière de gestion de la qualité des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. Les normes AS9100, ISO 13485 et les normes de qualité associées à l'énergie nucléaire fournissent un cadre de gestion systématique pour l'industrie. La mise en œuvre et l'optimisation complètes de ces systèmes qualité contribueront à propulser l'industrie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer vers un développement international, standardisé et de haute qualité.

## 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

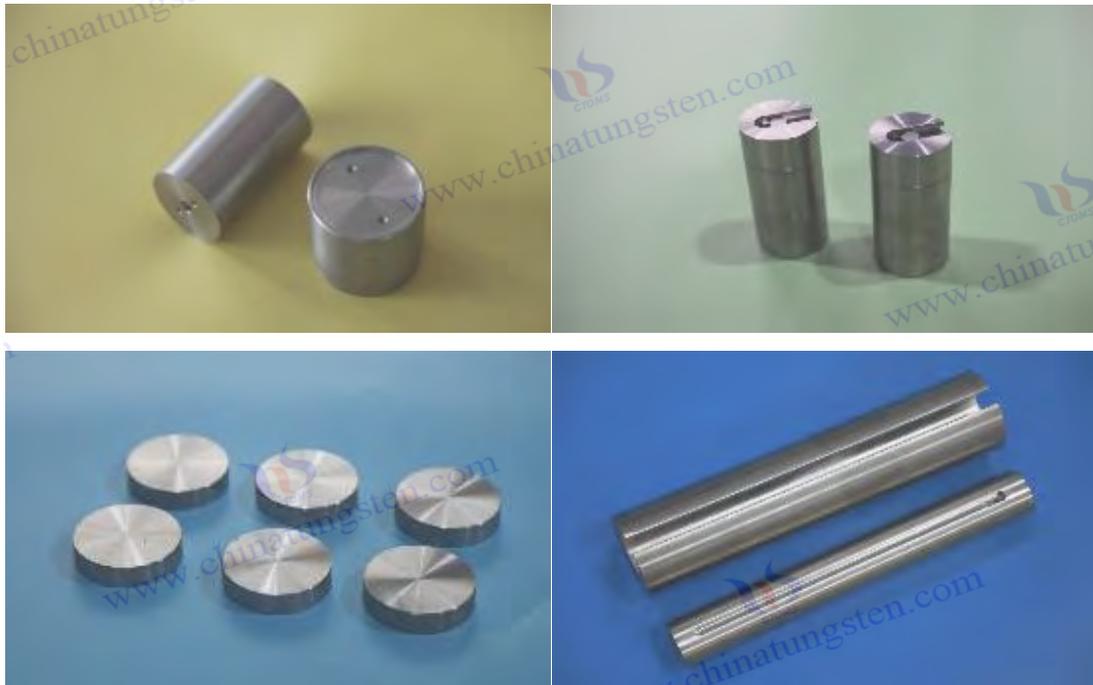
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 8 Spécifications pour l'emballage, le stockage, le transport et l'utilisation des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

### 8.1 Conception de l'emballage et de la protection du transport de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

En tant que matériau stratégique clé, à haute densité et hautes performances, l'emballage et le transport des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont essentiels pour garantir la qualité du produit, la stabilité de ses performances et la sécurité de sa livraison. Des solutions d'emballage et des mesures de protection du transport bien conçues permettent de prévenir efficacement les dommages physiques, les impacts environnementaux et la corrosion chimique, garantissant ainsi l'intégrité et les performances du matériau.

#### 1. Exigences de base pour l'emballage des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

##### 1. de protection

doit garantir que les barres ou pièces en alliage sont protégées des chocs mécaniques, des vibrations et de la compression pendant la manipulation et le transport, et éviter toute déformation, rupture ou dommage de surface.

##### 2. molybdène

-nickel-fer présentent une excellente stabilité chimique. Cependant, ils peuvent s'oxyder ou se corroder s'ils sont exposés à l'humidité ou à des gaz corrosifs pendant une période prolongée. L'emballage doit être scellé ou étanche à l'humidité afin d'empêcher la pénétration de vapeur d'eau et de produits corrosifs.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Taille et empilage raisonnables

Le plan d'emballage doit être raisonnablement organisé en fonction de la taille, du poids et de la forme des produits en alliage pour éviter la concentration de contraintes ou la déformation causée par un empilage incorrect.

### 4. Étiquetage et identification clairs :

Le modèle du produit, le numéro de lot, le poids et les informations sur les matières dangereuses (le cas échéant) doivent être marqués à l'extérieur de l'emballage pour garantir une identification et une traçabilité rapides pendant le transport et le stockage.

## 2. Formes d'emballage courantes de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

### 1. Emballage en boîte en bois

- Utilisez des caisses en bois renforcées, équipées de matériaux absorbant les chocs (tels que de la mousse, de l'éponge EPE) à l'intérieur pour protéger la surface du produit.
- Convient aux barres d'alliage et aux produits finis de taille moyenne et grande, facile à manipuler mécaniquement.

### 2. Plateaux et supports en métal

- Pour les grandes quantités ou les produits de grande taille, utilisez des palettes avec des sangles ou des tapis antidérapants pour assurer la stabilité du transport.

### 3. Film plastique et emballage sous vide

- Les produits de haute pureté ou facilement oxydables sont conditionnés dans des emballages sous vide ou remplis d'azote pour prolonger considérablement leur durée de conservation.
- L'emballage en film plastique combiné à un déshydratant empêche efficacement l'intrusion d'humidité.

### 4. Solutions d'emballage composites

- Pour les produits haut de gamme, un système de protection multicouche combinant une couche tampon de doublure intérieure, un sac d'étanchéité sous vide et une boîte extérieure est utilisé pour améliorer les performances de protection complètes.

## 3. Points clés de la conception de la protection des transports

### 1. Conception anti-vibration et résistante aux chocs

- Utilisez des matériaux d'amortissement (mousse, coussinets en caoutchouc, coussins d'air, etc.) pour réduire l'impact des vibrations du transport sur la structure en alliage.
- Concevez des dispositifs résistants aux chocs pour empêcher les objets de bouger et de provoquer des collisions.

### 2. Conception adaptable à l'environnement

- En fonction de l'itinéraire de transport et des conditions climatiques, choisissez des matériaux d'emballage imperméables, résistants à l'humidité et aux embruns salins.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Installez des déshumidificateurs à l'intérieur des conteneurs d'expédition pour contrôler l'humidité.

### 3. Conformité en matière de transport de marchandises dangereuses

- La poudre d'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer peut être classée comme marchandise dangereuse à certaines tailles de particules et dans certains états, et doit être déclarée et protégée conformément aux réglementations internationales de transport (telles que l'IATA et l'IMDG).
- L'emballage doit répondre aux normes ignifuges, antidéflagrantes et antifuites.

### 4. Contrôle et inspection de la qualité de l'emballage

- **La qualité des matériaux d'emballage**  
doit être régulièrement inspectée pour leur résistance à la pression, leur résistance à la corrosion et leurs propriétés d'étanchéité afin de garantir qu'ils répondent aux exigences de transport.
- **Supervision du processus d'emballage :**  
formuler des procédures opérationnelles standard pour l'emballage, surveiller strictement la qualité de l'emballage et prévenir les erreurs opérationnelles humaines.
- **Inspection d'usine**  
Une fois l'emballage terminé, une inspection d'apparence et un test d'étanchéité doivent être effectués pour garantir que l'emballage est intact.

### 5. Étude de cas : Conception d'emballages d'exportation en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

- Un fabricant d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer adopte une solution d'emballage de protection multicouche pour répondre aux besoins des clients étrangers haut de gamme.
- Les produits sont d'abord emballés dans des sacs sous vide résistants à l'humidité, puis placés dans des boîtes de rembourrage doublées de mousse, et enfin placés dans des boîtes en bois renforcées avec des sangles antichoc et des étiquettes transparentes à l'extérieur.
- Après des tests de transport maritime et terrestre sur de longues distances, les produits ne présentent aucun dommage de surface ni changement de performance, et la satisfaction des clients est élevée.

### VI. Conclusion :

Une conception scientifiquement rigoureuse des emballages et des protections de transport garantit non seulement la qualité et les performances des produits en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, mais améliore également efficacement la satisfaction client et la compétitivité sur le marché. À l'avenir, avec la tendance vers des matériaux plus diversifiés et haut de gamme, les technologies d'emballage évolueront vers des méthodes intelligentes et respectueuses de l'environnement, contribuant ainsi fortement au développement durable de l'industrie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 8.2 Conditions de stockage et exigences anticorrosion pour l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

En raison de leur densité élevée, de leurs performances élevées et de leur composition complexe, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer nécessitent un contrôle environnemental strict pendant le stockage afin de préserver leurs propriétés physiques et leur stabilité chimique. Des conditions de stockage appropriées et des mesures scientifiques de prévention de la corrosion sont essentielles pour garantir la qualité des alliages et prolonger leur durée de vie.

### 1. Exigences de base pour l'environnement de stockage

#### 1. Contrôle de la température

- L'environnement de stockage doit maintenir une température constante et appropriée, généralement comprise entre 5°C et 35°C, pour éviter des fluctuations de température drastiques qui peuvent entraîner des modifications de la contrainte interne de l'alliage.
- Évitez les environnements à haute température pour éviter des changements indésirables dans la composition interne ou la microstructure de l'alliage.

#### 2. Contrôle de l'humidité

- L'humidité relative doit être contrôlée entre 40 % et 60 % pour éviter l'oxydation et la corrosion de surface causées par une humidité excessive.
- Utilisez un équipement déshydratant ou déshumidifiant pour garder l'environnement sec et éviter la condensation.

#### 3. Propreté et ventilation

- La zone de stockage doit être maintenue propre et exempte de poussière, d'huile et de gaz corrosifs.
- Une bonne circulation de l'air contribue à réduire l'accumulation d'humidité et le risque de corrosion.

### 2. Mesures anticorrosion et moyens techniques

#### 1. Traitement de protection de surface

- La surface de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est passivée pour former un film d'oxyde stable afin d'améliorer la résistance à la corrosion.
- Couvrez la surface d'un revêtement protecteur, tel qu'une huile antirouille, une cire industrielle ou une peinture anticorrosion spéciale, pour bloquer l'humidité et l'oxygène.

#### 2. Conception anticorrosion de l'emballage

- Utilisez un emballage étanche à l'humidité, tel qu'un emballage sous vide ou un emballage rempli d'azote, pour réduire le contact avec l'air extérieur.
- Ajoutez un déshydratant ou un conservateur à l'emballage pour absorber l'humidité et inhiber les réactions de corrosion.

#### 3. Entretien et inspection réguliers

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Vérifiez régulièrement la surface des alliages stockés et traitez rapidement tout signe de rouille ou d'oxydation.
- Ajustez les mesures anticorrosion en fonction des conditions environnementales pour assurer une protection à long terme.

### 3. Conteneurs de stockage et spécifications d'empilage

#### 1. Sélection du matériau du conteneur

- Les récipients en acier inoxydable, en plastique ou en métal traité anticorrosion sont privilégiés pour éviter que la corrosion du récipient lui-même n'affecte l'alliage.
- L'intérieur du récipient doit être lisse et exempt d'arêtes vives pour éviter de rayer la surface de l'alliage.

#### 2. Méthode d'empilement

- Empilez correctement pour éviter toute déformation ou tout dommage de surface causé par une pression excessive.
- Utilisez un tapis ou un plateau isolant pour éviter que l'alliage n'entre en contact direct avec le sol ou les surfaces métalliques.

#### 3. Gestion de l'identification et des partitions

- Marquez clairement les spécifications de l'alliage, les lots et les dates de stockage pour une gestion et une utilisation faciles.
- Les alliages de différents types et états sont stockés dans des zones séparées pour éviter toute confusion et contamination croisée.

### 4. Recommandations de stockage pour les environnements spéciaux

#### 1. zones humides

- Ajoutez des installations résistantes à l'humidité, telles que des déshumidificateurs de climatisation ou des entrepôts fermés.
- Une bague d'étanchéité est installée sur l'emballage pour garantir l'étanchéité de l'emballage.

#### 2. Environnement balnéaire et embruns salins

- Revêtement anticorrosion renforcé, utilisant un système de protection multicouche.
- Réduisez le temps de stockage et privilégiez l'expédition et l'utilisation.

#### 3. Stockage à long terme

- Adopter des mesures de surveillance environnementale et d'entretien périodique plus strictes.
- Pré-enduit de conservateurs et stocké dans une installation à température et humidité constantes.

### 5. Effet du stockage sur les propriétés de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

- Un stockage inapproprié peut facilement entraîner une oxydation de surface, de la corrosion et même des modifications microstructurales, affectant les propriétés mécaniques et la durée de vie.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Un bon environnement de stockage peut maintenir efficacement les propriétés physiques et chimiques du matériau et assurer la stabilité du traitement et de l'application ultérieurs.

