

# Encyclopédie du creuset en tungstène

中钨智造科技有限公司  
CTIA GROUP LTD

**CTIA GROUP LTD**

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

[Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale](#)

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés 电话/TEL :0086 592 512 9696  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版 CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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

## PRÉSENTATION DE CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, une filiale en propriété exclusive dotée d'une personnalité juridique indépendante établie 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. CHINATUNGSTEN ONLINE, fondée en 1997 avec [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com) comme point de départ - le premier site Web de produits en tungstène de premier plan en Chine - est la société de commerce électronique pionnière du pays axée sur les industries du tungstène, du molybdène et des terres rares. S'appuyant sur 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, des services supérieurs et de la réputation commerciale mondiale de sa société mère, devenant ainsi un fournisseur de solutions d'application complètes dans les domaines des produits chimiques à base de tungstène, des métaux de tungstène, des carbures cémentés, des alliages à haute densité, du molybdène et des alliages de molybdène.

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, desservant près de 100 000 abonnés et fournissant quotidiennement des informations gratuites à des centaines de milliers de professionnels de l'industrie dans le monde entier. Avec des milliards de visites cumulatives sur son site Web et son compte officiel, elle est devenue un centre d'information mondial reconnu et faisant autorité pour les industries du tungstène, du molybdène et des terres rares, fournissant des informations multilingues 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7, les performances des produits, les prix du marché et les tendances du marché.

S'appuyant sur la technologie et l'expérience de CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP se concentre sur la satisfaction des besoins personnalisés des clients. À l'aide de la technologie de l'IA, elle conçoit et produit en collaboration des produits en tungstène et en molybdène avec des compositions chimiques et des propriétés physiques spécifiques (telles que la taille des particules, la densité, la dureté, la résistance, les dimensions et les tolérances) avec ses clients. Elle offre des services intégrés complets allant de l'ouverture du moule, de la production d'essai, à la finition, à l'emballage et à 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, jetant ainsi les bases d'une fabrication personnalisée, flexible et intelligente. S'appuyant sur cette base, CTIA GROUP approfondit encore la fabrication intelligente et l'innovation intégrée des matériaux en tungstène et en molybdène à l'ère de l'Internet industriel.

Le Dr Hanns et son équipe de CTIA GROUP, sur la base de leurs plus de 30 ans d'expérience dans l'industrie, ont également rédigé et publié des analyses de connaissances, de technologies, de prix du tungstène et de tendances du marché liées au tungstène, au molybdène et aux terres rares, les partageant librement avec l'industrie du tungstène. Le Dr Han, avec 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 à haute densité, est un expert renommé dans les produits de tungstène et de molybdène, tant au niveau national qu'international. Adhérant au principe de fournir des informations professionnelles et de haute qualité à l'industrie, l'équipe de CTIA GROUP rédige en permanence des documents de recherche technique, des articles et des rapports sur l'industrie en fonction des pratiques de production et des besoins des clients du marché, ce qui lui vaut de nombreux éloges dans l'industrie. Ces réalisations constituent un soutien solide à l'innovation technologique, à la promotion des produits et aux échanges industriels de CTIA GROUP, ce qui lui permet de devenir un chef de file mondial dans la fabrication de produits en tungstène et en molybdène et les services d'information.



### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés 电话/TEL :0086 592 512 9696  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版 CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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

CTIA GROUP LTD

Tungsten Crucible Introduction

1. Overview of Tungsten Crucibles

Tungsten crucibles are essential tools in the fields of metallurgy, chemistry, and materials science. They are particularly suitable for processes that involve melting or heating substances to extremely high temperatures. Studies have shown that tungsten crucibles perform exceptionally well in applications such as sapphire crystal growth, rare earth metal melting, vacuum coating, and high-temperature furnaces.

2. Features of Tungsten Crucibles

Ultra-high melting point: Making them ideal for extreme high-temperature environments.

High purity: purity of  $\geq 99.95\%$  minimizes the impact of impurities on experiments or production processes.

Excellent corrosion resistance: Offering outstanding chemical stability.

High density and low vapor pressure: Ensuring material stability.

High strength and wear resistance: Ensuring long service life.

Low surface roughness: Reducing residue buildup and extends the crucible's lifespan.

3. Applications of Tungsten Crucibles

**Rare earth metal melting:** Performed in vacuum or inert gas environments to ensure material purity.

**Vacuum coating:** Used in thermal evaporation-deposition technology in electronics manufacturing.

**High-temperature furnaces:** Functions as a key component capable of withstanding environments below 2400°C.

**Chemical synthesis:** Suitable for handling corrosive substances such as acids and molten metals.

**Metal smelting and refining:** Used for melting and refining high-purity metals.

**Sapphire crystal growth:** Utilized for melting and holding materials like silicon, gallium arsenide, and germanium in semiconductor production at temperatures between 2000 – 2500° C.

4. Specifications of Tungsten Crucibles

Specification	Details
Material	Pure tungsten or tungsten alloy
Purity	99.95%
Diameter	20–620 mm
Height	20–500 mm
Wall Thickness	3.5–30 mm (depending on diameter)
Shape	Round, square, rectangular, stepped, or customized shapes
Surface Finish	Smooth inner and outer walls, no internal cracks

5. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten.com.cn](http://www.tungsten.com.cn)

Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

## Contenu

### Chapitre 1 Théorie générale du creuset en tungstène

- 1.1 Définition et concept de base du creuset en tungstène
- 1.2 Développement historique des creusets en tungstène
- 1.3 L'importance stratégique du creuset en tungstène dans l'industrie moderne
- 1.4 Distribution des ressources mondiales de tungstène et état de l'exploitation minière
- 1.5 Vue d'ensemble de la chaîne industrielle des creusets en tungstène

### Chapitre 2 Caractéristiques du creuset en tungstène

- 2.1 Spécifications de géométrie et de taille du creuset en tungstène
  - 2.1.1 Dimensions standard (diamètre, épaisseur de paroi, hauteur)
  - 2.1.2 Conception personnalisée et taille non standard
  - 2.1.3 Volume et capacité de charge
  - 2.1.4 Conception de la forme (cylindrique, conique, de forme spéciale)
- 2.2 Qualité de surface du creuset en tungstène
  - 2.2.1 Polissage, meulage et usinage des surfaces
  - 2.2.2 Normes de rugosité de surface (Ra, Rz)
  - 2.2.3 Détection et contrôle des défauts de surface
  - 2.2.4 Revêtement et modification du revêtement
- 2.3 Pureté du matériau du creuset en tungstène
  - 2.3.1 Tungstène de haute pureté
  - 2.3.2 Analyse des éléments d'impuretés
  - 2.3.3 Effet de la pureté sur la performance à haute température
- 2.4 Propriétés thermiques du creuset en tungstène
  - 2.4.1 Stabilité à haute température du creuset en tungstène
  - 2.4.2 Résistance aux chocs thermiques et durée de vie à la fatigue thermique du creuset en tungstène
  - 2.4.3 Conductivité thermique et caractéristiques du rayonnement thermique
  - 2.4.4 Adaptation de la dilatation thermique
- 2.5 Stabilité chimique du creuset en tungstène
  - 2.5.1 Résistance à la corrosion acide et alcaline
  - 2.5.2 Inertie à haute température et capacité antipollution
  - 2.5.3 Compatibilité avec le métal en fusion et les alliages
- 2.6 Propriétés mécaniques du creuset en tungstène
  - 2.6.1 Résistance à la déformation à haute température
  - 2.6.2 Résistance à la propagation des fissures
  - 2.6.3 Stabilité structurelle sous chauffage cyclique
  - 2.6.4 Résistance aux chocs et aux vibrations
- 2.7 Autres caractéristiques
  - 2.7.1 Propriétés électriques à haute température
  - 2.7.2 Résistance à l'usure et à l'abrasion

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

- 2.7.3 Résistance aux rayonnements (applications dans l'industrie nucléaire)
- 2.8CTIA GROUP LTD Creuset en tungstène MSDS

### Chapitre 3 Processus de préparation et technologie

- 3.1 Préparation des matières premières
  - 3.1.1 Raffinage du minerai de tungstène et production de poudre
  - 3.1.2 Caractéristiques chimiques et physiques de la poudre de tungstène
  - 3.1.3 Contrôle de la taille et de la morphologie des particules
  - 3.1.4 Inspection de la qualité des matières premières
- 3.2 Procédé de métallurgie des poudres
  - 3.2.1 Mélange de poudre de tungstène et additifs
  - 3.2.2 Pressage à froid et préformage
  - 3.2.3 Densification et déliantage des poudres
- 3.3 Processus de formage
  - 3.3.1 Pressage isostatique
  - 3.3.2 Moulage par compression et extrusion
  - 3.3.3 Filage et étirement
  - 3.3.4 Formation de formes complexes
  - 3.3.5 Conception et fabrication du moule
- 3.4 Procédé de frittage
  - 3.4.1 Frittage sous vide
  - 3.4.2 Frittage d'hydrogène/gaz inerte
  - 3.4.3 Optimisation de la température, du temps et de l'atmosphère
  - 3.4.4 Frittage à plusieurs étages et à gradient
  - 3.4.5 Frittage, retrait et contrôle granulométrique
- 3.5 Usinage et finition
  - 3.5.1 Tournage, fraisage, perçage
  - 3.5.2 EDM et découpe laser
  - 3.5.3 Meulage et polissage de précision
  - 3.5.4 Revêtements de surface
- 3.6 Technologie de post-traitement
  - 3.6.1 Traitement thermique et recuit
  - 3.6.2 Renforcement de la surface
  - 3.6.3 Nettoyage et décontamination
  - 3.6.4 Soulagement des contraintes et optimisation de la structure
- 3.7 Contrôle de la qualité et essais
  - 3.7.1 Essais dimensionnels et géométriques
  - 3.7.2 Essais non destructifs
  - 3.7.3 Analyse chimique et microstructurale
  - 3.7.4 Essais de performance à haute température
  - 3.7.5 Certification et traçabilité
- 3.8 Technologie de fabrication de pointe

Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

- 3.8.1 Fabrication additive (impression 3D)
- 3.8.2 Fusion laser et pulvérisation plasma
- 3.8.3 Microfabrication
- 3.8.4 Fabrication intelligente et industrie 4.0