## VI. Résumé

La gestion du stockage des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer nécessite de multiples approches, notamment le contrôle environnemental, la protection contre la corrosion, la conception des emballages et les essais de maintenance. Des conditions de stockage rigoureuses et des mesures strictes de prévention de la corrosion permettent de maximiser la préservation des propriétés d'origine de l'alliage, de minimiser les risques liés au stockage et de constituer une base solide pour une application efficace du matériau.

### 8.3 Spécifications de transport nationales et internationales et directives de déclaration pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

En tant que matériau stratégique important et performant, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont soumis à des réglementations de transport et à des exigences de déclaration strictes, tant au niveau national qu'international, en raison de leurs propriétés physiques et chimiques uniques et des risques potentiels liés au transport. Le respect scrupuleux de ces réglementations garantit non seulement la sécurité du transport, mais aussi le respect des exigences du commerce international, évitant ainsi les risques juridiques et les pertes financières.

#### 1. Classification du transport et évaluation des risques de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

##### 1. Classification des transports

- Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont disponibles sous forme de lingots, de barres ou de poudre. Les lingots et les barres sont généralement considérés comme des produits industriels courants, tandis que les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer en poudre peuvent être classés comme matières dangereuses et nécessiter des permis de transport spéciaux.
- Les dangers liés à la forme de poudre résident principalement dans l'inflammabilité, l'explosivité et les risques d'explosion de poussière, qui doivent être évalués conformément aux normes internationales de classification des marchandises dangereuses.

##### 2. l'évaluation des risques

- Évaluer les dommages physiques possibles, les réactions chimiques et les risques pour la sécurité en fonction de la forme du produit, de son emballage et des méthodes de transport.
- Prendre des mesures de protection de sécurité et des conditions de transport appropriées en fonction du niveau de risque.

#### 2. Réglementation sur les transports intérieurs

##### 1. Transport routier

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Se conformer au « Règlement sur la gestion de la sécurité des produits chimiques dangereux » et au « Règlement sur la gestion des marchandises dangereuses dans le transport routier ».
- Pour l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer sous forme de poudre, un permis de transport de marchandises dangereuses est requis et des véhicules et emballages conformes doivent être utilisés.
- Appliquer strictement les limites de charge des véhicules, les itinéraires de transport et les procédures d'exploitation de sécurité.

## 2. Transport ferroviaire

- Conformément au « Règlement sur le transport ferroviaire des marchandises dangereuses », la forme poudre nécessite une déclaration de marchandises dangereuses et un emballage spécial.
- Renforcer la gestion de la sécurité des opérations de chargement et de déchargement pour prévenir les fuites de poussière et la pollution de l'environnement.

## 3. Transport maritime

- Se conformer au « Règlement sur le transport des marchandises dangereuses par eau » et s'assurer que les conditions d'emballage et de transport répondent aux exigences de prévention des incendies, de prévention des explosions et de prévention des fuites.
- Assurer le renforcement de la cargaison et le contrôle de l'humidité pour éviter l'érosion par l'eau de mer et la corrosion induite par l'humidité.

## 4. Transport aérien

- Complétez les procédures de déclaration conformément aux « Mesures de gestion du transport des marchandises dangereuses de l'aviation civile ».
- La poudre d'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer doit être soumise à une inspection d'emballage stricte pour garantir qu'elle ne présente pas de danger pour la sécurité des vols.

## 3. Réglementation internationale sur le transport

### 1. Règlement type des Nations Unies pour le transport des marchandises dangereuses

- Les lingots d'acier et d'alliages solides ne sont généralement pas classés comme marchandises dangereuses, mais sont néanmoins soumis aux réglementations douanières et d'importation et d'exportation.

### 2. Code maritime international des marchandises dangereuses (Code IMDG)

- Marchandises dangereuses en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer adaptées au transport maritime, avec réglementations sur l'emballage, l'étiquetage, la ventilation et les mesures d'urgence.
- Le transport de poudre nécessite un contrôle strict de l'intégrité de l'emballage et des mesures de prévention de la poussière.

### 3. Règlement sur les marchandises dangereuses de l'Association du transport aérien international (IATA)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La poudre d'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer doit être classée, déclarée et emballée conformément au Règlement sur les marchandises dangereuses.
  - Respectez les restrictions et les embargos pour garantir la sécurité des vols.
- 4. Accord international sur les transports terrestres**
- Appliquer l'ADR européen, les accords de transport routier, etc. pour garantir la sécurité et la conformité du transport routier transfrontalier.
  - L'étiquetage des marchandises et les documents d'expédition doivent être conformes aux réglementations locales.

#### **IV. Demande et préparation des documents**

##### **1. Déclaration de marchandises dangereuses**

- Lors du transport de poudre d'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, un formulaire de déclaration de marchandises dangereuses doit être rempli dans son intégralité, indiquant la nature de la substance, le niveau de risque et les mesures de sécurité.
- Fournir une fiche de données de sécurité (FDS) et un certificat d'emballage conforme.

##### **2. déclaration de douane**

- Préparez une facture commerciale détaillée, une liste de colisage, un certificat d'origine et d'autres documents.
- Vérifiez les politiques telles que les restrictions d'importation et d'exportation, les quotas et les licences pour garantir la conformité.

##### **3. Assurance transport**

- Il est recommandé de souscrire une assurance transport de marchandises pour couvrir les risques de dommages, de perte et de retard pendant le transport.

#### **V. Étiquettes d'emballage et mesures de sécurité**

##### **1. Étiquetage des emballages**

- Des panneaux clairs sur les marchandises dangereuses et des étiquettes de transport doivent être affichés.
- Le contenu de l'étiquetage doit inclure le nom du produit, la catégorie de danger, les précautions de manipulation et le numéro de contact d'urgence.

##### **2. Procédures de sécurité opérationnelles**

- Les procédures de sécurité opérationnelles doivent être strictement respectées pendant le transport, le chargement, le déchargement et le stockage.
- Équipé du matériel nécessaire de lutte contre les incendies et les fuites d'urgence et de la formation du personnel.

#### **6. Analyse de cas**

- Un exportateur de poudre d'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer a développé des procédures détaillées d'emballage et de déclaration pour le marché européen afin de garantir la conformité aux réglementations IMDG et ADR.

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

- Grâce à une inspection rigoureuse des emballages, une évaluation des risques et une préparation des documents, nous avons obtenu un transport sans accident et renforcé la confiance des clients.

## VII. Résumé

La gestion du transport des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer est soumise à de multiples réglementations et normes, notamment la dangerosité des produits en poudre, qui mérite une attention particulière. Le respect systématique des réglementations nationales et internationales en matière de transport et des directives de déclaration afin de garantir une logistique et un transport sûrs, efficaces et conformes est essentiel au développement stable de la filière des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

### 8.4 Précautions et plans d'entretien pour l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer pendant l'utilisation

L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, un matériau composite haute performance, est largement utilisé dans les domaines de l'aérospatiale, de l'armée, de l'énergie nucléaire et de la médecine. Pour garantir la stabilité des performances du matériau et prolonger sa durée de vie, le strict respect des précautions d'usage et la mise en œuvre d'un plan de maintenance scientifique et efficace sont essentiels.

#### 1. Précautions d'emploi

##### 1. Éviter les chocs mécaniques et les surcharges

- Bien que l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer présente une résistance et une dureté élevées, il peut se fissurer ou se déformer lorsqu'il est soumis à des charges d'impact au-delà de la plage de conception.
- Évitez les chocs mécaniques violents tels que les chutes et les collisions pendant l'utilisation, et soyez particulièrement prudent lors du montage et du transport.

##### 2. Contrôler la température de l'environnement de travail

- Le coefficient de dilatation thermique et la stabilité thermique d'un alliage déterminent ses performances dans des environnements à haute température.
- La température de fonctionnement doit être contrôlée en fonction de la limite de résistance à haute température du matériau pour éviter les changements microstructuraux ou la dégradation des performances causés par un environnement à haute température.

##### 3. Prévenir la corrosion chimique

- Bien que l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer présente une certaine résistance à la corrosion, une exposition à long terme à des milieux corrosifs tels que l'acide, l'alcali et le brouillard salin entraînera une oxydation de surface et une dégradation des performances.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- L'alliage doit être tenu à l'écart de tout contact direct avec des produits chimiques corrosifs et un revêtement anticorrosion ou des mesures de protection doivent être utilisés si nécessaire.

#### 4. Prévenir les interférences électromagnétiques

- Certains alliages tungstène-molybdène-nickel-fer présentent des caractéristiques de réponse magnétique particulières. Lors de leur utilisation, il convient d'éviter l'influence de champs électromagnétiques puissants afin d'éviter tout dysfonctionnement.

#### 5. Inspection et surveillance régulières

- Établir un plan d'inspection régulier des performances, en se concentrant sur la surveillance des propriétés mécaniques, de l'état de surface et des changements microstructuraux de l'alliage.
- Pour les pièces structurelles importantes, une technologie de contrôle non destructif doit être utilisée pour détecter rapidement les fissures ou les défauts potentiels.

## 2. Plan d'entretien et de soins

### 1. Nettoyage et protection de surface

- Nettoyez régulièrement la surface de l'alliage avec un détergent doux et non corrosif pour éviter l'accumulation de taches et de substances corrosives.
- Appliquez de la graisse ou un film protecteur sur les surfaces exposées pour réduire le risque d'oxydation et de corrosion.

### 2. Maintenance du contrôle environnemental

- Maintenir une température et une humidité stables dans l'environnement de fonctionnement de l'alliage pour éviter les fluctuations des propriétés du matériau causées par les changements environnementaux.
- Dans les environnements humides ou corrosifs, des équipements de déshumidification et des housses de protection sont recommandés.

### 3. Réparation des dommages mécaniques

- Pour les rayures mineures et les défauts de surface, un polissage mécanique ou un revêtement de réparation local peuvent être utilisés.
- Les pièces gravement endommagées doivent être remplacées rapidement pour éviter que les fissures ne s'élargissent et ne provoquent une défaillance structurelle.

### 4. Tests de performance réguliers

- En fonction du cycle d'utilisation, des tests de dureté, des tests de performance en traction et des analyses de microstructure sont effectués pour évaluer l'état de santé du matériau.
- Pour les équipements clés et les pièces structurelles, des méthodes de contrôle non destructif telles que les ultrasons et les rayons X sont utilisées pour garantir la sécurité.

### 5. Gestion des enregistrements et du suivi

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Établir des dossiers de maintenance et enregistrer en détail le temps de maintenance, les résultats des tests et les mesures de réparation.
- L'analyse des données guide les plans de maintenance ultérieurs et l'optimisation des performances.

### 3. Points de maintenance pour les environnements d'application spéciaux

#### 1. Environnement à haute température

- Vérifiez régulièrement l'oxydation à haute température des matériaux et éliminez la couche d'oxyde et les dommages thermiques en temps opportun.
- Augmenter de manière appropriée le cycle de traitement thermique pour restaurer les propriétés de l'alliage.

#### 2. Environnement de rayonnement nucléaire

- Surveiller les effets des rayonnements sur la structure et les propriétés des matériaux et adopter des mesures de radioprotection.
- Faites attention aux réglementations de sécurité radiologique lors de la maintenance pour éviter toute contamination croisée.

#### 3. Environnement de vibrations mécaniques

- Renforcez la conception de fixation et d'absorption des chocs des pièces de connexion pour éviter les fissures de fatigue.
- Vérifiez régulièrement la fatigue due aux vibrations pour prévenir les pannes à l'avance.

## IV. Résumé

Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer nécessitent un entretien tout au long de leur cycle de vie. Des précautions et des plans d'entretien appropriés peuvent améliorer considérablement la fiabilité et la durée de vie du matériau. En alliant gestion scientifique et expertise technique, nous garantissons que les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer offrent des performances optimales dans diverses applications, répondant ainsi à des exigences techniques rigoureuses.

### 8.5 Voies technologiques de réutilisation et de recyclage des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Face à la raréfaction des ressources et aux exigences croissantes en matière de protection de l'environnement, la réutilisation et le recyclage des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont devenus un moyen essentiel de parvenir à un développement durable des matériaux, de réduire les coûts de production et d'atténuer les impacts environnementaux. Cette section présente de manière systématique les technologies de recyclage, les méthodes de réutilisation et les applications industrielles actuelles des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

## 1. Sources et classification des déchets d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

### 1. Sources de déchets

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Chutes, produits défectueux et produits en alliage mis au rebut générés au cours du processus de production.
- Composants et structures en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer en fin de vie.
- Particules solides contenant un alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans le traitement des déchets de scories, de la poudre de broyage et du fluide de coupe.

## 2. Tri des déchets

- Ferraille d'alliages solides : blocs, tiges et pièces de structure, etc.
- Déchets de poudre : poudre résiduelle issue du traitement et du broyage.
- Déchets de matériaux composites : structure composite contenant des composants en alliage de tungstène, de molybdène, de nickel et de fer.

## 2. Aperçu des filières technologiques de recyclage

### 1. Méthode de recyclage physique

- Le recyclage des déchets solides d'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est principalement réalisé par tri mécanique, concassage, criblage, séparation magnétique et autres procédés.
- Les avantages sont un processus simple, une faible consommation d'énergie et la possibilité de recycler des déchets physiques relativement purs.
- L'inconvénient est que les impuretés ne peuvent pas être complètement éliminées et que la pureté de récupération est limitée.

### 2. Récupération chimique

- Il comprend des procédés tels que la lixiviation acide, la lixiviation alcaline, l'extraction par solvant et la précipitation, et convient à la récupération des éléments tungstène et molybdène à partir de déchets de poudre et de déchets composites.
- Les concentrés de tungstène et de molybdène de haute pureté sont récupérés par dissolution et séparation.
- La technologie est complexe et nécessite des installations complètes de protection de l'environnement pour prévenir la pollution secondaire.

### 3. Méthode de récupération métallurgique

- L'alliage usagé est réduit par fusion à haute température pour obtenir une reproduction d'alliage de tungstène, de molybdène, de nickel et de fer.
- Les équipements couramment utilisés comprennent les fours à arc électrique, les fours à induction, etc.
- Il convient aux déchets de haute pureté et au recyclage à grande échelle, avec un taux de récupération élevé et de bonnes performances d'alliage.

### 4. Recyclage des déchets de fabrication additive

- Les résidus de poudre générés lors du processus de fabrication additive sont recyclés par criblage, traitement thermique et remixage.
- Réduisez efficacement les coûts de production et assurez des performances matérielles stables.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Méthodes de réutilisation et domaines d'application

#### 1. Application du processus de reconditionnement

- Les déchets sont recyclés et réduits en poudre, qui est ensuite formée par métallurgie des poudres pour produire de nouveaux matériaux en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer.
- Utilisé pour fabriquer des noyaux de projectiles militaires, des pièces structurelles hautes performances et des composants de blindage nucléaire.

#### 2. Modification des matériaux et amélioration des performances

- Des nanoparticules ou d'autres éléments d'alliage sont ajoutés aux matériaux recyclés pour optimiser les performances.
- Développer des matériaux à gradient fonctionnel et élargir leurs domaines d'application.

#### 3. Protection de l'environnement et économie circulaire

- Grâce au recyclage, nous pouvons réduire la pression sur l'extraction des ressources en tungstène et en molybdène et parvenir à une fabrication verte.
- Soutenir le développement durable de la filière des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer et promouvoir la construction d'une économie circulaire.

### 4. Défis technologiques du recyclage et orientations de développement futures

#### 1. Problème de contrôle des impuretés

- Les impuretés et les éléments nocifs mélangés aux déchets ont un impact significatif sur la qualité des matériaux recyclés, et une technologie de séparation efficace doit être développée.

#### 2. Réglementations environnementales et mises à niveau technologiques

- Des réglementations environnementales strictes exigent un contrôle de la pollution dans le processus de recyclage et favorisent le développement de technologies de recyclage vertes.

#### 3. Bilan des coûts et des avantages du recyclage

- Le coût technique est élevé et le processus doit être optimisé pour maximiser les avantages économiques.

#### 4. Collaboration de la chaîne industrielle du recyclage

- Promouvoir le partage des ressources et la collaboration entre les entreprises et construire un système complet de recyclage et d'utilisation des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

### 5. Cas typiques de processus de recyclage

- Un grand fabricant d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer utilise la méthode de réduction par fusion pour recycler les déchets, atteignant un taux de récupération annuel de plus de 85 %.
- En utilisant la lixiviation chimique combinée à la technologie d'extraction par solvant, les éléments tungstène et molybdène ont été extraits avec succès, améliorant ainsi l'efficacité du recyclage des poudres usagées.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## VI. Résumé

La réutilisation et le recyclage des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont essentiels au recyclage des ressources et à la protection de l'environnement. Grâce aux avancées technologiques et à la demande croissante de l'industrie, les procédés de recyclage sont constamment optimisés, ce qui améliore les taux de récupération et les propriétés des matériaux. À l'avenir, le recyclage des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer se développera de manière écologique, intelligente et efficace, contribuant ainsi à l'atteinte des objectifs de développement durable de l'industrie des matériaux.

## 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

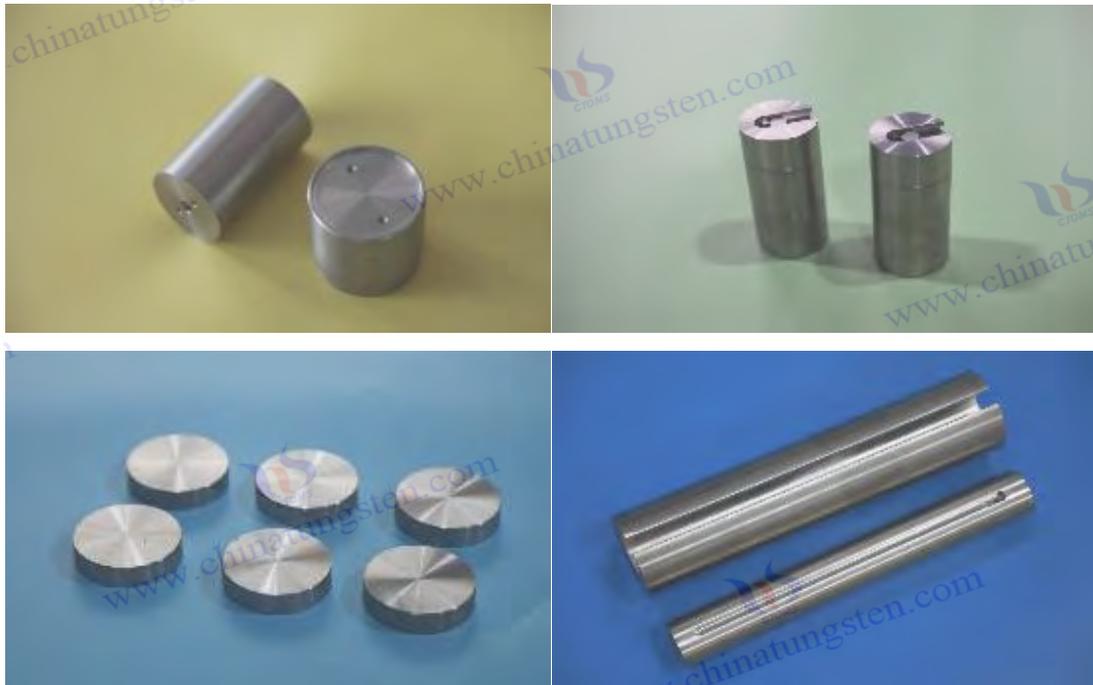
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 9 Structure du marché et tendance de développement des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

### 9.1 Analyse de la répartition mondiale des ressources en tungstène et en molybdène et de la chaîne industrielle des alliages

Matériau métallique stratégique haute performance, le tungstène-molybdène-nickel-fer (Tungstène-Molybdène-Ni-Fer) est largement utilisé dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'armée, de l'énergie nucléaire, de l'électronique et de la fabrication haut de gamme. Son développement est fortement influencé par la répartition mondiale des ressources en tungstène et en molybdène et par la structure de la chaîne d'approvisionnement. Cette section se concentre sur la répartition géographique et les réserves actuelles des ressources mondiales en tungstène et en molybdène, ainsi que sur leur impact sur la filière tungstène-molybdène-Ni-Fer (Tungstène-Molybdène-Ni-Fer).

#### 1. Répartition actuelle des ressources mondiales en tungstène

##### 1. Principaux pays producteurs de minéraux

- **Chine** : premier producteur et réserve mondial de tungstène, représentant plus de 60 % des réserves mondiales et se classant au premier rang en termes de production. Les mines de tungstène chinoises sont principalement situées dans des provinces comme le Jiangxi, le Hunan, le Fujian, le Yunnan et le Guangdong.
- **Russie** : Elle possède de riches ressources en minerai de tungstène, principalement concentrées en Extrême-Orient et en Sibérie, et est un important exportateur de minerai de tungstène.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Canada** : Les ressources en tungstène sont relativement abondantes, principalement réparties au Québec et en Colombie-Britannique.
- **D'autres pays** : L'Autriche, le Portugal, le Vietnam, les États-Unis et d'autres pays exploitent également du tungstène, mais la production est relativement faible.

## 2. Réserves de ressources et statut minier

- Les ressources mondiales en tungstène sont très concentrées, la répartition des ressources est inégale et l'approvisionnement du marché dépend fortement des principales zones de production.
- Les coûts d'exploitation minière, les politiques de protection de l'environnement et les niveaux de technologie minière affectent directement l'approvisionnement effectif en ressources de tungstène.

## 2. Répartition actuelle des ressources mondiales en molybdène

### 1. Principaux pays producteurs de minéraux

- **Chine** : Les ressources en molybdène sont abondantes, principalement réparties dans le Sichuan, la Mongolie intérieure, le Gansu, le Qinghai et d'autres endroits, et sa production de minerai de molybdène se classe parmi les meilleures au monde.
- **États-Unis** : C'est le plus grand producteur de molybdène au monde, avec d'importantes zones minières situées dans le Colorado et le Nouveau-Mexique.
- **Chili** : Un important pays producteur de molybdène en Amérique du Sud, où la majeure partie du molybdène existe sous forme de minerais associés au cuivre et au molybdène.
- L'exploitation du molybdène est également réalisée dans des pays comme le **Canada, le Pérou et le Mexique**.

### 2. Caractéristiques des ressources

- Les minerais de molybdène sont souvent associés aux minerais de cuivre, et le développement des ressources est grandement affecté par le marché du cuivre.
- Le taux de récupération et l'efficacité du traitement du molybdène affectent la stabilité de son approvisionnement.

## 3. Structure de la chaîne industrielle des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

### 1. Approvisionnement en matières premières en amont

- L'extraction du minerai de tungstène-molybdène et le traitement du concentré constituent la base de l'industrie des alliages de tungstène-molybdène-nickel-fer.
- La qualité et la pureté des matières premières affectent directement les propriétés des alliages et les coûts de production.

### 2. Préparation d'alliages intermédiaires

- Préparation de poudre de tungstène et de molybdène, dosage, formage par métallurgie des poudres, frittage et post-traitement pour former des barres d'alliage, des plaques, etc.
- Le niveau technique détermine la qualité et les performances du produit et affecte directement la compétitivité des domaines d'application en aval.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. **Marché des applications en aval**

- Les principaux secteurs de la demande sont l'aérospatiale, l'industrie militaire, l'énergie nucléaire, les équipements médicaux et les industries de l'information électronique.
- Les domaines d'application variés et les caractéristiques complexes de la demande entraînent une amélioration continue des matériaux d'alliage.

### 4. **Recyclage et réutilisation**

- Le recyclage des déchets d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer forme une chaîne industrielle en boucle fermée et réduit la consommation de ressources.

## 4. **État actuel du marché mondial des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer**

### 1. **Taille et structure du marché**

- Ces dernières années, le marché mondial des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer a connu une croissance constante, bénéficiant du développement de la fabrication haut de gamme et des industries émergentes stratégiques.
- La Chine occupe une position dominante sur le marché mondial et dispose d'un système complet d'approvisionnement en matières premières et de fabrication.
- Les pays développés tels que l'Europe, les États-Unis, le Japon et la Corée du Sud se concentrent sur la recherche, le développement et l'application d'alliages hautes performances.

### 2. **Caractéristiques de la chaîne d'approvisionnement**

- Il s'agit d'un secteur très concentré, dont les maillons clés reposent sur quelques entreprises leaders.
- Les prix fluctuent considérablement et sont fortement influencés par les prix des matières premières, les politiques commerciales et la demande du marché.

## 5. **Défis et opportunités pour la chaîne industrielle**

### 1. **défi**

- Risques d'approvisionnement liés à la concentration géographique des ressources.
- Les réglementations environnementales deviennent de plus en plus strictes et les coûts d'extraction et de traitement augmentent.
- Les frictions commerciales internationales peuvent affecter la circulation des matières premières et des produits d'alliage.

### 2. **opportunité**

- L'innovation technologique favorise l'amélioration des performances des alliages et l'expansion de leurs applications.
- Les progrès en matière de technologie de recyclage favorisent la circulation des ressources et la fabrication verte.
- La demande d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer hautes performances dans les industries émergentes stratégiques continue de croître.

## VI. **Résumé**

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La répartition mondiale des ressources en tungstène et en molybdène a un impact profond sur la stabilité et le potentiel de développement de la filière des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. Forte de ses ressources abondantes et de ses atouts technologiques, la Chine occupe une position clé sur le marché mondial des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. Face aux défis liés aux ressources, à l'environnement et au marché, la promotion de l'innovation technologique et de la collaboration au sein de la filière deviendra le moteur essentiel du développement durable et sain de ce secteur.

## 9.2 État de la demande du marché et prévisions de croissance pour l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

Matériau stratégique clé à hautes performances, l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer continue de connaître une demande croissante dans de nombreux secteurs industriels en raison de sa densité, de sa résistance mécanique, de sa résistance aux hautes températures et aux radiations supérieures. Cette section analysera la demande actuelle du marché mondial et régional pour cet alliage et, en fonction des tendances du secteur et des avancées technologiques, prévoira sa croissance future.