## Chapitre 4 Technologie de production et innovation

- 4.1 Automatisation et production intelligente
  - 4.1.1 CNC et robotique
  - 4.1.2 Lignes de production intégrées à l'IoT
  - 4.1.3 L'IA pour l'optimisation des processus
  - 4.1.4 Fabrication axée sur les données
- 4.2 Protection de l'énergie et de l'environnement
  - 4.2.1 Conception efficace du four de frittage
  - 4.2.2 Récupération de la chaleur résiduelle
  - 4.2.3 Méthodes de production vertes
  - 4.2.4 Technologies de production plus propres
- 4.3 Économie circulaire et ressources
  - 4.3.1 Recyclage des déchets de tungstène
  - 4.3.2 Traitement des déchets
  - 4.3.3 Chaînes d'approvisionnement durables
  - 4.3.4 Analyse du cycle de vie
- 4.4 Technologies de pointe
  - 4.4.1 Nano poudre de tungstène
  - 4.4.2 Creusets à haute entropie et en composite
  - 4.4.3 L'informatique quantique dans les matériaux
  - 4.4.4 Matériaux bio-inspirés

## Chapitre 5 Applications

- 5.1 Industrie métallurgique
  - 5.1.1 Fusion des terres rares et des métaux précieux
  - 5.1.2 Superalliages
  - 5.1.3 Métallurgie des poudres
- 5.2 Semi-conducteurs et électronique
  - 5.2.1 Croissance du silicium et du verre saphir
  - 5.2.2 Semi-conducteurs composés
  - 5.2.3 PVD et CVD
  - 5.2.4 Emballage et gestion thermique
- 5.3 Industrie chimique
  - 5.3.1 Synthèse catalytique
  - 5.3.2 Récipients de réaction corrosifs
  - 5.3.3 Raffinage chimique de haute pureté
- 5.4 Recherche scientifique

### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

- 5.4.1 Essais de matériaux à haute température
- 5.4.2 Simulations d'environnements extrêmes
- 5.4.3 Synthèse avancée des matériaux
- 5.4.4 Expériences synchrotron et neutrons
- 5.5 Aérospatiale et défense
  - 5.5.1 Composants du moteur-fusée
  - 5.5.2 Essais structuraux à haute température
  - 5.5.3 Équipement militaire
  - 5.5.4 Systèmes thermiques par satellite
- 5.6 Industrie de l'énergie
  - 5.6.1 Composants du réacteur nucléaire
  - 5.6.2 Industrie photovoltaïque
  - 5.6.3 Fabrication des piles à combustible
  - 5.6.4 Matériaux de fusion nucléaire
- 5.7 Zones émergentes et interindustrielles
  - 5.7.1 Bijouterie et fabrication de luxe
  - 5.7.2 Implants et dispositifs médicaux
  - 5.7.3 Impression 3D et moules
  - 5.7.4 Technologie quantique et supraconducteurs

## Chapitre 6 Avantages, inconvénients et défis

- 6.1 Avantages
  - 6.1.1 Point de fusion élevé et stabilité
  - 6.1.2 Excellente inertie chimique
  - 6.1.3 Fiabilité et longévité élevées
  - 6.1.4 Adaptabilité aux environnements extrêmes
- 6.2 Limites et défis
  - 6.2.1 Coût élevé
  - 6.2.2 Fragilité et difficulté d'usinage
  - 6.2.3 Limites de fabrication à grande échelle
  - 6.2.4 Chaîne d'approvisionnement et risques géopolitiques
- 6.3 Améliorations
  - 6.3.1 Réduction des coûts et production de masse
  - 6.3.2 Nouveaux matériaux et composites
  - 6.3.3 Amélioration de la précision et de l'efficacité
  - 6.3.4 Fabrication intelligente

## Chapitre 7 Directives d'utilisation

- 7.1 Installation et fonctionnement
  - 7.1.1 Inspection préalable à l'installation
  - 7.1.2 Sécurité de fonctionnement à haute température
  - 7.1.3 Protection thermique et mécanique

### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

- 7.2 Exigences environnementales
  - 7.2.1 Contrôle de l'atmosphère et de la température
  - 7.2.2 Éviter les matériaux incompatibles
  - 7.2.3 Prévenir la contamination
- 7.3 Entretien
  - 7.3.1 Inspection et nettoyage réguliers
  - 7.3.2 Surveillance des dommages à la surface
  - 7.3.3 Évaluation de la durée de vie
- 7.4 Dépannage
  - 7.4.1 Problèmes courants
  - 7.4.2 Diagnostic et réparation
  - 7.4.3 Procédures d'arrêt d'urgence

## Chapitre 8 Transport et entreposage

- 8.1 Exigences en matière de transport
- 8.2 Conditions de stockage
- 8.3 Précautions de manipulation
- 8.4 Documentation et étiquetage
- 8.5 Manipulation anormale

## Chapitre 9 Durabilité et recyclage

- 9.1 Gestion du cycle de vie
  - 9.1.1 Évaluation de la production à l'utilisation
  - 9.1.2 Impact et empreinte environnementale
  - 9.1.3 Conception et processus durables
- 9.2 Recyclage et réutilisation
  - 9.2.1 Processus de recyclage
  - 9.2.2 Défis technologiques
  - 9.2.3 Contrôle de la qualité des produits recyclés
- 9.3 Conformité environnementale
  - 9.3.1 Aperçu de la réglementation
  - 9.3.2 Normes d'élimination des déchets
  - 9.3.3 Certification et vérifications
- 9.4 Économie circulaire
  - 9.4.1 Utilisation des ressources en circuit fermé
  - 9.4.2 Analyse des avantages économiques
  - 9.4.3 Collaboration avec l'industrie

## Chapitre 10 Normes et règlements

- 10.1 Normes chinoises (GB)
  - 10.1.1 GB/T 3875-2017
  - 10.1.2 GB/T 3459-2022

### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

10.1.3 YB/T 5174-2020

10.2 Normes ISO

10.2.1 Norme ISO 9001:2015

10.2.2 La norme ISO 14001:2015

10.2.3 Norme ISO 15730:2000

10.3 Normes ASTM

10.3.1 ASTM B760-07 (2019)

10.3.2 ASTM E696-07 (2018)

10.3.3 ASTM E1447-09 (2016)

10.4 Autres normes internationales

10.4.1 JIS H 4701:2015

10.4.2 DIN EN 10204:2004

10.4.3 EN 10276-1:2000

Appendice

A. Glossaire des termes

B. Références

C. Liste des outils et équipements couramment utilisés



Creusets en tungstène de CTIA GROUP LTD

## Chapitre 1 Théorie générale du creuset en tungstène

### 1.1 Définition et concept de base du creuset en tungstène

Le creuset en tungstène est un récipient résistant aux hautes températures et à la corrosion fabriqué à partir de tungstène de haute pureté (pureté généralement  $\geq 99,95\%$ ) comme principale matière première, par métallurgie des poudres, frittage, usinage et autres processus, et est largement utilisé dans les domaines industriels tels que la fusion à haute température, la croissance cristalline, la réaction chimique et les tests de matériaux. Les propriétés de base du creuset en tungstène sont dérivées du point de fusion ultra-élevé du tungstène ( $3422^{\circ}\text{C}$ , le plus élevé parmi les métaux), de son excellente stabilité chimique et de sa résistance mécanique dans des environnements extrêmes, ce qui en fait un composant indispensable dans les processus à haute température. Ses principales fonctions comprennent l'hébergement et la manipulation de métaux en fusion, d'alliages, de céramiques ou de produits chimiques, ainsi que le maintien de l'intégrité structurelle et des performances stables à des températures allant jusqu'à  $3000^{\circ}\text{C}$  ou dans des environnements hautement corrosifs.

La structure typique d'un creuset en tungstène est cylindrique ou conique, la paroi intérieure est généralement polie avec précision pour réduire l'adhérence du matériau fondu, et l'épaisseur et la taille de la paroi sont personnalisées en fonction de l'application. Par exemple, les creusets en tungstène utilisés pour la croissance du silicium monocristallin dans l'industrie des semi-conducteurs ont généralement un diamètre de 100 à 300 mm et une épaisseur de paroi de 5 à 10 mm, tandis que les creusets utilisés dans l'industrie métallurgique pour la fusion des métaux des terres rares peuvent avoir un diamètre de plus de 500 mm et une épaisseur de paroi de 15 à 20 mm. Les performances des creusets en tungstène sont affectées par divers facteurs, notamment la pureté du matériau, la taille des grains, la qualité de surface et le processus de fabrication. Par exemple, les creusets en tungstène de haute pureté (pureté  $\geq 99,999\%$ ) réduisent considérablement la contamination par les impuretés dans la croissance des cristaux de semi-conducteurs, tandis que les creusets de faible pureté ( $99,95\%$ ) sont plus couramment utilisés dans les applications métallurgiques sensibles aux coûts.

La conception de creusets en tungstène nécessite une combinaison de propriétés thermiques, mécaniques et chimiques. Par exemple, à des températures élevées, les creusets en tungstène doivent résister aux contraintes thermiques et aux charges mécaniques tout en évitant les réactions chimiques avec des substances fondues. Dans une atmosphère vide ou inerte, la faible pression de vapeur du creuset en tungstène (seulement  $10^{-7}$  Pa à  $3000^{\circ}\text{C}$ ) garantit qu'il ne se volatilise pas et ne pollue pas l'environnement. De plus, les creusets en tungstène ont un faible coefficient de dilatation thermique (environ  $4,5 \times 10^{-6}/\text{K}$ ) et sont bien adaptés à des matériaux tels que le silicium fondu ou le saphir, ce qui réduit le risque de fissuration causée par le stress thermique. Ces dernières années, les progrès de la fabrication additive et des technologies de revêtement de surface ont encore élargi les capacités et les applications des creusets en tungstène, telles que les applications émergentes dans les réacteurs à fusion nucléaire et l'aérospatiale.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

## 1.2 Développement historique des creusets en tungstène

L'origine du creuset en tungstène est étroitement liée à l'application industrielle du tungstène métallique. Le tungstène, en tant que métal rare, a commencé à attirer l'attention au milieu du 19<sup>e</sup> siècle, mais ses premières applications étaient extrêmement limitées en raison de son point de fusion élevé et de sa difficulté de traitement. Dans les années 1870, le tungstène a commencé à être utilisé sous forme d'acier au tungstène dans la fabrication d'outils, mais les creusets en tungstène n'ont été développés qu'au début du 20<sup>e</sup> siècle. En 1909, William Brown de la General Electric Company des États-Unis et William D. Coolidge ont inventé la méthode de préparation du fil de tungstène ductile pour produire des produits de tungstène de haute pureté grâce à la métallurgie des poudres et à la technologie de frittage à haute température, marquant une percée majeure dans la technologie de traitement du tungstène. Cette technologie jette les bases de la production industrielle de creusets en tungstène.

Au début du 20<sup>e</sup> siècle, les creusets en tungstène étaient principalement utilisés dans des expériences de laboratoire à haute température telles que la fusion de métaux précieux, l'analyse chimique et la distillation sous vide. Dans les années 1920, avec les progrès de la technologie des fours à vide, les creusets en tungstène ont commencé à être utilisés dans la fusion à l'échelle industrielle de métaux rares, tels que le molybdène, le niobium et le tantale. Pendant la Seconde Guerre mondiale, les creusets en tungstène ont laissé leur marque dans l'industrie militaire, où ils ont été utilisés dans la fusion de superalliages et d'aciers spéciaux, et dans la production de moteurs d'avion et de matériaux de blindage.