### 1. Demande actuelle du marché

#### 1. Pilote d'application industrielle

- **Aéronautique** : Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont largement utilisés dans les contrepoids d'avions, les dispositifs de navigation inertielle et les matériaux de protection thermique en raison de leur densité et de leur résistance élevées. La demande ne cesse de croître, parallèlement à l'augmentation des investissements dans la recherche et le développement de nouveaux engins spatiaux et de moteurs d'avions.
- **Industrie militaire** : La demande en alliages tungstène-molybdène-nickel-fer hautes performances reste élevée pour les noyaux de projectiles perforants, les composants inertiels de missiles et les blindages de protection. La modernisation des équipements militaires et l'intensification des efforts de défense nationale stimulent l'expansion continue de ce secteur.
- **Industrie de l'énergie nucléaire** : Utilisés dans des composants clés tels que les barres d'absorption de neutrons et les matériaux de protection contre les radiations, ces matériaux exigent une stabilité et une résistance aux radiations extrêmement élevées. Le développement de l'énergie nucléaire et les avancées technologiques dans le traitement des déchets nucléaires stimulent la demande du marché.
- **Électronique et instruments de précision** : Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer jouent un rôle important dans la dissipation thermique et les structures de blindage des équipements et instruments électroniques de haute précision. Le développement rapide du secteur des technologies de l'information stimule la demande croissante d'alliages.
- **Équipements médicaux** : Les blindages protecteurs et les composants structurels haute densité des équipements de radiothérapie nécessitent des matériaux

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

présentant une bonne biocompatibilité et de bonnes propriétés mécaniques. L'application des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer est en constante expansion.

## 2. Caractéristiques du marché régional

- **Marché chinois** : En tant que premier fournisseur mondial de tungstène et de molybdène et base de production de produits en alliage, la Chine connaît une demande croissante, notamment dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'armée et de l'énergie nucléaire. Le soutien des pouvoirs publics et l'accélération de la modernisation industrielle stimulent l'expansion de la demande intérieure.
- **Marchés européens et américains** : se concentrent sur la recherche et le développement technologiques et les applications haut de gamme d'alliages hautes performances, avec une demande principalement pour des produits à haute valeur ajoutée et personnalisés, et la taille du marché augmente régulièrement.
- **Japon, Corée du Sud et autres pays asiatiques** : Ils s'appuient sur les ressources importées et attachent de l'importance à l'amélioration technologique et à l'application innovante des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, avec un potentiel de marché important.

## 2. Moteurs de croissance du marché

### 1. La dynamique des technologies émergentes

- Le développement de nouvelles technologies telles que la fabrication intelligente et la fabrication additive a amélioré l'efficacité de la préparation et les performances des produits des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer et élargi leur champ d'application.

### 2. Augmentation des dépenses consacrées à la défense et à l'aérospatiale

- L'augmentation des budgets de défense et des projets aérospatiaux dans divers pays a directement stimulé la demande d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer hautes performances.

### 3. Stratégie de développement de l'énergie nucléaire

- La part mondiale de la production d'énergie nucléaire augmente progressivement, et les exigences en matière de sécurité de l'énergie nucléaire et de protection de l'environnement augmentent, ce qui favorise l'expansion du marché des matériaux d'alliage associés.

### 4. Réglementations environnementales et recyclage des ressources

- La promotion des technologies de fabrication verte et de recyclage des ressources favorisera l'optimisation de la chaîne industrielle des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer et améliorera l'efficacité de l'utilisation des matériaux.

## 3. Prévisions de croissance du marché

### 1. Prévisions de la taille du marché mondial

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- On s'attend à ce qu'au cours des cinq prochaines années, le marché mondial des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer maintienne un taux de croissance annuel composé d'environ 5 % à 7 %.
- Les domaines d'application émergents et la demande du marché haut de gamme deviendront les principaux points de croissance.

## 2. Tendances de croissance régionale

- **Chine** : la demande du marché connaît une croissance rapide, avec un taux de croissance annuel qui devrait atteindre 7 à 9 %.
- **Europe et États-Unis** : Croissance soutenue, avec un focus sur la transition vers les alliages hautes performances et les produits sur mesure.
- **Autres pays asiatiques** : Poussés par l'industrialisation et la modernisation technologique, le potentiel du marché est progressivement libéré.

## 3. L'innovation technologique stimule la modernisation du marché

- Les alliages nanostructurés, les matériaux composites multifonctionnels et les technologies de fabrication intelligentes favoriseront l'amélioration des performances des produits en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer et favoriseront la transformation de la structure du marché vers une forte valeur ajoutée.

## IV. Défis et risques

### 1. Fluctuations des prix des matières premières

- L'instabilité des prix des ressources en tungstène et en molybdène peut avoir un impact sur la chaîne industrielle et augmenter les coûts de fabrication.

### 2. Risques liés au commerce international et aux politiques

- Les frictions commerciales, les politiques tarifaires et les normes de protection de l'environnement peuvent affecter la circulation transfrontalière et la compétitivité du marché des produits en alliage.

### 3. Concurrence des matériaux alternatifs

- Le développement de nouveaux matériaux légers et à haute résistance constitue une menace potentielle pour le marché traditionnel des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

## V. Résumé

En tant que matériau stratégique clé, la demande du marché des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer se diversifie et augmente régulièrement. L'innovation industrielle et l'expansion des applications seront les principaux moteurs du développement futur du marché. Face aux défis liés aux ressources et aux politiques, tous les maillons de la chaîne industrielle doivent collaborer pour améliorer les capacités technologiques et l'efficacité des ressources afin de parvenir à une croissance régulière et à un développement durable du marché des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

### 9.3 Introduction à l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer du CTIA GROUP

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leader dans le domaine des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer en Chine et à l'international, CTIA GROUP (CITIM) est devenu une référence dans le secteur grâce à ses solides capacités de R&D technique, sa chaîne industrielle complète et ses produits de haute qualité. Cette section se concentre sur l'historique de développement de CTIA GROUP, ses atouts technologiques, son portefeuille de produits et ses performances sur le marché des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

## 1. Historique du développement de l'entreprise et positionnement stratégique

### 1. Contexte et développement :

Tirant parti des abondantes ressources chinoises en tungstène et en molybdène, Tungsten Intelligent Manufacturing a progressivement mis en place une chaîne d'approvisionnement complète, incluant l'approvisionnement en matières premières, la préparation des poudres, la fabrication des alliages et leur transformation. L'entreprise se consacre à la recherche, au développement et à la fabrication d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer pour répondre aux besoins des secteurs de l'aérospatiale, de l'armée, de l'énergie nucléaire et de l'industrie manufacturière haut de gamme.

### 2. Positionnement stratégique

- Se concentrer sur les produits en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer hautes performances et promouvoir l'innovation en matière de technologie des matériaux.
- Créer un modèle de fabrication verte et d'économie circulaire pour améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources.
- Développer activement les marchés internationaux et améliorer la compétitivité mondiale et l'influence de la marque.

## 2. Technologies de base et capacités de R&D

### 1. Technologie avancée de métallurgie des poudres. China

Tungsten Intelligent Manufacturing possède plusieurs procédés de préparation des poudres et de métallurgie, bénéficiant de droits de propriété intellectuelle indépendants. Elle est capable de contrôler avec précision la teneur en tungstène et en molybdène ainsi que la répartition des éléments d'alliage, permettant ainsi la production d'alliages haute densité et hautement uniformes.

### 2. Le contrôle de la microstructure et l'optimisation des performances

utilisent des moyens techniques tels que le renforcement des nanoparticules et la conception de microalliages pour améliorer la ténacité et la résistance à haute température des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer afin de répondre aux exigences strictes des différents environnements d'application.

### 3. La fabrication intelligente et le contrôle qualité

introduisent des systèmes de gestion de la production numérique pour réaliser une surveillance en temps réel des paramètres de processus et une analyse des données, garantissant la stabilité et la cohérence de la qualité du produit.

## 3. Système de produits principaux

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **Les tiges en alliage haute densité tungstène-molybdène-nickel-fer**  
conviennent aux domaines haut de gamme tels que les contrepoids inertiels aérospatiaux et le blindage contre les radiations nucléaires.
2. **Les plaques en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer**  
sont largement utilisées dans la protection à haute température, la résistance à l'usure mécanique et les structures de dissipation thermique électronique.
3. **Les matériaux d'alliage personnalisés**  
développent des rapports d'alliage diversifiés et des matériaux fonctionnels spéciaux en fonction des besoins des clients, tels que des alliages résistants aux hautes températures, aux radiations, conducteurs thermiques et électriques .

#### IV. Performance du marché et partenaires

1. **Position sur le marché intérieur :**  
CTIA GROUP détient une part de marché de premier plan sur le marché intérieur des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, avec une chaîne d'approvisionnement stable et des services techniques complets, et a été reconnu par plusieurs grands projets nationaux et unités militaires.
2. **Expansion du marché international**  
Nous planifions activement les marchés étrangers, établissons des partenariats stratégiques avec des entreprises et des instituts de recherche scientifique renommés en Europe, en Amérique, au Japon, en Corée du Sud et dans d'autres pays, et promouvons les échanges technologiques et les exportations de produits.
3. **Le système de service client**  
fournit des services à guichet unique allant de la consultation technique, du développement d'échantillons à la production de masse pour garantir que les divers besoins des clients sont satisfaits.

#### V. Plan de développement futur

1. **Poussés par l'innovation technologique**  
, nous continuons d'augmenter les investissements en R&D pour surmonter les principales difficultés techniques dans les matériaux en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer hautes performances et augmenter la valeur ajoutée des produits.
2. **La fabrication verte et le développement durable**  
favorisent la modernisation des processus de protection de l'environnement et le recyclage des ressources, pratiquent le concept de fabrication verte et favorisent le développement durable de la chaîne industrielle.
3. **La stratégie de mondialisation est approfondie**  
pour élargir la part de marché internationale, renforcer l'influence internationale de la marque et construire une image de leader dans l'industrie mondiale des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

#### VI. Résumé

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En tant qu'entreprise leader dans le domaine des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, Chinatungsten Intelligent Manufacturing, forte de sa vaste expertise technique et de la mise en place d'une chaîne industrielle complète, continue de jouer un rôle moteur dans le développement technologique et commercial du secteur. À l'avenir, Chinatungsten Intelligent Manufacturing continuera de défendre les principes d'un développement vert et axé sur l'innovation, propulsant ainsi l'industrie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer à un niveau supérieur et maximisant la valeur de la chaîne industrielle.

#### 9.4 Analyse des fluctuations des prix des matières premières et de la structure des coûts de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

En tant que matériau stratégique haute performance, le coût de fabrication et le prix de marché de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer sont fortement influencés par les fluctuations des prix des matières premières. Une analyse approfondie de la dynamique des prix des matières premières clés telles que le tungstène, le molybdène, le nickel et le fer, ainsi que de leur contribution aux coûts de production globaux, est essentielle pour contrôler rationnellement les coûts de production et élaborer des stratégies de marché. Cette section analyse systématiquement le prix et le coût de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer du point de vue du marché actuel des matières premières, des facteurs de fluctuation des prix, de la structure des coûts et de la gestion des risques.

### 1. État du marché et tendances des prix des principales matières premières

#### 1.1. Matières premières du tungstène

- Le tungstène est l'élément essentiel de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer. Les ressources mondiales en tungstène sont concentrées dans quelques pays comme la Chine et la Russie.
- Ces dernières années, en raison de la rareté des ressources, du durcissement des politiques de protection de l'environnement et des restrictions minières, le prix du tungstène concentré a considérablement fluctué, affichant une tendance cyclique à la hausse.
- Les prix du tungstène ont le plus grand impact sur les coûts de production des alliages, représentant environ 30 à 50 % du coût total du matériau.

#### 1.2. Matières premières à base de molybdène

- Le molybdène, un élément important pour renforcer les performances des alliages, est principalement produit en Chine, aux États-Unis et au Chili.
- Les prix du molybdène sont influencés par la demande de l'industrie sidérurgique et du marché international des minéraux, et fluctuent considérablement.
- Le molybdène est utilisé dans les alliages en plus petites quantités que le tungstène, mais son prix est plus élevé, représentant environ 10 à 15 % du coût de l'alliage.

#### 1.3. Matières premières du nickel

- Le nickel est principalement utilisé pour améliorer la ténacité et la formabilité des alliages, et son prix est déterminé par la demande des industries de l'acier inoxydable et des batteries.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les prix du nickel ont connu une forte volatilité ces dernières années, fortement influencés par la situation économique mondiale et les relations entre l'offre et la demande.
- Le nickel représente environ 15 à 25 % du coût de l'alliage.

#### 4. **Matières premières en fer**

- En tant qu'élément de matrice, le fer a un prix relativement stable et un faible coût, affectant principalement environ 10 % du coût total de l'alliage.

## 2. **Analyse de la structure des coûts de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer**

### 1. **Coûts des matériaux**

- L'approvisionnement en matières premières est le principal facteur de coût de la fabrication des alliages, représentant environ 60 à 80 % du coût total. Les fluctuations des prix du tungstène et du nickel ont l'impact le plus important sur les coûts globaux.

### 2. **Coûts de traitement et de fabrication**

- Cela comprend les coûts de préparation de la poudre, de pressage, de frittage, de traitement thermique et d'usinage. Grâce aux progrès technologiques et à l'automatisation croissante, les coûts de traitement unitaires diminuent progressivement.

### 3. **Coûts des tests de qualité et de la R&D**

- Un système de contrôle de qualité de haut niveau et un investissement continu dans la recherche et le développement technologiques sont la garantie de garantir la performance du produit et la compétitivité du marché, représentant environ 5 à 10 % du coût total.

### 4. **Coûts de logistique et de gestion**

- Y compris le transport des matières premières, l'emballage des produits finis, l'entreposage et les frais de gestion administrative, représentant environ 5 % du coût total.

## 3. **Facteurs de fluctuation des prix des matières premières et gestion des risques**

### 1. **L'offre et la demande du marché**

- Les ressources minérales en tungstène et en molybdène sont limitées, et la demande se concentre dans le secteur manufacturier haut de gamme. Le déséquilibre entre l'offre et la demande entraîne de fréquentes fluctuations de prix.

### 2. **Politique commerciale internationale**

- Les ajustements tarifaires, les restrictions à l'exportation et l'environnement politique international affectent les coûts d'importation des matières premières et la stabilité de la chaîne d'approvisionnement.

### 3. **Réglementations environnementales et restrictions en matière d'exploitation des ressources**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les exigences en matière de protection de l'environnement dans le secteur minier deviennent de plus en plus strictes et les coûts de production augmentent, ce qui affecte l'approvisionnement et le prix des matières premières.

#### 4. Stratégie de gestion des risques

- Achats multicanaux et diversification de la chaîne d'approvisionnement.
- Bloquez les prix grâce à des contrats d'achat à long terme.
- Renforcer le recyclage des matériaux et réduire la dépendance aux ressources vierges.
- L'innovation technologique améliore l'efficacité de l'utilisation des matériaux, optimise les ratios et réduit les coûts.

### IV. Résumé

La structure des coûts des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dépend fortement des prix des principales matières premières. Les fluctuations du marché du tungstène et du nickel, en particulier, ont un impact significatif sur les coûts de production globaux. Les entreprises doivent suivre de près les tendances du marché international des matières premières et, en combinant innovation technologique et stratégies d'approvisionnement, renforcer leur maîtrise des coûts afin de garantir un approvisionnement stable et un développement durable, améliorant ainsi la compétitivité et la réactivité du secteur des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

### 9.5 Politique et position stratégique de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans la fabrication haut de gamme

Grâce à ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques exceptionnelles, l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer est devenu un matériau stratégique essentiel dans les secteurs manufacturiers haut de gamme tels que l'aérospatiale, l'armée, l'énergie nucléaire et l'électronique. Face aux avancées technologiques mondiales et à l'évolution du paysage géopolitique, les politiques gouvernementales orientent et régulent de plus en plus l'industrie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, renforçant ainsi sa position stratégique dans l'industrie manufacturière moderne. Cette section explore de manière systématique les opportunités de développement, les défis et l'importance stratégique de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans ce contexte politique.

### I. Attributs des ressources stratégiques nationales et soutien politique

#### 1. L'importance des ressources stratégiques

- Le tungstène et le molybdène sont des ressources minérales stratégiques importantes pour la Chine, directement liées à la défense nationale et au développement des industries de haute technologie. En tant que matériaux d'application clés, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer ont pour mission de préserver la compétitivité fondamentale de la Chine.
- De nombreux gouvernements ont inclus les ressources en tungstène, en molybdène et les industries d'alliages connexes dans le cadre des réserves stratégiques et du soutien clé.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Soutien politique et orientation de l'industrie

- Les pays ont mis en place des politiques visant à protéger les ressources minérales, à réglementer la protection de l'environnement, à encourager l'innovation technologique et à soutenir la modernisation industrielle afin de promouvoir le progrès technologique dans les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer et d'optimiser les structures industrielles.
- Les politiques nationales telles que « Made in China 2025 » et le « Plan de développement de la fabrication haut de gamme » soutiennent clairement la recherche et le développement ainsi que l'industrialisation de matériaux d'alliage haute performance.

## 3. Normes techniques et construction de systèmes de qualité

- Le gouvernement encourage la formulation de normes industrielles unifiées et de systèmes de certification pour garantir la qualité et la sécurité des produits en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer et améliorer la compétitivité internationale.

## 2. Principales applications de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans la fabrication haut de gamme

### 1. Aérospatial

- Utilisé pour les contrepoids inertiels, les noyaux de missiles, les pièces structurelles à haute température, etc. pour garantir les performances et la sécurité des avions.
- Une résistance élevée, une densité élevée et une excellente stabilité thermique répondent aux besoins des environnements extrêmes.

### 2. Fabrication d'équipements militaires

- En tant que matériau de base perforant et structure de protection de blindage, il offre d'excellentes performances de protection et de pénétration.
- Sa position centrale dans l'industrie militaire en fait une garantie stratégique pour la sécurité nationale.

### 3. Énergie nucléaire et radioprotection

- Les matériaux de blindage en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer sont utilisés dans les réacteurs nucléaires et les équipements de radiothérapie pour garantir la sécurité radiologique.
- La propriété de haute densité absorbe efficacement les neutrons et les rayons gamma.

### 4. Électronique haut de gamme et instruments de précision

- Utilisé dans les structures de dissipation thermique électroniques, les pièces de blindage magnétique et les composants d'instruments de haute précision pour améliorer les performances et la fiabilité des équipements.

## 3. Tendances du développement industriel dictées par les politiques

### 1. Fabrication verte et développement durable

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les lois et réglementations en matière de protection de l'environnement favorisent le développement de processus de production écologiques et de technologies de recyclage des ressources afin de réduire l'impact environnemental.
- Promouvoir la transformation écologique de la chaîne industrielle des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

### 2. Mises à niveau technologiques axées sur l'innovation

- Grâce au soutien politique, nous augmenterons les investissements en R&D et favoriserons l'application de technologies de renforcement nanométrique, de conception d'alliages multi-éléments et de fabrication intelligente.
- Améliorer les performances des matériaux et élargir les domaines d'application émergents.

### 3. Intégration de la chaîne industrielle et coopération internationale

- Promouvoir l'intégration des ressources et la collaboration au sein de la chaîne industrielle pour améliorer la sécurité de la chaîne d'approvisionnement mondiale.
- Renforcer la coopération avec les entreprises internationales avancées et les institutions de recherche scientifique pour renforcer la voix internationale.

## IV. Défis et stratégies de réponse

### 1. Dépendance aux ressources et risques d'approvisionnement

- Les ressources en tungstène et en molybdène sont concentrées et les frictions géopolitiques et commerciales peuvent conduire à un approvisionnement instable.
- Il est nécessaire d'accélérer le développement diversifié des ressources et le recyclage des matériaux.

### 2. Goulots d'étranglement techniques et concurrence sur le marché

- La technologie de préparation de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer haute performance est complexe et nécessite d'importants investissements en R&D.
- Il est nécessaire de renforcer les capacités d'innovation indépendantes et d'améliorer le niveau de technologie industrielle.

### 3. S'adapter aux changements de l'environnement politique

- Les réglementations en matière de protection de l'environnement et de sécurité, tant au niveau national qu'à l'étranger, deviennent de plus en plus strictes et les coûts de production augmentent.
- Il est nécessaire d'optimiser le flux de processus et d'améliorer le niveau de fabrication verte.

## V. Résumé

En tant que matériau de base essentiel pour la fabrication haut de gamme, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer bénéficient d'un soutien politique important et d'une attention accrue de la part de l'industrie en raison de leurs propriétés physiques et chimiques uniques et de leurs atouts stratégiques en tant que ressources. Portée par les orientations politiques et l'innovation technologique, l'industrie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer continuera d'améliorer sa compétitivité, contribuant ainsi au développement indépendant, contrôlable et de haute qualité de la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fabrication haut de gamme et devenant un pilier essentiel de la sécurité stratégique nationale et du progrès scientifique et technologique.

## 9.6 Futures avancées technologiques et orientations de modernisation industrielle des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Avec les progrès scientifiques et technologiques constants et la diversification des besoins industriels, l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, matériau stratégique de haute performance, fait l'objet d'innovations technologiques et de modernisations industrielles, essentielles au développement d'une production haut de gamme. Cette section explore en profondeur les avancées technologiques potentielles, les axes d'innovation et les pistes de modernisation industrielle de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer à l'avenir, aidant ainsi l'industrie à saisir de nouvelles opportunités et à relever les défis.

### 1. Orientations fondamentales des futures avancées technologiques

#### 1. Haute densification et uniformité améliorée des tissus

- En optimisant le processus de métallurgie des poudres, la technologie de frittage et les paramètres de traitement thermique, une densité ultra-élevée et une microstructure raffinée et uniforme de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer sont obtenues, améliorant ainsi les propriétés mécaniques globales et la durée de vie.
- Appliquez de nouveaux procédés avancés tels que le frittage au plasma et le pressage à chaud rapide pour raccourcir les cycles de production et réduire les taux de défauts.

#### 2. Technologie de renforcement des nanostructures et des composites multi-échelles

- L'introduction de renforts de deuxième phase tels que des nanoparticules et des nanofibres peut permettre un renforcement au niveau nanométrique et améliorer la résistance, la ténacité et la résistance à l'usure.
- Développer la conception de matériaux composites multi-échelles, coordonner la synergie entre les structures de différentes échelles et améliorer les performances globales des matériaux.

#### 3. Conception et développement fonctionnel de systèmes d'alliages multicomposants

- En combinant la science des matériaux informatiques avec des expériences à haut débit, nous concevons de nouveaux alliages multicomposants pour obtenir des propriétés composites multifonctionnelles telles qu'une résistance et une ténacité élevées, une résistance aux températures élevées et une résistance à la corrosion.
- Développer des alliages fonctionnels dotés de propriétés physiques spécialisées, telles qu'une conductivité thermique élevée, une faible réponse magnétique ou une résistance élevée aux radiations.

#### 4. Fabrication intelligente et contrôle numérique des processus

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Promouvoir des équipements intelligents de préparation, de formage et de traitement thermique de poudre pour réaliser une surveillance en ligne et un contrôle précis du processus et garantir la cohérence de la qualité du produit.
- Utilisez le Big Data et l'intelligence artificielle pour optimiser les paramètres de processus, obtenir une fabrication flexible et répondre rapidement à la demande du marché.

#### 5. Technologies de fabrication verte et d'économie circulaire

- Promouvoir des procédés de fabrication à faible consommation d'énergie et à faibles émissions, combinés à des technologies de recyclage et de réutilisation des déchets, pour parvenir à un recyclage des ressources et à une production respectueuse de l'environnement.
- Développer des technologies efficaces de recyclage et de séparation des matériaux pour réduire la dépendance aux matières premières et assurer le développement durable de l'industrie.

## 2. Principales voies vers la modernisation industrielle

### 1. La modernisation industrielle portée par l'innovation technologique

- Renforcer la recherche fondamentale et la R&D appliquée, promouvoir l'intégration profonde de l'industrie, du monde universitaire, de la recherche et de l'application, et former des capacités d'innovation continue.
- L'accent est mis sur la suppression des goulots d'étranglement des processus de préparation et des limites de performance des matériaux pour répondre aux exigences haut de gamme dans l'aérospatiale, l'énergie nucléaire, la défense nationale, etc.

### 2. Intégration de la chaîne industrielle et amélioration des capacités de support haut de gamme

- Optimiser la coordination des chaînes industrielles en amont et en aval et améliorer les capacités de soutien telles que les matières premières, la fabrication d'équipements et les services de test.
- Cultiver des fournisseurs de technologies clés et d'équipements de base pour parvenir à la localisation et au contrôle indépendant de la chaîne industrielle.

### 3. Orientation marché et expansion des applications

- Se concentrer sur les domaines à forte valeur ajoutée et se développer sur les marchés émergents tels que les soins médicaux, l'électronique haut de gamme et les nouvelles énergies.
- Renforcer le développement du marché international et améliorer l'influence de la marque et la compétitivité internationale.

### 4. Culture des talents et construction industrielle écologique

- Mettre en place un système complet de formation des talents techniques pour favoriser l'amélioration des capacités professionnelles, techniques et de gestion.
- Promouvoir la construction de parcs industriels et de plateformes d'innovation pour former un écosystème industriel sain.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Perspectives

Le développement futur des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer s'appuiera sur l'intégration de la science des matériaux, des technologies de fabrication et de l'innovation numérique pour réaliser des avancées majeures en termes de performances et de capacités de production. Grâce aux avancées technologiques et aux modernisations industrielles, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer devraient jouer un rôle clé dans un plus large éventail de secteurs manufacturiers haut de gamme, contribuant ainsi à la réalisation des objectifs stratégiques nationaux et propulsant les industries concernées vers une nouvelle ère de développement durable et de haute qualité.