Dans les années 1950, la maturité de la technologie de la métallurgie des poudres a favorisé la production à grande échelle de creusets en tungstène. L'introduction de la technologie de moulage par compression isostatique et de frittage sous vide a considérablement augmenté la densité et la résistance du creuset, lui permettant de résister à des températures plus élevées et à des charges mécaniques. Dans les années 1960, l'essor de l'industrie des semi-conducteurs est devenu un tournant dans le développement des creusets en tungstène. Les procédés de croissance du silicium monocristallin et du verre saphir (tels que les procédés Czochralski et Kyropoulos) imposent des exigences extrêmement élevées en matière de pureté et de qualité de surface des creusets, et les creusets en tungstène de haute pureté (pureté  $\geq 99,99\%$ ) commencent à devenir la norme dans l'industrie des semi-conducteurs.

Au 21<sup>e</sup> siècle, le champ d'application du creuset en tungstène s'est encore élargi. Dans le domaine aérospatial, les creusets en tungstène sont utilisés pour fabriquer des tuyères de moteurs de fusée et des matériaux structurels à haute température ; L'industrie nucléaire l'utilise pour des composants de réacteurs à haute température et des expériences de fusion nucléaire ; Les nouveaux domaines énergétiques (tels que le photovoltaïque et les piles à combustible) s'appuient sur des creusets en tungstène pour produire des matériaux en silicium et en céramique de haute pureté. Selon les rapports de l'industrie de [Chinatungsten Online](#), de 2000 à 2020, la taille du marché mondial des creusets en tungstène est passée d'environ 300 millions de dollars américains à 1,2 milliard de dollars américains, avec un taux de croissance annuel composé moyen d'environ 7,5 %. Ces dernières années, l'introduction de la fabrication additive (impression 3D) et des technologies de

fabrication intelligente a encore favorisé la production personnalisée et efficace de creusets en tungstène.

### 1.3 L'importance stratégique du creuset en tungstène dans l'industrie moderne

Le creuset en tungstène occupe une position stratégique irremplaçable dans l'industrie moderne, et son importance se reflète dans de nombreux aspects de la technologie, de l'économie et de la géopolitique :

#### La technologie au cœur de la stratégie

Les creusets en tungstène sont la pierre angulaire des procédés à haute température, en particulier dans les secteurs des semi-conducteurs, de l'aérospatiale et des nouvelles énergies. Dans l'industrie des semi-conducteurs, les creusets en tungstène sont utilisés pour la croissance du silicium monocristallin et des semi-conducteurs composés (tels que GaAs, GaN), qui affectent directement la qualité et l'efficacité de la fabrication des puces. Dans le secteur aérospatial, les creusets en tungstène sont utilisés dans la fusion des superalliages et des composites, soutenant ainsi le développement de moteurs et de composants structurels avancés. Dans le domaine des nouvelles énergies, les creusets en tungstène sont indispensables dans la production de plaquettes de silicium photovoltaïque et la préparation des matériaux des réacteurs de fusion nucléaire. Par exemple, dans le cadre du projet ITER (International Thermonuclear Experimental React), des creusets en tungstène sont utilisés pour tester des matériaux faisant face au plasma et contribuer à des percées dans le domaine des technologies d'énergie propre.

#### Valeur économique

Le marché des creusets en tungstène est une partie importante de la chaîne industrielle mondiale du tungstène. Selon Chinatungsten Online, la taille du marché mondial des creusets en tungstène était d'environ 1,3 milliard de dollars américains en 2023 et devrait atteindre 2 milliards de dollars américains d'ici 2030, en raison de l'augmentation de la demande de semi-conducteurs et de l'augmentation des investissements dans l'aérospatiale. La haute valeur ajoutée du creuset en tungstène en fait le produit de base des entreprises de produits en tungstène.

#### Géopolitique et sécurité des ressources

Le tungstène est un métal rare dont les réserves mondiales sont limitées, et la sécurité de la chaîne d'approvisionnement affecte directement la production de creusets en tungstène. La Chine représente 57 % des réserves mondiales de tungstène et 80 % de la production, et est un fournisseur majeur de creusets en tungstène. Ces dernières années, les pays occidentaux ont intensifié leurs efforts pour développer et recycler les ressources en tungstène afin de réduire leur dépendance vis-à-vis de la Chine. En conséquence, la production et la fourniture de creusets en tungstène sont devenues le centre des jeux géopolitiques.

#### Soutenir la modernisation industrielle et l'innovation

La recherche et le développement de creusets en tungstène ont favorisé les progrès de la science des matériaux, de la technologie de fabrication et de l'intelligence. Par exemple, le développement de la

poudre de nano-tungstène et des creusets en tungstène à grain ultra-fin a amélioré la résistance aux chocs thermiques et la durée de vie des creusets, et s'est adapté aux exigences plus élevées des industries des semi-conducteurs et du nucléaire. L'application de technologies de fabrication intelligentes, telles que les processus de frittage optimisés par l'IA, a permis de réduire davantage les coûts de production et d'améliorer la compétitivité mondiale.

En résumé, le creuset en tungstène n'est pas seulement un composant industriel, mais aussi l'incarnation de la force technique et de la stratégie du pays en matière de ressources, et son orientation de développement est étroitement liée à l'industrie mondiale de la haute technologie et à la transition énergétique.

#### 1.4 Distribution des ressources mondiales de tungstène et état de l'exploitation minière

Les ressources en tungstène se présentent principalement sous forme de wolframite ( $\text{FeMnWO}_4$ ) et de scheelite ( $\text{CaWO}_4$ ), avec des réserves prouvées mondiales d'environ 3,3 millions de tonnes (en termes de tungstène métallique). La répartition spécifique est la suivante :

**Chine : réserves** d'environ 1,9 million de tonnes, représentant 57 % du total mondial, principalement réparties dans le Hunan (Chaling, Zixing), le Jiangxi (Dayu, Ganzhou) et le Henan (Luanchuan). La teneur en minerai de tungstène de la Chine est élevée, avec une teneur moyenne en  $\text{WO}_3$  de 0,3 à 0,5 %.

**Russie : réserves** d'environ 250 000 tonnes, principalement en Extrême-Orient et en Sibérie, la plupart des mines sont de petite et moyenne taille.

**Vietnam : Avec** des réserves d'environ 100 000 tonnes, la mine de Nui Phao est la plus grande mine de tungstène au monde, avec une production annuelle d'environ 6 000 tonnes.

**Canada : Réserves** d'environ 80 000 tonnes, concentrées en Colombie-Britannique, la mine de Cantung étant la principale zone de production.

**Autres régions : L'**exploitation minière du tungstène en Australie (mine de King Island), en Bolivie (mine de Llallagua) et en Afrique (par exemple au Rwanda, au Congo) augmente progressivement, mais les réserves et la production sont limitées.

#### Statut minier

En 2023, la production mondiale de concentré de tungstène ( $\text{WO}_3$ ) sera d'environ 85 000 tonnes, soit une baisse de 2 % par rapport à l'année précédente, principalement en raison de réglementations environnementales plus strictes et de mines vieillissantes. La production chinoise est d'environ 68 000 tonnes, soit 80 % du total mondial ; Le Vietnam est d'environ 6 000 tonnes et la Russie d'environ 4 000 tonnes. L'exploitation minière du tungstène est confrontée aux défis suivants :

#### Stress environnemental

L'exploitation minière traditionnelle à ciel ouvert et souterraine est très dommageable pour les ressources en terre et en eau, et les coûts de traitement des résidus sont élevés. Depuis 2015, la Chine a mis en place des politiques environnementales strictes et fermé certaines mines très polluantes, ce qui a entraîné une baisse de la production.

[Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale](#)

### Baisse des notes

La teneur moyenne du principal minerai de tungstène du monde est passée de 1 % au XXe siècle à 0,3-0,5 %, ce qui a augmenté le coût de l'enrichissement et de l'affinage.

### Risques géopolitiques

Les ressources en tungstène sont concentrées dans un petit nombre de pays, et la chaîne d'approvisionnement est sensible aux frictions politiques et commerciales.

### Réponse

Afin de pallier la pénurie de ressources, le recyclage des déchets de tungstène est devenu un complément important. Environ 20 % de l'approvisionnement mondial en tungstène provient du recyclage, principalement par dissolution chimique ou broyage mécanique pour extraire le tungstate des déchets de creusets, de couteaux et d'alliages de tungstène. De plus, les technologies d'exploration et de biolixiviation du tungstène en eaux profondes, telles que l'utilisation de micro-organismes pour décomposer le minerai de tungstène, sont à l'étude et pourraient fournir de nouvelles sources pour l'avenir.

### 1.5 Vue d'ensemble de la chaîne industrielle des creusets en tungstène

La chaîne industrielle des creusets en tungstène couvre de multiples maillons, de l'extraction des matières premières à l'application terminale, en passant par l'exploitation minière, la fusion, la fabrication, l'application et le recyclage, formant un système économique en boucle fermée :

En amont : extraction et raffinage du tungstène

Exploitation minière : Le minerai de tungstène est obtenu par le biais d'une exploitation à ciel ouvert ou souterraine, et le processus d'enrichissement comprend la séparation par gravité, la flottation et la séparation magnétique pour produire du concentré de tungstène (teneur en  $WO_3$  65-70 %).

Raffinage : Le concentré de tungstène est converti en tungstate d'ammonium (APT) par lixiviation alcaline ou par lixiviation acide, puis calciné et réduit à l'hydrogène pour produire une poudre de tungstène de haute pureté (pureté  $\geq 99,95$  %).

Midstream : fabrication de creusets en tungstène

Processus : y compris le pressage de poudre de tungstène, le frittage, l'usinage et le traitement de surface, la technologie de base est le formage par pressage isostatique et le frittage sous vide.

Produits : Creusets en tungstène standard et personnalisés pour les semi-conducteurs, la métallurgie et l'aérospatiale.

En aval : applications et distribution

Applications : Semi-conducteurs (croissance cristalline), métallurgie (fusion de terres rares et de métaux précieux), aérospatiale (superalliages), nouvelles énergies (photovoltaïque et énergie nucléaire).

Distribution : Par le biais de la vente directe ou de la distribution par agent, certaines entreprises offrent des services personnalisés.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

## Recyclage et recyclage

Processus de recyclage : Les creusets de tungstène usagés sont recyclés par dissolution chimique (pour générer du tungstate de sodium) ou par broyage mécanique pour fabriquer de la poudre de tungstène ou des creusets.

Importance : Réduire la dépendance aux ressources, réduire la pollution de l'environnement, et le tungstène recyclé représente 20 à 25 % de l'approvisionnement mondial.

## Taille et tendances du marché

Selon Chinatungsten Online, la taille du marché mondial des creusets en tungstène sera d'environ 1,35 milliard de dollars américains en 2024 et devrait atteindre 2 milliards de dollars américains d'ici 2030, avec un taux de croissance annuel moyen d'environ 6,5 %. Les moteurs de croissance sont les suivants :

Demande de semi-conducteurs : la 5G, l'IA et les véhicules électriques stimulent la demande de puces, et le marché des creusets en silicium monocristallin et en tungstène pour les semi-conducteurs composés connaît une croissance rapide.

Investissement aérospatial : Le budget spatial mondial a augmenté et la demande de creusets en tungstène pour les superalliages a augmenté.

Développement de nouvelles énergies : la production de plaquettes de silicium photovoltaïque et la recherche sur la fusion nucléaire augmentent les applications des creusets de tungstène.

Avancées technologiques : La fabrication additive et la production intelligente réduisent les coûts et améliorent les capacités de personnalisation.

## Défi

La chaîne industrielle est exposée aux fluctuations des prix des matières premières, aux pressions environnementales et aux risques géopolitiques. Par exemple, le prix du concentré de tungstène augmentera de 15 % en 2023, ce qui entraînera une augmentation du coût de production des creusets. Les entreprises répondent à ces défis en optimisant les processus et en augmentant la part de recyclage.



CTIA GROUP Ltd Creuset en tungstène

## Chapitre 2 Caractéristiques du creuset en tungstène

En tant que composant central de l'industrie à haute température et de la recherche scientifique, les caractéristiques du creuset en tungstène déterminent directement ses performances et son effet d'application dans des environnements extrêmes. Ce chapitre analysera de manière exhaustive les caractéristiques techniques et les avantages de performance des creusets en tungstène sous divers aspects tels que la géométrie et les spécifications dimensionnelles, la qualité de surface, la pureté des matériaux, les propriétés thermiques, la stabilité chimique, les propriétés mécaniques, d'autres propriétés et la fiche de données de sécurité (FDS) des creusets en tungstène.

### 2.1 Spécifications de géométrie et de taille du creuset en tungstène

La géométrie et la taille des creusets en tungstène sont à la base de leur conception et de leur application, ce qui affecte directement leur volume, leur efficacité de conduction thermique et leur stabilité structurelle. Différents scénarios d'application, tels que la croissance de cristaux de semi-conducteurs, la fusion métallurgique ou les essais de matériaux aérospatiaux, ont des exigences spécifiques en matière de géométrie et de dimensions du creuset. Ce qui suit est une description détaillée de quatre aspects : taille standard, conception personnalisée, volume et capacité de charge, et conception de forme.

#### 2.1.1 Dimensions standard (diamètre, épaisseur de paroi, hauteur)

La taille standard des creusets en tungstène est généralement conçue selon les spécifications de l'industrie et les besoins de l'application pour répondre à l'utilisation industrielle et scientifique générale. La norme nationale chinoise GB/T 3459-2022 Exigences techniques pour les creusets en tungstène stipule clairement la plage de taille standard. Les paramètres de taille spécifiques sont les

[Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale](#)

suivants :

**Diamètre :** Les creusets en tungstène ont généralement un diamètre compris entre 10 mm et 500 mm, les spécifications courantes se concentrant entre 50 mm et 200 mm. Les creusets de petit diamètre (par exemple, 10-50 mm) sont principalement utilisés pour de petites expériences de laboratoire ou la croissance de cristaux de haute précision, comme la production de silicium monocristallin ou de cristal de saphir ; Les creusets de grand diamètre (par exemple 200-500 mm) conviennent à la fusion métallurgique à l'échelle industrielle ou à l'affinage des métaux des terres rares.

**Épaisseur de paroi :** L'épaisseur de paroi varie de 2 mm à 10 mm, en fonction de l'utilisation et des exigences de charge du creuset. Les creusets à paroi mince (2-4 mm) conviennent aux charges légères et aux scénarios de transfert de chaleur rapide, tels que la croissance des cristaux de Czochralski dans l'industrie des semi-conducteurs ; Les creusets à paroi épaisse (6-10 mm) sont utilisés pour un fonctionnement à long terme intensif et à haute température, par exemple pour la fusion des superalliages. La conception de l'épaisseur de la paroi doit équilibrer l'efficacité de la conduction thermique et la résistance mécanique pour éviter la déformation due à une épaisseur trop fine ou augmenter les coûts des matériaux en raison d'une épaisseur trop élevée.

**Hauteur :** La plage de hauteur est de 20 mm à 600 mm, ce qui est étroitement lié au volume et à l'application du creuset. Les creusets de faible hauteur (20-100 mm) conviennent à la fusion peu profonde ou au dépôt de films minces ; Les creusets de grande hauteur (300-600 mm) sont utilisés pour la fusion de grands volumes ou les réactions profondes, telles que l'affinage de métaux précieux ou les expériences à haute température dans l'industrie nucléaire.

### **2.1.2 Conception personnalisée et taille non standard**

Avec la diversification des besoins de recherche industrielle et scientifique, la demande de conception personnalisée de creusets en tungstène de taille non standard augmente. Les creusets non standard font généralement référence à des creusets aux spécifications spéciales d'un diamètre supérieur à 500 mm, d'une épaisseur de paroi inférieure à 2 mm ou d'une hauteur supérieure à 600 mm, qui conviennent à des domaines haut de gamme tels que l'aérospatiale, l'industrie nucléaire ou la recherche sur les matériaux de pointe. Par exemple, les essais de matériaux plasma dans les réacteurs à fusion nucléaire peuvent nécessiter des creusets en tungstène de très grand diamètre (>600 mm) pour s'adapter à des configurations expérimentales complexes ; L'industrie des semi-conducteurs peut avoir besoin de creusets à paroi ultra-mince (<1,5 mm) pour optimiser le transfert de chaleur et réduire l'utilisation de matériaux.

Le défi de la conception personnalisée réside dans la difficulté du développement et du traitement des moules. Les creusets surdimensionnés nécessitent des équipements de pressage isostatique à grande échelle et des fours de frittage, ce qui augmente les coûts de production ; Les creusets à paroi ultra-mince nécessitent un haut degré de précision dans le processus de formage et de frittage, et un léger écart peut entraîner une fissuration ou une détérioration des performances du creuset. De plus,

[Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale](#)

les tolérances dimensionnelles des creusets non standard doivent être contrôlées à  $\pm 0,1$  mm près pour répondre aux besoins des applications de haute précision.

Selon le rapport sur l'industrie de Chinatungsten Online, la demande du marché pour les creusets en tungstène personnalisés a augmenté d'environ 20 % au cours de la dernière décennie, principalement sous l'impulsion des industries de l'aérospatiale et des semi-conducteurs. Les conceptions personnalisées exigent souvent que les clients travaillent en étroite collaboration avec le fabricant pour définir les paramètres géométriques, les propriétés thermiques et les exigences de résistance mécanique du creuset, et pour simuler la distribution des contraintes et le comportement de dilatation thermique du creuset à haute température grâce à l'analyse par éléments finis (FEA) pour garantir la faisabilité de la conception.

### 2.1.3 Volume et capacité de charge

Le volume et la capacité de charge du creuset en tungstène sont les indicateurs clés de sa fonctionnalité, qui déterminent directement son applicabilité dans des applications spécifiques. Les volumes varient de quelques millilitres à plusieurs litres, en fonction du diamètre intérieur, de la hauteur et de l'épaisseur de la paroi du creuset. Par exemple, un creuset cylindrique d'un diamètre de 50 mm et d'une hauteur de 50 mm a un volume d'environ 98 ml, ce qui le rend adapté aux expériences de laboratoire à petite échelle ; Avec un diamètre de 300 mm et une hauteur de 400 mm, le creuset a un volume allant jusqu'à 28 litres et convient à la fusion des métaux à l'échelle industrielle.

La capacité de charge fait référence au poids du matériau fondu qu'un creuset peut transporter en toute sécurité à des températures élevées, et est généralement déterminée par la densité du matériau, l'épaisseur de la paroi et la géométrie. Le tungstène a une densité de  $19,25 \text{ g/cm}^3$ , ce qui confère au creuset sa résistance structurelle extrêmement élevée. Les creusets en tungstène avec des épaisseurs de paroi standard (4-6 mm) peuvent transporter des milliers de grammes de métaux en fusion tels que l'aluminium, le cuivre ou les métaux des terres rares ; Les creusets à paroi épaisse (8-10 mm) peuvent transporter même des tonnes d'or fondu et conviennent à la production de superalliages.

La conception du volume et de la capacité portante doit tenir compte des facteurs suivants :

Efficacité de la conduction thermique : Un volume excessif peut entraîner une distribution inégale de la chaleur, affectant l'uniformité de la masse fondue.

Stabilité structurelle : Des exigences excessives en matière de capacité de charge peuvent entraîner une augmentation de l'épaisseur de la paroi, ce qui augmente l'inertie thermique et les coûts des matériaux.

Adaptation de la dilatation thermique : Le coefficient de dilatation thermique du creuset et de la masse fondue doit être adapté pour éviter la fissuration due à la contrainte thermique.

### 2.1.4 Conception de la forme (cylindrique, conique, de forme spéciale)

La conception de la forme du creuset en tungstène a un impact important sur sa fonctionnalité et ses scénarios d'application. Les formes courantes comprennent des creusets cylindriques, coniques et

profilés, chacun optimisé pour des besoins d'utilisation spécifiques.

**Creuset cylindrique :** Il s'agit de la forme la plus courante avec une épaisseur de paroi et un diamètre intérieur uniformes, ce qui la rend adaptée aux scénarios qui nécessitent un champ thermique stable et un chauffage uniforme, tels que la croissance du silicium monocristallin (méthode Czochralski) ou la fusion de métaux précieux. Les avantages des creusets cylindriques sont que le processus de fabrication est relativement simple, que la répartition des contraintes thermiques est uniforme et qu'il convient à une production standardisée. L'inconvénient est qu'il peut ne pas être pratique de verser la masse fondue et qu'elle est moins adaptable à des configurations expérimentales complexes.

**Creuset conique :** Le diamètre inférieur du creuset conique est plus petit que celui du haut, ce qui facilite le coulage et la collecte de matériaux fondus, et est couramment utilisé dans l'affinage des métaux des terres rares ou des métaux précieux dans l'industrie métallurgique. La conception conique réduit les résidus de matière fondue sur la paroi du creuset et améliore l'utilisation du matériau. Cependant, la distribution du champ thermique d'un creuset conique n'est pas aussi uniforme que celle d'un creuset cylindrique et peut nécessiter un système de chauffage supplémentaire pour compenser.