## Chapitre 10 Frontières de la recherche et orientations futures des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

### 10.1 Concepts de conception avancés et tendances en matière de microalliage des alliages W-Mo-Ni-Fe

Avec le développement rapide de la science des matériaux modernes et les exigences croissantes en matière de fabrication haut de gamme, la philosophie de conception des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer évolue progressivement, passant d'une conception traditionnelle basée sur l'expérience à une combinaison de calculs scientifiques et de techniques de microalliage. Clé de voûte pour l'amélioration des performances des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, le microalliage, associé à des concepts de conception avancés, constitue une base solide pour des avancées majeures en matière de performances des matériaux et de fonctionnalités étendues.

#### 1. Éléments fondamentaux des concepts de conception avancés

##### 1. Conception computationnelle des matériaux

- En utilisant des calculs de premiers principes, des calculs de diagrammes de phases et des simulations multi-échelles, nous pouvons prédire avec précision les interactions entre les éléments d'alliage et les lois d'évolution de la microstructure, et guider l'optimisation de la composition.
- Grâce à des expériences à haut débit et à la technologie d'apprentissage automatique, les ratios d'alliage peuvent être rapidement examinés pour obtenir une personnalisation des performances.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Conception d'optimisation multi-objectifs

- En prenant en compte plusieurs indicateurs de performance tels que la résistance, la ténacité, la résistance à l'usure et la stabilité thermique, une méthode d'optimisation multi-objectifs est utilisée pour équilibrer divers indicateurs de performance.
- Se concentrer sur l'adéquation globale des performances des matériaux et l'adaptabilité des processus pour améliorer l'étendue et la fiabilité des applications des alliages.

## 3. Conception de matériaux fonctionnels

- En combinaison avec les exigences de l'environnement de service, un système d'alliage multifonctionnel est conçu avec des fonctions spéciales telles que la conductivité thermique, le blindage électromagnétique, la résistance aux radiations ou la résistance à la corrosion.
- Grâce à l'ingénierie d'interface et à la conception composite, de nouvelles propriétés fonctionnelles sont conférées à l'alliage pour répondre aux besoins de conditions de travail complexes dans de multiples domaines.

## 2. Tendances de développement de la technologie des microalliages

### 1. Ajout précis d'oligo-éléments

- En ajoutant des traces de vanadium, de titane, de niobium, de zirconium et d'autres éléments à la matrice traditionnelle tungstène-molybdène-nickel-fer, le raffinement des grains et le renforcement par précipitation sont obtenus en formant de fines particules de seconde phase ou en renforçant une solution solide.
- Améliorez efficacement la ténacité, la stabilité thermique et la résistance à l'usure de l'alliage et améliorez considérablement ses performances de service.

### 2. Mécanisme de renforcement par microalliage à l'échelle nanométrique

- Des phases ou structures de renforcement à l'échelle nanométrique sont utilisées pour obtenir un renforcement de l'interface du matériau et une stabilisation des joints de grains.
- La distribution uniforme des nanoparticules favorise l'uniformité des tissus, réduit les défauts et améliore les performances globales du matériau.

### 3. Microalliage et optimisation du couplage des procédés

- La morphologie et la distribution des éléments de microalliage sont optimisées en combinant des paramètres de processus tels que la préparation de la poudre, le frittage et le traitement thermique.
- Réaliser une régulation coordonnée de la conception des composants et du cheminement du processus pour améliorer la densité et l'uniformité des matériaux.

### 4. Considérations relatives à la protection de l'environnement et à la fabrication verte

- Optimiser le taux d'ajout d'éléments de micro-alliage et réduire l'utilisation d'éléments rares ou nocifs pour répondre aux exigences de la fabrication verte.
- Améliorer la recyclabilité et l'utilisation durable des matériaux et promouvoir la transformation verte de l'industrie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### III. Perspectives d'avenir

L'intégration poussée de concepts de conception avancés et de la technologie des microalliages permettra d'améliorer les performances des matériaux tungstène-molybdène-nickel-fer. Grâce à une conception intelligente et à un contrôle précis, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer devraient offrir des performances sur mesure, des fonctions diversifiées et une fabrication efficace. Ils répondront aux exigences élevées en matière de matériaux haute performance dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'énergie nucléaire, de l'armée et d'autres secteurs, et favoriseront la percée et l'application d'une nouvelle génération de technologies de fabrication haut de gamme.

### 10.2 Recherche sur les nanocomposites et les matériaux à gradient d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Avec les progrès constants de la science des matériaux, les nanotechnologies et la conception de structures à gradient sont de plus en plus utilisées dans les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. L'introduction de nanocomposites et de structures à gradient permet d'améliorer considérablement les performances globales des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, répondant ainsi aux besoins d'applications plus complexes et exigeantes. Cette section se concentre sur les avancées de la recherche en technologie nanocomposite et conception de matériaux à gradient, ainsi que sur leurs perspectives d'application dans les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

#### 1. Application des nanocomposites aux alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

##### 1. Introduction de la phase nano-renforcée

- En ajoutant des nanoparticules (telles que des carbures, des oxydes, des nitrures, etc.), une deuxième phase fine et uniformément répartie est formée, ce qui améliore considérablement la résistance et la dureté de l'alliage.
- Le mécanisme de renforcement de l'interface des nanoparticules empêche efficacement le mouvement de dislocation et améliore la limite d'élasticité et la durée de vie en fatigue du matériau.

##### 2. Technologie de préparation de structures nanocomposites

- En utilisant des technologies de préparation de poudre telles que l'alliage mécanique, le séchage par atomisation et le broyage à boulets, les nanoparticules sont uniformément dispersées dans la poudre matricielle.
- La combinaison de technologies de frittage avancées (telles que le frittage par plasma d'étincelles et le pressage isostatique à chaud) garantit la densification et la structure uniforme des nanocomposites.

##### 3. Effet des nanocomposites sur la stabilité thermique

- La phase nano-renforcée améliore les performances à haute température de l'alliage, stabilise les joints de grains et inhibe la croissance des grains.
- Améliorer la durabilité et la sécurité de service des matériaux dans des environnements extrêmes (haute température, rayonnement).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Conception de matériaux à gradient et intégration fonctionnelle

### 1. Le concept et les avantages des matériaux à gradient

- Les matériaux à gradient font référence à des systèmes de matériaux dont la composition chimique, la microstructure ou les propriétés changent progressivement dans une certaine direction.
- Grâce à la conception de gradient, l'optimisation spatiale des propriétés des matériaux peut être obtenue pour répondre aux besoins différenciés de différentes régions en matière de propriétés telles que la résistance, la ténacité et la résistance à l'usure.

### 2. Méthode de réalisation d'une structure à gradient d'un alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

- Les technologies de fabrication additive telles que l'empilement couche par couche de poudre et le revêtement laser sont utilisées pour contrôler le gradient de composition et la distribution des tissus.
- Le processus de traitement thermique régule la structure organisationnelle des différentes régions pour obtenir des performances de gradient.

### 3. Avantages des matériaux à gradient en termes de résistance aux chocs thermiques et à la fatigue

- La structure à gradient peut atténuer efficacement la concentration de contraintes dans le matériau et améliorer la résistance aux chocs thermiques.
- Prolongez la durée de vie du matériau en cas de fatigue et améliorez la stabilité du service.

## 3. Effets synergétiques des nanocomposites et des matériaux à gradient

- En combinant la technologie nanocomposite avec la conception à gradient, nous développons des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer fonctionnellement intégrés pour obtenir un renforcement local et une optimisation globale des performances.
- Cette stratégie composite améliore non seulement la résistance et la dureté du matériau, mais améliore également sa ténacité et sa résistance à la chaleur, répondant aux besoins d'une variété de scénarios d'application complexes.

## 4. Orientations de recherche futures

- Développer des technologies de fabrication de structures à dispersion uniforme et à gradient de nanoparticules plus efficaces.
- Explorez la compréhension approfondie des mécanismes microscopiques des matériaux grâce aux nanocomposites et à la conception de gradients.
- Promouvoir l'application pratique des matériaux nanocomposites à gradient d'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans des environnements extrêmes tels que l'aérospatiale, l'énergie nucléaire, etc.

## 10.3 Exploration de l'intégration de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer et de la fabrication additive à haut débit

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le développement rapide de la fabrication additive (FA), notamment des technologies de prototypage rapide à haut débit, a révolutionné la fabrication des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer. Si les méthodes traditionnelles de métallurgie des poudres sont matures, elles présentent des limites en termes de fabrication de formes complexes, d'utilisation des matériaux et d'efficacité de fabrication. L'exploration intégrée de la FA à haut débit offre de nouvelles opportunités de développement et de nouvelles voies technologiques pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

## 1. Aperçu de la technologie de fabrication additive à haut débit

### 1. Caractéristiques techniques

- Des procédés avancés tels que la fusion sélective par laser (SLM), la fusion par faisceau d'électrons (EBM) et l'impression à jet d'encre sont utilisés pour réaliser le formage couche par couche d'un alliage tungstène-molybdène-nickel-fer.
- Les processus à haut débit peuvent améliorer considérablement les taux de dépôt de matériaux et l'efficacité de fabrication pour répondre aux besoins de production de masse.

### 2. Avantages technologiques

- Les capacités de conception de formes géométriques hautement libres dépassent les limitations traditionnelles des moules et du traitement.
- Une utilisation précise des matériaux réduit les déchets et permet de réaliser des économies.
- Ajustez de manière flexible les paramètres du processus pour obtenir une optimisation locale et une conception graduelle des performances.

## 2. Préparation et adaptabilité de la poudre d'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

### 1. Optimisation des propriétés des poudres

- La distribution granulométrique, la morphologie et la fluidité de la poudre d'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer sont étudiées pour garantir son adéquation aux procédés de pulvérisation et de fusion de poudre à haut débit.
- Développer une technologie de préparation de poudre sphérique et de haute pureté pour améliorer la qualité et la densité de formage.

### 2. Contrôle de l'activité et de la stabilité de la poudre

- Contrôlez l'oxydation de la poudre et la teneur en impuretés pour garantir la stabilité du matériau et l'uniformité du tissu pendant l'impression.
- Optimiser les systèmes de stockage et de transport de poudre pour assurer une production continue et efficace.

## 3. Optimisation des paramètres du processus de fabrication additive et amélioration des performances

### 1. Dynamique du bain de fusion et contrôle de la microstructure

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les effets de paramètres clés tels que l'apport d'énergie du faisceau laser/électrons, la vitesse de balayage et l'épaisseur de la couche sur le comportement du bain de fusion et la microstructure solidifiée ont été étudiés.
- Obtenez un raffinement du grain, une structure uniforme et améliorez les propriétés mécaniques et la durée de vie.

## 2. Contrôle des contraintes résiduelles et des déformations

- Développer des stratégies de gestion du champ thermique et de soulagement des contraintes pour réduire le stress thermique et la déformation pendant l'impression.
- Combiné à un traitement thermique ultérieur, les propriétés du matériau et la précision dimensionnelle sont optimisées.

## 4. Exploration des applications de la fabrication additive d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

### 1. Fabrication de composants structurels de formes complexes

- Production de composants en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer hautes performances tels que des contrepoids inertiels complexes pour les structures de blindage aérospatiales et nucléaires.
- Associé à une conception d'optimisation de la topologie, il permet d'obtenir à la fois légèreté et hautes performances.

### 2. Fabrication de matériaux personnalisés à gradation fonctionnelle

- En utilisant la capacité de contrôle de la composition intercouche de la fabrication additive, des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer à gradient fonctionnel sont fabriqués pour obtenir une intégration multi-performances.
- Promouvoir le développement de la fabrication haut de gamme vers l'intelligence et la personnalisation.

## V. Défis et perspectives d'avenir

### 1. Difficultés techniques

- Le point de fusion élevé des alliages à base de tungstène-molybdène rend le formage difficile.
- Contrôle des défauts tels que les pores et les fissures qui sont facilement générés lors du processus de fabrication additive.
- Consommation énergétique élevée et coûts de maintenance des équipements.

### 2. Orientation du développement futur

- Développer des équipements et des procédés de fabrication additive à haute efficacité et à faible consommation d'énergie.
- Promouvoir l'optimisation du couplage profond des matériaux et des procédés pour obtenir une préparation de haute qualité.
- Explorez les technologies de fabrication intelligente et de surveillance en temps réel pour garantir la stabilité du processus de fabrication.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'intégration de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer et de la technologie de fabrication additive à haut débit favorisera grandement les percées dans les performances des matériaux et la conception structurelle, et contribuera à la mise à niveau et à l'innovation continues de l'aviation, de l'énergie nucléaire et de la fabrication d'équipements haut de gamme.