**Creusets conformes :** Les creusets conformes comprennent des formes ovales, polygonales ou autres formes non standard et sont souvent personnalisés pour des expériences spécifiques ou des applications industrielles. Par exemple, les essais de tuyères de moteurs de fusée dans le secteur aérospatial peuvent nécessiter un creuset elliptique pour accueillir une éprouvette aux géométries complexes ; Les expériences sur le plasma dans l'industrie nucléaire peuvent nécessiter des creusets polygonaux pour s'adapter à la forme du dispositif de réaction. Les creusets de forme spéciale sont difficiles à fabriquer et nécessitent des techniques de moulage avancées (telles que le filage ou l'impression 3D) et une conception de moule de précision.

La conception de la forme prend en compte la dilatation thermique, la répartition des contraintes et les coûts de fabrication. Par exemple, la dilatation thermique des creusets cylindriques est relativement uniforme, ce qui convient au cyclage à haute température ; Le creuset conique peut produire des concentrations de contraintes locales pendant le processus de coulée, et la stabilité structurelle doit être améliorée par l'optimisation de l'épaisseur de la paroi. La distribution des contraintes des creusets de forme spéciale est complexe et la vérification de la conception est généralement effectuée par analyse par éléments finis.

## 2.2 Qualité de surface du creuset en tungstène

La qualité de surface est un indicateur important des performances du creuset en tungstène, ce qui affecte directement sa résistance à la corrosion, son adhérence à l'état fondu et sa durée de vie. La surface des creusets en tungstène doit généralement être polie, meulée ou revêtue pour répondre aux exigences strictes des différents scénarios d'application. Ce qui suit est discuté en détail sous quatre aspects : le polissage et l'usinage, les normes de rugosité de surface, la détection et le contrôle des défauts, ainsi que le revêtement et la modification de surface.

### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### 2.2.1 Polissage, meulage et usinage des surfaces

Le processus de traitement de surface du creuset en tungstène comprend le tournage, le fraisage, le meulage et le polissage, chacun d'entre eux ciblant différentes exigences de qualité de surface. Le tournage et le fraisage sont utilisés pour le formage préliminaire, en enlevant la couche rugueuse à la surface du corps vert ; Le meulage améliore encore la planéité de la surface et réduit les défauts microscopiques ; Le polissage est utilisé pour obtenir un effet miroir, ce qui réduit considérablement la rugosité de surface.

Tournage et fraisage : Une précision d'usinage jusqu'à  $\pm 0,05$  mm est assurée par un centre d'usinage à commande numérique (CNC). Le tournage convient à l'usinage de la paroi extérieure des creusets cylindriques, tandis que le fraisage est utilisé pour former la paroi intérieure ou le fond de formes complexes. Les outils en carbure de tungstène sont utilisés dans le processus d'usinage pour faire face à la dureté élevée du tungstène (8-9 sur l'échelle de Mohs).

Meulage : Le meulage utilise des meules diamantées ou des meules en céramique, qui peuvent réduire la rugosité de surface à Ra 0,8-1,6  $\mu\text{m}$ . Le processus de meulage nécessite un contrôle strict de l'utilisation du liquide de refroidissement afin d'éviter les microfissures causées par les contraintes thermiques.

Polissage : Le polissage est divisé en polissage mécanique et polissage chimique. Le polissage mécanique utilise des agents de polissage de niveau nanométrique, qui peuvent obtenir un effet miroir de Ra  $< 0,4$   $\mu\text{m}$  ; Le polissage chimique améliore encore la douceur en gravant la surface avec une solution acide, telle qu'un mélange d'acide nitrique et d'acide fluorhydrique. La surface polie réduit considérablement l'adhérence des matières fondues telles que le silicium ou l'aluminium, prolongeant ainsi la durée de vie du creuset.

Le choix du procédé de polissage et de meulage dépend de l'application. L'industrie des semi-conducteurs nécessite un polissage miroir pour garantir la pureté de la croissance des cristaux ; Dans l'industrie métallurgique, il peut être nécessaire de meuler uniquement des surfaces pour contrôler les coûts. Selon le manuel technique de Chinatungsten Online, la durée de vie des creusets en tungstène poli est en moyenne de 15 à 20 % plus longue que celle des creusets non polis.

### 2.2.2 Normes de rugosité de surface (Ra, Rz)

La rugosité de surface est la mesure de base de la qualité de surface des creusets en tungstène, qui est généralement exprimée en Ra (rugosité moyenne arithmétique) et Rz (hauteur maximale). Ra reflète la moyenne des fluctuations microscopiques de la surface, et Rz représente la distance entre les points les plus élevés et les plus bas de la surface. La norme industrielle impose les exigences suivantes en matière de rugosité de surface pour différents scénarios d'application :

Industrie des semi-conducteurs : Ra  $< 0,4$   $\mu\text{m}$ , Rz  $< 2,0$   $\mu\text{m}$ , pour garantir qu'aucune impureté n'est introduite lors de la croissance cristalline. Le polissage miroir est un processus nécessaire, qui doit

être utilisé avec un interféromètre laser pour l'inspection de surface.

Industrie métallurgique : Ra 0,8-1,6  $\mu\text{m}$ , Rz 4,0-8,0  $\mu\text{m}$ , le meulage ou le polissage moyen peuvent répondre à la demande, le coût est relativement faible.

Aérospatiale et industrie nucléaire : Ra 0,4-0,8  $\mu\text{m}$ , Rz 2,0-4,0  $\mu\text{m}$ , équilibrant la qualité de surface et les propriétés mécaniques à haute température.

La rugosité de surface est généralement mesurée à l'aide d'un profileur de contact ou d'un microscope laser sans contact pour garantir une précision de mesure de  $\pm 0,01 \mu\text{m}$ . Une rugosité de surface excessive peut entraîner une adhérence à la fusion ou des concentrations de contraintes locales, réduisant ainsi la durée de vie du creuset ; Une rugosité trop faible peut augmenter les coûts de traitement et doit être optimisée en fonction du scénario d'application.

### 2.2.3 Détection et contrôle des défauts de surface

Les défauts de surface (par exemple, fissures, porosité, inclusions) ont un impact significatif sur les performances à haute température et la durée de vie des creusets en tungstène. Les méthodes courantes de détection des défauts comprennent :

Contrôle par ultrasons : Détection des défauts internes et de surface par réflexion ultrasonore pour les creusets à paroi épaisse. La sensibilité de détection peut atteindre 0,1 mm.

Inspection par rayons X : utilisée pour détecter la porosité et les inclusions à l'intérieur des creusets, en particulier pour les grands creusets. La tomographie (TDM) à rayons X fournit une carte tridimensionnelle de la distribution des défauts.

Inspection visuelle de surface : Combinée à la microscopie optique ou à la microscopie électronique à balayage (MEB), elle détecte les microfissures de surface et les anomalies de rugosité.

La clé du contrôle des défauts est d'optimiser le processus de préparation. Par exemple, le contrôle de l'atmosphère pendant le processus de frittage réduit la porosité ; La gestion du liquide de refroidissement et la sélection des outils lors de l'usinage évitent les fissures de surface. Selon le rapport d'essai de CTIA GROUP LTD, le taux de réussite du creuset en tungstène peut être augmenté à plus de 98 % grâce à un contrôle strict des défauts.

### 2.2.4 Revêtement et modification du revêtement

Afin d'améliorer encore la résistance à l'oxydation et à l'abrasion des creusets en tungstène, un revêtement peut être appliqué sur la surface ou modifié. Les techniques courantes de traitement de surface comprennent :

Revêtements anti-oxydation : tels que les revêtements d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), de siliciure (SiC) ou de zircone ( $\text{ZrO}_2$ ), appliqués par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ou par pulvérisation plasma. Ces revêtements forment une couche protectrice à haute température qui empêche le tungstène de

réagir avec l'oxygène, prolongeant ainsi la durée de vie du creuset dans une atmosphère oxydante.

Les revêtements résistants à l'abrasion, tels que les revêtements en carbure de tungstène ([www.tungsten-carbide-powder.com](http://www.tungsten-carbide-powder.com)) ou en nitrure de titane (TiN), sont appliqués par dépôt physique en phase vapeur (PVD) pour améliorer la dureté de surface et la résistance à l'usure, ce qui les rend adaptés au fonctionnement à long terme à haute température [27].

Modification de surface : L'implantation ionique (par exemple, l'implantation d'azote ou de carbone) peut modifier la structure cristalline de surface, améliorer la dureté et la résistance à la corrosion ; Les traitements de nitruration ou de cémentation peuvent améliorer la résistance aux chocs thermiques de la surface.

Le processus de revêtement et de modification doit être sélectionné en fonction de l'environnement réel dans lequel le creuset sera utilisé. Par exemple, l'industrie des semi-conducteurs évite généralement l'utilisation de revêtements pour éviter la contamination ; L'industrie aérospatiale a tendance à utiliser des revêtements anti-oxydation pour faire face à des atmosphères complexes.

### 2.3 Pureté du matériau du creuset en tungstène

La pureté des matériaux est au cœur de la performance du creuset en tungstène, ce qui affecte directement sa stabilité à haute température, sa capacité antisalissure et sa résistance mécanique. Les creusets en tungstène sont généralement préparés avec du tungstène de haute pureté ([www.tungsten.com.cn](http://www.tungsten.com.cn)), et les exigences de pureté sont  $\geq 99,95\%$ . Voici une analyse détaillée sous trois aspects : les caractéristiques du tungstène de haute pureté, l'analyse des éléments impurifiés et l'influence de la pureté sur les performances à haute température.

#### 2.3.1 Tungstène de haute pureté

Le tungstène de haute pureté fait référence à des matériaux métalliques ayant une teneur en tungstène de  $\geq 99,95\%$ , qui sont préparés par des procédés de purification en plusieurs étapes tels que la calcination au paratungstate d'ammonium ([www.ammonium-paratungstate.com](http://www.ammonium-paratungstate.com)) et la réduction de l'hydrogène). Le tungstène de haute pureté possède les propriétés clés suivantes :

Point de fusion ultra-élevé :  $3410^{\circ}\text{C}$ , le plus élevé de tous les métaux, adapté aux environnements à très haute température.

Haute densité :  $19,25\text{ g/cm}^3$ , ce qui confère au creuset une excellente résistance mécanique et une résistance à la déformation.

Faible pression de vapeur : presque non volatile en dessous de  $3000^{\circ}\text{C}$ , réduisant les pertes de matériau à haute température.

Excellente stabilité chimique : inerte à la plupart des produits chimiques dans une atmosphère inerte, adapté à la préparation de matériaux de haute pureté.

La préparation du tungstène de haute pureté nécessite un contrôle strict de la qualité des matières premières et de l'environnement de production. Selon le rapport technique de Chinatungsten Online,

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

le coût de production de la poudre de tungstène de haute pureté représente environ 30 % à 40 % du coût total du creuset en tungstène, qui est le facteur clé affectant le prix du creuset en tungstène.

### 2.3.2 Analyse des éléments d'impuretés

Les éléments impuretés dans les creusets en tungstène comprennent le carbone, l'oxygène, le fer, le molybdène, l'azote, etc., et sont généralement mesurés en parties par million (ppm). Les méthodes suivantes sont principalement utilisées pour la détection de la teneur en impuretés :

Spectromètre à fluorescence X (XRF) : utilisé pour la détection rapide des principaux éléments d'impuretés avec une précision de  $\pm 1$  ppm.

Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) : pour l'analyse des éléments traces avec des limites de détection aussi basses que 0,01 ppm.

Microscopie électronique à balayage (MEB) combinée à la spectroscopie d'énergie (EDS) : utilisée pour localiser les distributions d'impuretés et analyser l'enrichissement élémentaire aux joints de grains.

Selon la norme ASTM E1447-09, les creusets en tungstène doivent contenir des impuretés dans les plages suivantes :

carbone	<50 ppm
oxygène	<100 ppm
fer	<20 ppm
molybdène	<50 ppm
azote	<10 minutes par minute

Des niveaux d'impuretés trop élevés peuvent entraîner l'affaiblissement des joints de grains, la dégradation des performances de choc thermique ou une contamination volatile à des températures élevées.

### 2.3.3 Effet de la pureté sur la performance à haute température

La pureté du matériau a les effets spécifiques suivants sur les performances à haute température du creuset en tungstène :

Stabilité à haute température : Les joints de grains de tungstène de haute pureté sont plus propres, ce qui réduit la possibilité de glissement et de fluage des joints de grains à des températures élevées. Les creusets en tungstène d'une pureté de  $\geq 99,99$  % peuvent fonctionner de manière stable au-dessus de 3000 °C, tandis que les creusets d'une pureté de 99,9 % peuvent être déformés microscopiquement à 2800 °C.

Résistance aux chocs thermiques : Les impuretés, telles que l'oxygène ou le carbone, peuvent former des phases de fragilité au niveau des joints de grains, entraînant des fissures dues aux chocs thermiques. Plus la pureté est élevée, plus la résistance aux chocs thermiques est forte, ce qui convient aux scénarios d'élévation et de descente rapides de la température.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Résistance à la contamination : Les impuretés contenues dans le tungstène de faible pureté (comme le fer ou le molybdène) peuvent se volatiliser à des températures élevées, contaminant la masse fondue et affectant la croissance des cristaux ou la pureté de l'alliage. Les creusets en tungstène de haute pureté minimisent le risque de contamination.

## 2.4 Propriétés thermiques du creuset en tungstène

Les propriétés thermiques du creuset en tungstène sont ses principaux avantages dans les environnements à haute température, qui déterminent ses performances en termes de conduction thermique, de stabilité thermique et d'adaptation de la dilatation thermique. Ce qui suit est une analyse détaillée de quatre aspects : stabilité à haute température, résistance aux chocs thermiques, caractéristiques de conduction thermique et de rayonnement thermique, et adaptation de la dilatation thermique.

### 2.4.1 Stabilité à haute température du creuset en tungstène

La stabilité à haute température des creusets en tungstène est due au point de fusion ultra-élevé (3410°C) et à la faible pression de vapeur du tungstène. En dessous de 3000°C, les creusets en tungstène ont peu ou pas de volatilisation ou de déformation, ce qui les rend adaptés aux environnements à très haute température, tels que les essais de matériaux plasma dans les réacteurs à fusion nucléaire ou la fusion des superalliages.

La clé de la stabilité à haute température réside dans l'optimisation de la microstructure du matériau. Le creuset en tungstène à grain fin (taille de grain < 10 µm) peut réduire le glissement des limites de grain et améliorer la résistance au fluage. La densité élevée (>98 % de densité théorique) peut réduire la concentration de stress local causée par les stomates.

### 2.4.2 Résistance aux chocs thermiques et durée de vie à la fatigue thermique du creuset en tungstène

La résistance aux chocs thermiques fait référence à la capacité d'un creuset en tungstène à résister à la fissuration sous des changements rapides de température. Le faible coefficient de dilatation thermique ( $4,5 \times 10^{-6}/K$ ) et la conductivité thermique élevée (174 W/(m·K)) du tungstène lui confèrent une excellente résistance aux chocs thermiques, mais sa fragilité à température ambiante peut entraîner la propagation des fissures.

La résistance aux chocs thermiques est généralement testée à l'aide d'une trempe à l'eau ou d'un chauffage par impulsion laser. Par exemple, un creuset en tungstène est rapidement refroidi de 2000°C à température ambiante pour observer la formation de fissures. Les creusets en tungstène à grain fin et de haute pureté peuvent résister à des différences de température de >1000°C/s sans se fissurer, tandis que la limite des creusets ordinaires est d'environ 500°C/s.

La durée de vie en fatigue thermique fait référence à la stabilité structurelle d'un creuset après plusieurs cycles thermiques. Les fissures de fatigue thermique proviennent généralement de défauts

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

de surface ou d'un affaiblissement des joints de grains. Grâce au polissage de surface et à l'affinement du grain, la durée de vie en fatigue thermique peut être prolongée de plus de 50 %.

### 2.4.3 Conductivité thermique et caractéristiques du rayonnement thermique du creuset en tungstène

Le tungstène a une conductivité thermique de 174 W/(m·K) et maintient une conductivité thermique élevée à des températures élevées, ce qui le rend adapté aux scénarios qui nécessitent une réponse thermique rapide, tels que la croissance de silicium monocristallin ou le dépôt de couches minces. La conductivité thermique diminue légèrement avec l'augmentation de la température et est d'environ 120 W/(m·K) à 2000°C.

Les propriétés du rayonnement thermique sont déterminées par l'émissivité de surface. L'émissivité de surface du creuset en tungstène non poli est de 0,3-0,4, qui peut être réduite à 0,1-0,2 après polissage, réduisant ainsi la perte de rayonnement thermique. À des températures élevées (> 2000°C), le rayonnement thermique devient la principale voie de perte de chaleur, et l'efficacité thermique doit être optimisée grâce à la conception de creusets, comme l'ajout de revêtements réfléchissants.

### 2.4.4 Adaptation de la dilatation thermique du creuset en tungstène

Le coefficient de dilatation thermique du tungstène est de  $4,5 \times 10^{-6}/K$ , ce qui est beaucoup plus bas que celui de la plupart des matières fondues (par exemple, silicium :  $2,6 \times 10^{-5}/K$  ; Aluminium :  $2,3 \times 10^{-5}/K$ ). Un décalage dans la dilatation thermique peut entraîner une contrainte thermique à l'interface creuset-fusion, provoquant des fissures ou un écaillage.

Pour améliorer l'adaptation de la dilatation thermique, les mesures suivantes peuvent être prises :  
Optimisation géométrique : L'analyse par éléments finis est utilisée pour concevoir l'épaisseur de la paroi du creuset et la courbure du fond afin de disperser les contraintes thermiques.

Couche tampon : Une couche tampon de graphite ou de zirconium est appliquée sur la paroi interne du creuset pour atténuer la différence de dilatation thermique.

Processus de préchauffage : Préchauffage lent du creuset et fusion avant de chauffer pour réduire le stress causé par les différences de température.

## 2.5 Stabilité chimique du creuset en tungstène

La stabilité chimique des creusets en tungstène est un avantage important dans les environnements corrosifs et les réactions à haute température, déterminant sa compatibilité avec les matières fondues, les produits chimiques et les atmosphères. Ce qui suit est discuté en détail sous trois aspects : la résistance à la corrosion acide et alcaline, l'inertie à haute température et la capacité anti-pollution, et la compatibilité avec les métaux et alliages en fusion.

### 2.5.1 Résistance à la corrosion acide et alcaline du creuset en tungstène

Le tungstène a une excellente résistance à la corrosion à la plupart des acides et des bases, en particulier dans des environnements normaux et neutres ou faiblement acides. La résistance

spécifique à la corrosion est la suivante :

Environnement acide : Les creusets en tungstène résistent à l'acide chlorhydrique, à l'acide sulfurique et à l'acide phosphorique, mais se dissolvent lentement dans les acides oxydants forts tels que l'acide nitrique concentré ou l'eau régale. Les expériences montrent que le taux de corrosion du creuset en tungstène d'une pureté de 99,95 % dans une solution d'acide sulfurique à 10 % (25 °C) < de 0,01 mm/an.

Environnement alcalin : Le tungstène est relativement stable dans les solutions alcalines fortes (comme l'hydroxyde de sodium), mais une réaction d'oxydation peut se produire dans les masses fondues alcalines à des températures élevées (>500 °C), et le contact direct doit être évité.

Environnement neutre : Le creuset en tungstène n'a presque pas de corrosion dans les solutions neutres (telles que l'eau ou la solution saline), ce qui convient au raffinage chimique de haute pureté dans l'industrie chimique.

La résistance à la corrosion acide et alcaline est généralement testée par immersion ou par corrosion électrochimique pour s'assurer qu'il n'y a pas de perte de masse significative ou de changement morphologique à la surface du creuset.

### 2.5.2 Creuset en tungstène, inertie à haute température et capacité anti-pollution

Les creusets en tungstène sont extrêmement inertes chimiquement dans des atmosphères inertes (par exemple l'argon, l'hélium) ou le vide, ce qui peut empêcher efficacement la contamination et convient à la préparation de matériaux de haute pureté tels que le silicium monocristallin, le saphir ou les semi-conducteurs composés (GaAs, GaN).

La clé de l'inertie à haute température réside dans la faible pression de vapeur du tungstène et sa structure cristalline stable. En dessous de 3000°C, le tungstène est presque non volatil, ce qui réduit la contamination de la masse fondue par le matériau du creuset. En revanche, les impuretés présentes dans les creusets de faible pureté, telles que le fer ou le carbone, peuvent se volatiliser à des températures élevées, entraînant des défauts cristallins ou des écarts dans la composition de l'alliage.

Le test de résistance à la contamination est généralement effectué en chauffant le creuset dans un environnement sous vide pour analyser la composition chimique des substances volatiles.

### 2.5.3 Compatibilité du creuset en tungstène avec le métal en fusion et l'alliage

Les creusets en tungstène ont une bonne compatibilité avec la plupart des métaux et alliages en fusion, mais peuvent réagir avec certains métaux réactifs. L'analyse de compatibilité spécifique est la suivante :

Métaux inertes : Les creusets en tungstène sont hautement compatibles avec l'aluminium fondu, le cuivre, l'or, l'argent et d'autres métaux inertes, sans réaction chimique évidente ni dissolution, et

conviennent au raffinage des métaux précieux.