## 10.4 Évolution des performances de service des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dans des environnements extrêmes

En tant que matériaux fonctionnels hautes performances, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer sont largement utilisés dans les environnements extrêmes, notamment dans l'énergie nucléaire, l'aérospatiale et les applications militaires. L'évolution de leurs performances dans des conditions difficiles, telles que températures élevées, rayonnements intenses, contraintes élevées et milieux corrosifs, est directement liée à leur sécurité et à leur fiabilité. Cette section analyse systématiquement les mécanismes d'évolution des performances, les facteurs d'influence et les stratégies d'atténuation des risques pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer en environnements extrêmes.

### 1. Modifications de la structure et des performances dans un environnement à haute température

#### 1. Comportement de grossissement des grains et de transformation de phase

- Lors d'un service à haute température, une croissance des grains peut se produire dans la solution solide à base de tungstène-molybdène et dans la matrice nickel-fer, entraînant une diminution des propriétés mécaniques.
- Certains composants d'alliage peuvent subir des changements de phase à haute température, affectant la stabilité thermique et l'intégrité structurelle du matériau.

#### 2. Dégradation des performances de fluage thermique et de fatigue

- La déformation par fluage provoquée par une charge à haute température à long terme provoque une déformation plastique permanente du matériau, affectant la stabilité dimensionnelle.
- La fatigue thermique provoque l'initiation et la propagation de microfissures, réduisant ainsi la durée de vie.

#### 3. Oxydation et corrosion à haute température

- La formation et le taux de croissance de la couche d'oxyde à haute température affectent la résistance à la corrosion des matériaux.
- Les produits de corrosion peuvent entraîner une dégradation de la surface et une perte des propriétés mécaniques.

### 2. Influence de l'environnement radiatif sur l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

#### 1. Mécanisme de dommages causés par les radiations

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- L'irradiation par neutrons et rayons gamma conduit à l'accumulation de défauts de réseau tels que des lacunes, des atomes interstitiels et des boucles de dislocation, formant des changements microstructuraux induits par les rayonnements.
- La diffusion de défauts ponctuels et d'amas induits par l'irradiation peut entraîner une fragilisation et un durcissement du matériau.

## 2. Modifications de la stabilité de phase induites par l'irradiation

- Une radiation à haute dose peut induire une séparation de phase ou une précipitation, modifiant la microstructure de l'alliage.
- Le changement de phase provoque la dégradation des propriétés mécaniques des matériaux et affecte la sécurité structurelle.

## 3. Corrosion par rayonnement et effets des gaz hydrogène/hélium

- Les gaz hydrogène et hélium produits par irradiation s'accumulent dans le matériau pour former des bulles, ce qui entraîne une expansion du volume et des microfissures.
- La corrosion par rayonnement intensifie les dommages à la surface et à l'interface du matériau.

## 3. Évolution des performances dans des environnements à fort stress et fatigue

### 1. Fissuration par corrosion sous contrainte

- Sous l'action combinée des contraintes et des milieux corrosifs, l'alliage est sujet à la fissuration par corrosion sous contrainte, ce qui réduit la fiabilité du service.
- Les défauts microstructuraux fournissent des voies d'initiation de fissures.

### 2. Fatigue cyclique et modifications de la ténacité à la rupture

- Les charges cycliques multiples induisent des dommages par fatigue et le taux de croissance des fissures est étroitement lié à l'environnement.
- La croissance des fissures de fatigue réduit la marge de sécurité du matériau.

## 4. Stratégies d'amélioration des performances dans les environnements extrêmes

### 1. Optimisation de la composition des matériaux

- Améliorer la stabilité thermique et la résistance aux radiations de l'alliage grâce au microalliage et à la conception de nanostructures.
- Contrôlez la teneur en impuretés et réduisez les défauts induits par les rayonnements.

### 2. Procédé de traitement thermique avancé

- Utiliser des processus de vieillissement et de recuit appropriés pour stabiliser la structure et inhiber le grossissement des grains.
- Optimiser les paramètres de traitement thermique pour améliorer la résistance au fluage et les performances en fatigue.

### 3. Technologie de modification de surface

- Le revêtement de surface, l'implantation ionique et d'autres méthodes sont utilisés pour améliorer la résistance à l'oxydation et à la corrosion.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Forme une couche protectrice pour empêcher la propagation des dommages causés par les radiations.

## 5. Orientations de recherche futures

- Révéler en profondeur le mécanisme d'influence du couplage de champ multiphysique sur les performances de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans un environnement extrême.
- Développer des expériences à haut débit et des technologies de simulation multi-échelles pour obtenir une prédiction précise des performances des services.
- Promouvoir une technologie de surveillance intelligente pour obtenir une évaluation en temps réel et une alerte précoce de l'état de service des alliages dans des environnements extrêmes.

L'étude sur l'évolution des performances de service de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer dans des environnements extrêmes fournira une base théorique solide et un support technique pour l'optimisation de la conception et l'assurance de la sécurité des matériaux dans les domaines connexes.

## 10.5 Matériaux alternatifs hautes performances et stratégies de développement durable pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Grâce aux progrès constants de la science des matériaux et des technologies de fabrication à l'échelle mondiale, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, matériaux à haute densité et haute résistance, jouent un rôle essentiel dans l'énergie nucléaire, l'aérospatiale, l'armée et l'électronique. Cependant, la limitation des ressources, les pressions environnementales et le développement de nouvelles technologies de matériaux ont contraint l'industrie des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer à faire face à la concurrence des matériaux alternatifs et aux défis du développement durable. Cette section se concentre sur l'état actuel et les tendances des matériaux alternatifs hautes performances, ainsi que sur les stratégies de développement durable pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.

### 1. État actuel du développement des matériaux alternatifs à hautes performances

#### 1. Matériaux en alliage à haute densité

- Les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer dominent les alliages à haute densité, mais ces dernières années, de nouveaux matériaux tels que les alliages tungstène-molybdène-cobalt, les alliages tungstène-cuivre et les alliages à haute entropie ont été largement étudiés en raison de leurs excellentes propriétés.
- Les alliages à haute entropie, en raison des effets complexes des éléments multicomposants, présentent d'excellentes propriétés mécaniques et une résistance environnementale, ce qui en fait des matériaux alternatifs potentiels.

#### 2. Composites à matrice céramique

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Les matériaux composites à base de céramiques dures telles que le carbure de tungstène et le nitrure de titane présentent une dureté et une résistance à l'usure extrêmement élevées et conviennent aux applications dans des environnements extrêmes.
- Les matériaux composites atteignent un équilibre entre résistance, ténacité et résistance aux hautes températures en concevant des structures multi-échelles.

### 3. Alliage métallique léger et à haute résistance

- Les matériaux légers tels que les alliages de titane et les alliages de magnésium sont largement utilisés dans les domaines aérospatial et automobile en raison de leur résistance spécifique élevée.
- Bien que la densité soit relativement faible, elle peut répondre aux besoins de remplacement de certains alliages traditionnels tungstène-molybdène-nickel-fer grâce à l'optimisation structurelle et à la conception composite.

## 2. Les défis du développement durable de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

### 1. Pénurie de ressources et risques d'approvisionnement

- Les ressources en métaux rares tels que le tungstène et le molybdène sont inégalement réparties et fortement affectées par le commerce et les politiques internationales.
- Les fluctuations des prix des matières premières et l'instabilité des chaînes d'approvisionnement exercent une pression sur les coûts de production des alliages et sur la compétitivité du marché.

### 2. Impact environnemental et restrictions réglementaires

- Le processus de fabrication de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer consomme beaucoup d'énergie et certains processus produisent des déchets dangereux.
- Des réglementations environnementales plus strictes stimulent la recherche et le développement de technologies de fabrication écologiques et de production propre.

### 3. L'innovation technologique et la pression de la modernisation industrielle

- Face à la concurrence des matériaux alternatifs et des technologies émergentes, une innovation continue dans la composition des alliages, les procédés et les performances est nécessaire.
- Renforcer l'intégration profonde de la conception des matériaux et de la fabrication intelligente pour obtenir une production efficace, à faible consommation et personnalisée.

## 3. Stratégie de développement durable de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer

### 1. Utilisation efficace des ressources et économie circulaire

- Promouvoir la technologie de recyclage et de réutilisation des déchets d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer pour améliorer le taux de recyclage des matériaux.
- Développer des alliages hautes performances à faible teneur en tungstène pour obtenir une allocation optimale des ressources matérielles.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Fabrication verte, économie d'énergie et réduction des émissions

- Optimisez les processus de production, réduisez la consommation d'énergie et les émissions de déchets et obtenez une fabrication verte et respectueuse de l'environnement.
- Introduire des énergies propres et des technologies avancées de surveillance environnementale pour promouvoir la transformation intelligente des usines.

## 3. Innovation matérielle et intégration multifonctionnelle

- Rechercher et développer des matériaux composites micro-alliés et multi-composants hautes performances pour élargir les domaines d'application.
- Associés à des revêtements fonctionnels, à des capteurs intelligents et à d'autres technologies, les matériaux peuvent être rendus intelligents et multifonctionnels.

## 4. Soutien politique et collaboration industrielle

- Répondre activement aux stratégies nationales et promouvoir l'innovation indépendante des matériaux clés et l'amélioration de la chaîne industrielle.
- Mettre en place une plateforme intégrée de production, d'éducation, de recherche et d'application pour renforcer la collaboration au sein de l'industrie et les échanges internationaux.

## IV. Perspectives d'avenir

- L'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer continuera de maintenir sa position importante dans la fabrication haut de gamme tout en adoptant activement de nouvelles technologies de matériaux et de nouveaux modèles de fabrication.
- Le concept de développement durable s'étendra tout au long du cycle de vie des matériaux d'alliage, favorisant la transformation verte et la modernisation innovante de l'industrie.
- À l'avenir, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer et les matériaux alternatifs formeront un modèle de développement complémentaire, permettant d'obtenir une situation gagnant-gagnant en termes de performances des matériaux et d'avantages environnementaux.

Le développement durable des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer améliore non seulement les performances du matériau lui-même, mais constitue également la clé du développement sain et écologique de la chaîne industrielle associée. Grâce à l'innovation technologique et à l'optimisation des ressources, les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer continueront d'apporter un soutien solide à la fabrication de pointe et aux industries émergentes stratégiques.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

appendice

**Annexe 1 : Résumé des paramètres de performance typiques de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer**

Cette annexe résume les principales propriétés physiques, mécaniques et chimiques des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, à titre de référence pour la conception, la fabrication et le contrôle qualité. Les données proviennent de documents normatifs nationaux et internationaux et d'applications industrielles courantes.

Catégorie de paramètre	Indicateurs de performance	Plage numérique	unité	Remarque
Propriétés physiques	densité	16,5 – 18,5	g/cm <sup>3</sup>	Affecté par la composition et la densité
	proportion	16,5 – 18,5	—	Presque la même que la densité
	Coefficient de dilatation thermique	4,5 – 6,0 × 10 <sup>-6</sup>	1/K	Plage de 20 °C à 500 °C
	Conductivité thermique	70 – 120	W/( m·K )	Selon les différences de composition et de microstructure
Propriétés mécaniques	résistance à la traction	500 – 900	MPa	Alliage typique de tungstène-molybdène-nickel-fer issu de la métallurgie des poudres
	Limite d'élasticité	350 – 700	MPa	
	ténacité à la rupture	15 – 30	MPa·m <sup>0,5</sup>	Varie en fonction de la méthode de test et de l'état de l'échantillon
	Dureté (dureté Rockwell)	80 – 95	HRC	Dépend du traitement thermique et de la microstructure
	Élongation	5 – 15	%	Généralement faible, reflétant la résistance du matériau
composition chimique	Teneur en tungstène (W)	85 – 95	% en poids	Principaux composants de l'alliage
	Teneur en molybdène (Mo)	2 – 10	% en poids	Éléments importants du contrôle des performances
	Teneur en nickel (Ni)	3 – 8	% en poids	Ingrédients clés de la phase liante
	Teneur en fer (Fe)	1 – 5	% en poids	Composition de la phase liante
	Impuretés (telles que C, S, O, N)	≤ 0,05	% en poids	Impact significatif sur les performances, nécessite un contrôle strict
Propriétés électriques	Résistivité	6 – 10	μΩ·cm	Affecté par la composition de l'alliage et la température
Propriétés magnétiques	Perméabilité magnétique	1,0 – 1,5	—	La plupart sont des matériaux faiblement magnétiques ou paramagnétiques

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

**Mode d'emploi :**

- Les paramètres ci-dessus ne sont que des valeurs typiques et les performances réelles sont grandement affectées par le rapport de composition, le processus de préparation et les conditions de traitement thermique.
- Dans des applications spécifiques, il est recommandé de combiner des données de test détaillées et des spécifications standard pour la conception et la sélection des matériaux.
- Les performances des matériaux sont continuellement optimisées et nous devons prêter attention aux derniers résultats de recherche et aux tendances de l'industrie.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Annexe 2 : Tableau comparatif des nuances et des compositions chimiques des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Cette annexe résume les nuances courantes d'alliages tungstène-molybdène-nickel-fer et leurs plages de composition chimique typiques, à titre de référence pour le choix des matériaux et le contrôle qualité. Les données sont basées sur les normes nationales et internationales et les spécifications industrielles courantes.