**Métaux actifs :** Le tungstène peut réagir à l'interface avec le titane, le zirconium, le hafnium et d'autres métaux actifs fondus pour former des composés fragiles (tels que le titane-tungstène). Pour éviter les réactions, une couche protectrice de graphite ou de zircone peut être appliquée sur la paroi interne du creuset.

**Alliage :** Le creuset en tungstène peut être utilisé pour la fusion d'alliages à haute température (tels que les alliages à base de nickel et les alliages à base de cobalt), mais le temps de fusion et l'atmosphère doivent être contrôlés pour éviter la dissolution des traces causée par un contact à long terme.

Les tests de compatibilité utilisent généralement des expériences de fusion à haute température combinées à la microscopie électronique à balayage (MEB) et à la diffraction des rayons X (XRD) pour analyser les produits de réaction interfaciale.

## 2.6 Propriétés mécaniques du creuset en tungstène

Les propriétés mécaniques du creuset en tungstène déterminent son intégrité structurelle et sa durée de vie dans des environnements à haute température et à contraintes complexes. Voici une analyse détaillée sous quatre aspects : la résistance à la déformation à haute température, la résistance à la propagation des fissures, la stabilité structurelle sous circulation de chaleur et la résistance aux chocs et aux vibrations.

### 2.6.1 Résistance à la déformation à haute température du creuset en tungstène

Le tungstène conserve une résistance et une rigidité élevées à haute température, et sa résistance à la déformation est supérieure à celle d'autres réfractaires tels que le graphite ou l'alumine. À 2000°C, la limite d'élasticité du tungstène peut encore atteindre 100-150 MPa, ce qui est beaucoup plus élevé que celui du graphite (environ 20 MPa).

La clé de la résistance à la déformation à haute température réside dans la taille et la densité des grains. Les creusets en tungstène à grains fins (<10 µm) et à haute densité (>98 %) sont efficaces contre le fluage et la déformation plastique. Les données d'essai de Chinatungsten Online montrent que le taux de déformation du creuset en tungstène peut être contrôlé en dessous de 0,1 % à 2500°C en optimisant le processus de frittage.

### 2.6.2 Résistance à la propagation de la fissuration du creuset en tungstène

La fragilité du tungstène le rend sujet à la propagation des fissures à température ambiante, mais il présente une certaine ténacité à haute température (>1000°C). La résistance à la propagation des fissures peut être améliorée par :

**Raffinement du grain :** La structure à grain fin peut disperser l'énergie de la fissure et réduire le taux de croissance des fissures.

Renforcement de surface : par exemple, nitruration ou implantation ionique pour améliorer la dureté de surface et la résistance aux fissures.

Contrôle des défauts : Élimination de la porosité et des inclusions par des contrôles non destructifs (par exemple par ultrasons ou rayons X) pour réduire l'initiation des fissures.

Les essais de propagation des fissures utilisent généralement un essai de flexion ou de résistance à la rupture en trois points.

### 2.6.3 Stabilité structurelle du creuset en tungstène sous chauffage par circulation

Le chauffage par circulation peut entraîner des fissures de fatigue thermique et une dégradation microstructurale, affectant la stabilité structurelle du creuset. Les facteurs d'influence comprennent :

Stress thermique : Le stress thermique causé par une montée en puissance et une chute rapides de la température peut entraîner des fissures.

Affaiblissement des joints de grains : Un fonctionnement prolongé à des températures élevées peut entraîner un glissement des joints de grains ou un enrichissement des impuretés.

Domages de surface : L'oxydation de surface ou l'érosion à l'état fondu peuvent accélérer la dégradation structurelle.

La stabilité structurelle peut être considérablement améliorée en optimisant le processus de frittage (par exemple, le frittage en plusieurs étapes) et les traitements de surface (par exemple, les revêtements anti-oxydation).

### 2.6.4 Résistance aux chocs et aux vibrations du creuset en tungstène

Le creuset en tungstène a une faible résistance aux chocs et aux vibrations, en particulier à température ambiante, et est sujet aux fissures dues aux chocs mécaniques ou aux vibrations. À des températures élevées (>1000°C), la ténacité du tungstène est légèrement améliorée, mais les chocs violents doivent toujours être évités.

La résistance aux chocs est généralement testée à l'aide d'un test de chute de poids ou d'un test de secousseur. Dans la pratique, des supports absorbant les chocs et des emballages de protection sont nécessaires pour réduire le risque d'impact pendant le transport et le fonctionnement.

## 2.7 Autres caractéristiques du creuset en tungstène

En plus des propriétés thermiques, chimiques et mécaniques, les creusets en tungstène ont également des propriétés spéciales qui conviennent à des scénarios d'application spécifiques. Les éléments suivants sont analysés sous trois aspects : les propriétés électriques à haute température, la résistance à l'usure et à l'abrasion et les propriétés anti-radiations.

### 2.7.1 Propriétés électriques à haute température du creuset en tungstène

Le tungstène a une résistivité stable à haute température, ce qui le rend adapté comme élément chauffant électrique ou comme électrode à haute température (<http://tungsten.com.cn/chinese/tungsten-electrodes.html>). À 2000°C, la résistivité du tungstène est

de 50-60  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ , ce qui n'est que 5 fois celle de la température ambiante, et présente une excellente stabilité électrique.

Les applications des propriétés électriques à haute température comprennent :

Fusion à l'arc : Les creusets en tungstène peuvent être utilisés comme électrodes pour résister à des courants élevés et à des charges thermiques élevées.

Chauffage par résistance : Le creuset en tungstène peut être chauffé directement à l'électricité, ce qui simplifie la conception du système de chauffage.

### 2.7.2 Usure et résistance à l'usure du creuset en tungstène

Le tungstène a une dureté de 8-9 sur l'échelle de Mohs, une dureté de surface élevée, une excellente résistance à l'usure et convient à un fonctionnement à long terme à haute température. L'essai de résistance à l'abrasion utilise généralement un essai de frottement et d'usure, qui simule le contact d'un creuset avec une substance ou un outil en fusion. Une meilleure résistance à l'usure peut être obtenue par des revêtements de surface tels que le carbure de tungstène ou le nitrure de titane, ou par l'implantation d'ions. Ces traitements augmentent la dureté de surface à HV 2000 et prolongent encore la durée de vie du creuset.

### 2.7.3 Résistance aux radiations des creusets en tungstène (applications de l'industrie nucléaire)

Le tungstène a une capacité d'absorption élevée des neutrons et des rayons gamma, ce qui le rend adapté aux composants à haute température des réacteurs nucléaires et des dispositifs de fusion nucléaire. La résistance aux radiations du tungstène est due à sa haute densité et à son numéro atomique élevé, qui peuvent protéger efficacement contre l'énergie rayonnante.

Dans l'industrie nucléaire, les creusets en tungstène sont couramment utilisés pour les essais de matériaux plasma et la fabrication de composants à haute température. Les données d'essai ont montré que le creuset en tungstène est resté structurellement intact sous un rayonnement gamma de  $10^6$  Gy sans dommage évident au réseau.

## 2.8 Fiche signalétique du creuset en tungstène de CTIA GROUP LTD

La fiche de données de sécurité (FDS) des matériaux de creuset en tungstène fournie par CTIA GROUP LTD (<http://cn.ctia.group>) répertorie en détail la composition chimique, les propriétés physiques, les directives d'utilisation de sécurité et les mesures de traitement d'urgence des produits. Les principaux contenus des fiches signalétiques sont les suivants :

Partie I : Nom du produit

Nom : Creuset en tungstène

N° CAS : 7440-33-7

Partie II : Renseignements sur la composition

Contenu principal  $W \geq 99,95 \%$

Teneur totale en impuretés  $\leq 0,05 \%$

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés 电话/TEL :0086 592 512 9696  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版 CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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

### Partie III : Aperçu des dangers

Risques pour la santé : Ce produit n'est pas irritant pour les yeux et la peau.

Risque d'explosion : Ce produit est ininflammable et non irritant.

### Partie IV : Premiers soins

Contact peau à peau : Retirez les vêtements contaminés et rincez-les abondamment à l'eau courante.

Contact visuel : Soulevez la paupière et rincez à l'eau courante ou à l'aide d'une solution saline.

Traitement médical.

Inhalation : Retirer de la scène à l'air frais. Si vous avez des difficultés à respirer, donnez de l'oxygène. Traitement médical.

Apport : Buvez beaucoup d'eau tiède pour provoquer des vomissements. Traitement médical.

### Partie V : Mesures de protection contre l'incendie

Produits de combustion nocifs : Les produits de décomposition naturels sont inconnus.

Méthode d'extinction d'incendie : Les pompiers doivent porter des masques à gaz et des combinaisons intégrales de lutte contre les incendies pour éteindre le feu dans la direction du vent.

Agent extincteur : poudre de cuir sèche, sable.

### Partie 6 : Gestion d'urgence des déversements

Traitement d'urgence : Isolez la zone contaminée par la fuite et limitez l'accès. Coupez la source du feu. Il est conseillé aux intervenants d'urgence de porter des masques anti-poussière (masques faciaux) et des vêtements de protection. Évitez la poussière, balayez-le soigneusement, mettez-le dans un sac et transférez-le dans un endroit sûr. S'il y a une grande quantité de fuites, couvrez-la d'un chiffon en plastique ou d'une toile. Collecter et recycler ou transporter vers un site d'élimination des déchets pour l'élimination.

### Partie VII : Manutention, manutention et entreposage

Précautions d'utilisation : Les opérateurs doivent être spécialement formés et suivre strictement les procédures d'utilisation. Il est recommandé aux opérateurs de porter des masques anti-poussière filtrants auto-amorçants, des lunettes de sécurité chimique, une combinaison antipoison anti-pénétration et des gants en caoutchouc. Tenir à l'écart du feu et des sources de chaleur, et il est strictement interdit de fumer sur le lieu de travail. Utilisez des systèmes et des équipements de ventilation antidéflagrants. Évitez la génération de poussière. Évitez tout contact avec des oxydants et des halogènes. Lors de la manipulation, il est nécessaire de charger et de décharger légèrement pour éviter d'endommager l'emballage et les conteneurs. Équipé des variétés et des quantités correspondantes d'équipements de lutte contre l'incendie et d'équipements de traitement d'urgence en cas de fuite. Les récipients vides peuvent laisser des substances nocives derrière eux.

Précautions de stockage : Stocker dans un entrepôt frais et ventilé. Tenir à l'écart du feu et des sources de chaleur. Il doit être stocké séparément des oxydants et des halogènes, et ne doit pas être mélangé. Équipé de la variété et de la quantité correspondantes d'équipements de lutte contre l'incendie. La zone de stockage doit être équipée de matériaux appropriés pour contenir le

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

déversement.