Nuance d'alliage	Teneur en tungstène (W) (% en poids)	Teneur en molybdène (Mo) (% en poids)	Teneur en nickel (Ni) (% en poids)	Teneur en fer (Fe) (% en poids)	Teneur en autres éléments (% en poids)	Remarque
W <sub>Ni</sub> Fe-85/7/3	85	7	7	3	≤ 0,05 (impuretés)	Alliage commun à haute densité, bonnes performances globales
W <sub>Ni</sub> Fe-90/7/3	90	7	7	3	≤ 0,05 (impuretés)	Teneur élevée en tungstène, adaptée aux applications à densité élevée
W <sub>Mo</sub> W <sub>Ni</sub> Fe-85/5/7/3	85	5	7	3	≤ 0,05 (impuretés)	Modification contenant du molybdène pour améliorer la résistance aux hautes températures
W <sub>Mo</sub> W <sub>Ni</sub> Fe-90/3/5/2	90	3	5	2	≤ 0,05 (impuretés)	Teneur modérée en molybdène, performances équilibrées
W <sub>Ni</sub> Fe-75/15/10	75	—	15	10	≤ 0,05 (impuretés)	Faible teneur en tungstène, plasticité et performances de traitement améliorées
W <sub>Ni</sub> Fe-80/10/10	80	—	10	10	≤ 0,05 (impuretés)	Propriétés mécaniques et ténacité équilibrées

### Remarques :

- **Règles de désignation des marques :** Généralement exprimées en pourcentage des principaux composants (tungstène, molybdène, nickel, fer). L'ordre précis et le ratio de teneur varient légèrement selon le fabricant et la norme.
- **Éléments d'impuretés :** La teneur en impuretés telles que le carbone (C), le soufre (S), l'oxygène (O) et l'azote (N) est contrôlée à des niveaux extrêmement bas pour garantir des performances d'alliage stables.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Correspondance des performances** : différentes nuances conviennent à différentes exigences d'application, telles que le blindage haute densité, les structures haute température ou les composants à haute ténacité.
- **Formule personnalisée** : Certaines applications haut de gamme ajusteront la teneur en oligo-éléments en fonction de la demande et réaliseront une conception de micro-alliage.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

### Annexe 3 : Documents standard et index de référence sur les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Cette annexe résume les principales normes, spécifications et références dans le domaine des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer, couvrant les normes nationales et internationales faisant autorité, les rapports techniques, les documents de brevets et les articles universitaires pour référence dans la recherche et l'application.

#### 1. Normes et standards internationaux

- *La norme*  
**ASTM B777-15 pour les barres, pièces forgées et formes en alliage lourd de tungstène**, une norme de l'American Society for Testing and Materials pour les barres en alliage lourd de tungstène, couvre les exigences techniques pertinentes pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer.
- **MIL-DTL-15326F**  
*pour les alliages lourds de tungstène*  
est une norme de matériau militaire américaine pour les alliages de tungstène adaptés aux applications militaires et aérospatiales hautes performances.
- **ISO 16135:2014**  
*Alliages de métaux lourds — Alliages lourds de tungstène — Conditions techniques de livraison*  
Organisation internationale de normalisation conditions de livraison et exigences de qualité pour les alliages lourds de tungstène.

#### 2. Normes nationales et industrielles de la Chine

- **GB/T 18053-2018**  
*est*  
la norme nationale pour les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer et les tiges en alliage de tungstène haute densité associées, couvrant la composition, les propriétés et les méthodes d'essai.
- **La norme YS/T 287-2010**  
*Conditions techniques pour les matériaux en alliage de tungstène*  
est une norme de l'industrie militaire qui spécifie les spécifications techniques et les normes d'inspection pour les matériaux en alliage de tungstène-molybdène-nickel-fer.

#### 3. Rapports et documents de recherche sur les technologies clés

- Wang Qiang et Li Ming, « Étude sur la technologie de préparation et les propriétés de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer », Materials Review, vol. 34, n° 7, 2020.  
La méthode de préparation de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer et son influence sur les propriétés mécaniques ont été étudiées.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Zhang Y., Li H., « Microstructure et propriétés mécaniques des alliages lourds W-Mo-Ni-Fe », *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 782 : 224-233.
- Chen Jie et al., « Optimisation des performances de l'alliage nanostructuré W-Mo-Ni-Fe », *Acta Metallurgica Sinica*, vol. 57, n° 4, 2021.  
Cette étude explore le mécanisme par lequel les nanostructures améliorent les performances des alliages.

#### 4. Littérature sur les brevets

- CN108234567A : Méthode de préparation et application de l'alliage tungstène-molybdène-nickel-fer, inventeur : Li Hua, 2018. Cet article présente une technologie de préparation par métallurgie des poudres pour un alliage tungstène-molybdène-nickel-fer haute performance.
- US9876543B2 : Alliage tungstène-molybdène-nickel-fer à haute densité et procédé de fabrication, inventeur : John Smith, 2017.  
Un nouvel alliage tungstène-molybdène-nickel-fer à haute densité et son procédé de fabrication.

#### V. Normes industrielles et directives techniques

- Manuel technique sur les matériaux en alliage de tungstène, CTIA GROUP, publié en 2019. Il s'agit d'une compilation de données techniques systématiques sur les alliages tungstène-molybdène-nickel-fer et les matériaux en alliage de tungstène associés.
- Spécifications du procédé de métallurgie des poudres d'alliages de métaux lourds, Association chinoise de métallurgie des poudres, 2021.  
Contient des conseils de l'industrie pour la préparation et le traitement des poudres d'alliages de tungstène-molybdène-nickel-fer.

#### Utilisation recommandée :

- Les chercheurs et les ingénieurs peuvent utiliser les normes et la littérature de cette annexe pour sélectionner les matériaux, optimiser les processus et effectuer des tests de qualité.
- Garder un œil sur les dernières normes internationales et nationales vous aidera à rester technologiquement avancé et à répondre aux exigences de conformité.
- Associés à une technologie brevetée, nous favorisons la recherche et le développement ainsi que l'industrialisation de nouveaux produits en alliage tungstène-molybdène-nickel-fer.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Annexe 4 : Glossaire des termes et définitions des abréviations anglaises des alliages tungstène-molybdène-nickel-fer

Cette annexe contient des termes professionnels et des abréviations anglaises couramment utilisées liées aux alliages tungstène-molybdène-nickel-fer pour aider les lecteurs à comprendre et à appliquer avec précision les informations techniques pertinentes.

### 1. Glossaire

le terme	Interprétation
<b>Alliage tungstène-molybdène-nickel-fer</b>	Les alliages à haute densité composés de tungstène (W), de molybdène (Mo), de nickel (Ni) et de fer (Fe) sont largement utilisés dans les domaines industriels à haute performance.
<b>Métallurgie des poudres</b>	Le processus de préparation de matériaux en alliage par pressage et frittage de poudre métallique.
<b>frittage</b>	Le processus de combinaison de particules de poudre en un solide dense à haute température est un maillon clé du processus.
<b>microstructure</b>	La microstructure de l'alliage, y compris les grains, les limites de phase et la distribution des impuretés.
<b>Densification</b>	Un processus qui augmente la densité interne du matériau, réduit la porosité et améliore les propriétés mécaniques.
<b>Traitement thermique</b>	Procédé de contrôle de la structure et des propriétés des alliages par chauffage et refroidissement.
<b>Fabrication additive</b>	Technologies de fabrication avancées, telles que l'impression 3D, qui créent des pièces de forme complexe en déposant des matériaux couche par couche.
<b>Conductivité thermique</b>	La capacité d'un matériau à conduire la chaleur, mesurée en watts par mètre par kelvin (W/(m·K)).
<b>résistance à la traction</b>	La contrainte maximale à laquelle un matériau résiste à la rupture par traction, généralement exprimée en mégapascals (MPa).
<b>Réponse magnétique</b>	Comportement magnétique d'un matériau sous un champ magnétique externe, y compris le paramagnétisme et le ferromagnétisme.
<b>Résistance à la corrosion</b>	La capacité de l'alliage à résister à la corrosion chimique et à l'érosion environnementale.
<b>Essais non destructifs</b>	Méthodes de détection qui ne détruisent pas la structure du matériau, telles que les tests par ultrasons, les tests par rayons X et les tests par particules magnétiques.

### 2. Définitions des abréviations anglaises

Abréviations	Nom et prénom	Interprétation
<b>W</b>	Tungstène	Tungstène
<b>Mo</b>	Molybdène	molybdène
<b>Ni</b>	Nickel	nickel

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Fe</b>	Fer	fer
<b>ASTM</b>	Société américaine pour les essais et les matériaux	American Society for Testing and Materials, une organisation internationale qui développe de nombreuses normes de matériaux.
<b>MIL</b>	Spécification militaire	Les normes militaires américaines couvrent les spécifications des matériaux et équipements militaires.
<b>ISO</b>	Organisation internationale de normalisation	Organisation internationale de normalisation, qui élabore des normes unifiées à l'échelle internationale.
<b>GB/T</b>	Guobiao / Norme technique	Numéro de norme nationale chinoise/norme recommandée.
<b>YS/T</b>	Norme de l'industrie	Numéro standard de l'industrie chinoise.
<b>PVD</b>	dépôt physique en phase vapeur	Dépôt physique en phase vapeur, une technique de dépôt de couches minces.
<b>SEM</b>	Microscope électronique à balayage	Microscope électronique à balayage, utilisé pour l'analyse de la microstructure des matériaux.
<b>DRX</b>	Diffraction des rayons X	Diffraction des rayons X, une technique d'analyse de la structure cristalline des matériaux.
<b>ICP</b>	Plasma à couplage inductif	Plasma à couplage inductif pour l'analyse de la composition chimique.
<b>XRF</b>	Fluorescence X	Spectroscopie de fluorescence X pour l'analyse élémentaire quantitative.
<b>ONH</b>	Oxygène, azote, hydrogène	Les méthodes d'analyse de la teneur en oxygène, en azote et en hydrogène sont utilisées pour détecter les impuretés gazeuses dans les matériaux.
<b>tomodensitométrie</b>	tomodensitométrie	Tomodensitométrie pour la détection des défauts internes.
<b>RoHS</b>	Restriction des substances dangereuses	Directive sur la restriction de l'utilisation de certaines substances dangereuses, législation environnementale de l'UE.
<b>ATTEINDRE</b>	Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des produits chimiques	Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques (REC) de l'UE.
<b>Fiche de données de sécurité</b>	Fiche de données de sécurité	Fiche de données de sécurité, qui fournit des informations sur l'utilisation sûre des produits chimiques.

**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

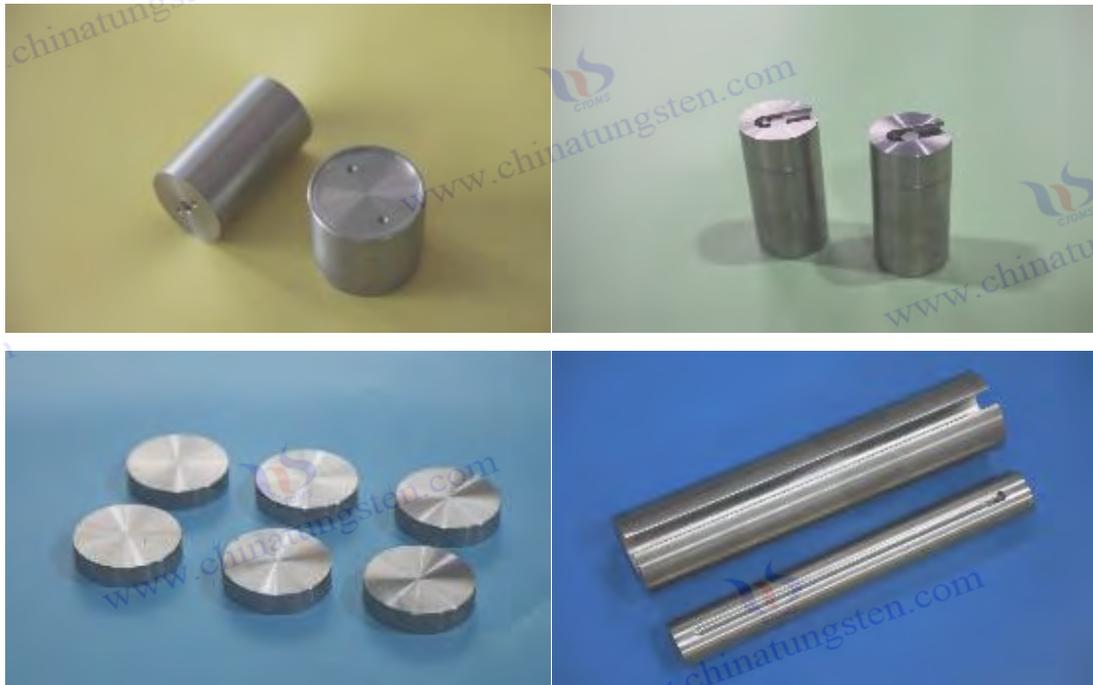
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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)