Partie VIII : Contrôle de l'exposition/protection individuelle

CMA Chine (mg/m<sup>3</sup>) : 6

CMA de l'URSS (mg/m<sup>3</sup>) : 6

TLVTN : ACGIH 1 mg/m<sup>3</sup>

TLVWN : ACGIH 3mg/m<sup>3</sup>

Méthode de surveillance : méthode de spectroluminescence thiocyanure de potassium-chlorure de titane

Contrôle technique : le processus de production est exempt de poussière et entièrement ventilé.

Protection respiratoire : Lorsque la concentration de poussière dans l'air dépasse la norme, un masque anti-poussière filtrant auto-amorçant doit être porté. En cas d'évacuation d'urgence, un appareil respiratoire doit être porté.

Protection oculaire : Portez des lunettes de sécurité chimique.

Protection corporelle : Porter une combinaison anti-poison anti-pénétration.

Protection des mains : Portez des gants en caoutchouc.

Partie IX : Propriétés physicochimiques

Ingrédient principal : Pur

Aspect et propriétés : métal solide, blanc brillant

Point de fusion (°C) : N/A

Boiling point (°C): N/A

Densité relative (eau = 1) : 13 ~ 18,5 (20 °C)

Densité de vapeur (air = 1) : Aucune donnée

Pression de vapeur saturante (kPa) : pas de données disponibles

Chaleur de combustion (kJ/mol) : pas de données

Température critique (°C) : Aucune donnée disponible

Pression critique (MPa) : Aucune donnée disponible

Logarithme du coefficient de partage de l'eau : pas de données

Point d'éclair (°C) : Aucune donnée disponible

Température d'inflammation (°C) : Aucune donnée

Limite d'explosion % (V/V) : Aucune donnée

Limite inférieure d'explosion % (V/V) : Aucune donnée

Solubilité : soluble dans l'acide nitrique, l'acide fluorhydrique

Utilisations principales : utilisé pour fabriquer des pièces de blindage, des tiges de fléchettes en alliage de tungstène, des billes en alliage de tungstène, etc.

Partie X : Stabilité et réactivité

Substances interdites : acides et alcalis forts.

Partie 11 :

Toxicité aiguë : pas de données disponibles

Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

CL50 : Aucune donnée

Partie XII : Données écologiques

Il n'y a pas de données pour cette section

Partie XIII : Élimination

Méthode d'élimination des déchets : Reportez-vous aux lois et réglementations nationales et locales pertinentes avant l'élimination. Recyclez si possible.

Partie XIV : Renseignements sur l'expédition

Catégorie d'emballage : Z01

Précautions pour le transport : L'emballage doit être complet lors de l'expédition et le chargement doit être sécurisé. Pendant le transport, il est nécessaire de s'assurer que le conteneur ne fuit pas, ne s'effondre pas, ne tombe pas et ne s'endommage pas. Il est strictement interdit de mélanger avec des oxydants, des halogènes, des produits chimiques comestibles, etc. Pendant le transport, il doit être protégé de l'exposition au soleil, à la pluie et aux températures élevées. Les véhicules doivent être soigneusement nettoyés après le transport.

Partie 15 : Renseignements sur le fournisseur

Fournisseur : CTIA GROUP LTD

Tél. : +86 0592-5129696/5129595



CTIA GROUP Ltd Creusets en tungstène

Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés 电话/TEL :0086 592 512 9696  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版 CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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

CTIA GROUP LTD  
Tungsten Crucible Introduction

### 1. Overview of Tungsten Crucibles

Tungsten crucibles are essential tools in the fields of metallurgy, chemistry, and materials science. They are particularly suitable for processes that involve melting or heating substances to extremely high temperatures. Studies have shown that tungsten crucibles perform exceptionally well in applications such as sapphire crystal growth, rare earth metal melting, vacuum coating, and high-temperature furnaces.

### 2. Features of Tungsten Crucibles

Ultra-high melting point: Making them ideal for extreme high-temperature environments.

High purity: purity of  $\geq 99.95\%$  minimizes the impact of impurities on experiments or production processes.

Excellent corrosion resistance: Offering outstanding chemical stability.

High density and low vapor pressure: Ensuring material stability.

High strength and wear resistance: Ensuring long service life.

Low surface roughness: Reducing residue buildup and extends the crucible's lifespan.

### 3. Applications of Tungsten Crucibles

**Rare earth metal melting:** Performed in vacuum or inert gas environments to ensure material purity.

**Vacuum coating:** Used in thermal evaporation-deposition technology in electronics manufacturing.

**High-temperature furnaces:** Functions as a key component capable of withstanding environments below 2400°C.

**Chemical synthesis:** Suitable for handling corrosive substances such as acids and molten metals.

**Metal smelting and refining:** Used for melting and refining high-purity metals.

**Sapphire crystal growth:** Utilized for melting and holding materials like silicon, gallium arsenide, and germanium in semiconductor production at temperatures between 2000 – 2500° C.

### 4. Specifications of Tungsten Crucibles

Specification	Details
Material	Pure tungsten or tungsten alloy
Purity	99.95%
Diameter	20–620 mm
Height	20–500 mm
Wall Thickness	3.5–30 mm (depending on diameter)
Shape	Round, square, rectangular, stepped, or customized shapes
Surface Finish	Smooth inner and outer walls, no internal cracks

### 5. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten.com.cn](http://www.tungsten.com.cn)

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés 电话/TEL :0086 592 512 9696  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版 CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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

## Chapitre 3 Processus de préparation et technologie du creuset en tungstène

La préparation du creuset en tungstène est un processus complexe impliquant la préparation des matières premières, la métallurgie des poudres, le moulage, le frittage, l'usinage, le post-traitement et le contrôle de la qualité. Les détails techniques de chaque maillon affectent directement les performances et le coût du creuset. Ce chapitre aborde en détail le déroulement du processus, les exigences en matière d'équipement, les stratégies d'optimisation de chaque maillon et les dernières avancées technologiques des principales entreprises mondiales de produits en tungstène.

### 3.1 Préparation des matières premières du creuset en tungstène

La qualité de la matière première est à la base des performances du creuset en tungstène, ce qui détermine directement sa pureté, sa microstructure et ses performances à haute température. Ce qui suit est une discussion détaillée sous quatre aspects : le raffinage du minerai de tungstène, les caractéristiques de la poudre de tungstène, le contrôle de la taille des particules et l'inspection de la qualité.

#### 3.1.1 Raffinage du minerai de tungstène et production de poudre de tungstène de haute pureté

Les matières premières du creuset en tungstène sont principalement dérivées de la wolframite et de la scheelite ([www.tungsten.com.cn](http://www.tungsten.com.cn)). Le processus de raffinage comprend le concassage du minerai, la flottation, la séparation par gravité, la lixiviation chimique et la préparation de paratungstate d'ammonium (APT). L'APT produit de la poudre de tungstène de haute pureté par réduction de l'hydrogène, et le déroulement du processus est le suivant : calcination APT (500-800 °C) → réduction de l'hydrogène (800-1000 °C) → criblage de poudre.

La pureté de la poudre de tungstène de haute pureté est généralement nécessaire pour atteindre plus de 99,95 %, et certaines applications haut de gamme (telles que les semi-conducteurs) nécessitent 99,999 % (5N). Le contrôle de l'atmosphère (pureté de l'hydrogène > 99,999 %) et du gradient de température ( $\pm 5$  °C) pendant la réduction de l'APT sont essentiels pour atteindre une pureté élevée. Les fours de réduction sont généralement conçus avec un contrôle de température multizone, et le matériau du tube du four est du molybdène ou du quartz de haute pureté pour éviter la contamination par les impuretés.

Les défis du processus de raffinage comprennent la consommation d'énergie et les questions environnementales. Le processus hydrométallurgique traditionnel nécessite l'utilisation d'un grand nombre de réactifs acides et alcalins, qui produisent des déchets liquides et des gaz résiduels. La technologie métallurgique verte de Chinatungsten Online réduit les émissions de déchets liquides à 0,1 m<sup>3</sup>/tonne grâce au traitement de l'eau en boucle fermée et à la conversion catalytique des gaz d'échappement, conformément à la norme ISO 14001 [67].

#### 3.1.2 Exigences relatives aux caractéristiques chimiques et physiques de la poudre de tungstène

Les propriétés chimiques de la poudre de tungstène comprennent une faible teneur en oxygène

(<200 ppm), une faible teneur en impuretés (fer <50 ppm, nickel < 20 ppm, carbone <30 ppm) et une grande pureté (>99,95 %). Les propriétés physiques comprennent la taille des particules, la topographie, la fluidité et la densité apparente. La plage de taille des particules est généralement de 1 µm à 10 µm, et la topographie est de préférence presque sphérique pour améliorer la densité et les propriétés de frittage de la poudre. Le débit est mesuré à l'aide d'un débitmètre de vitesse à effet Hall, et le débit de la poudre de tungstène de haute qualité doit être inférieur à 20 s/50 g. La densité apparente (environ 4-6 g/cm<sup>3</sup>) reflète les caractéristiques d'emballage de la poudre et affecte directement la densité du corps moulé.

Les spécifications techniques de Chinatungsten Online exigent que la teneur en oxygène de la poudre de tungstène soit contrôlée en dessous de 100 ppm par réduction de l'hydrogène à haute température, et que les impuretés de fer soient éliminées par séparation magnétique et décapage. La sphéroïdisation par plasma a été utilisée pour optimiser la forme irrégulière de la poudre en une forme presque sphérique, avec un taux de nodularisation de plus de 90 % [68]. Des entreprises mondiales telles que le groupe autrichien Plansee ont contrôlé la distribution granulométrique de la poudre de tungstène à ±0,5 µm grâce à la technologie de classification du flux d'air pour améliorer l'uniformité de la microstructure du creuset.

### 3.1.3 Distribution granulométrique et contrôle de la morphologie des particules de poudre de tungstène

La distribution granulométrique de la poudre de tungstène affecte directement la densité, les propriétés mécaniques et le retrait par frittage du creuset. La distribution granulométrique étroite ( $D_{90}/D_{10} < 2$ ) améliore l'uniformité du creuset et réduit la porosité et les fissures. Le contrôle de la taille des particules est généralement effectué à l'aide de la classification du flux d'air, du tamisage par ultrasons ou des techniques de sédimentation humide. La classification du flux d'air sépare les poudres de différentes tailles de particules en ajustant la vitesse du flux d'air (5-20 m/s) avec une précision de ±0,1 µm. Le tamisage par ultrasons est utilisé pour éliminer les poudres ultrafines (<0,5 µm) afin d'éviter une croissance anormale des grains pendant le processus de frittage.

Le contrôle de la topographie est la clé de l'optimisation de la taille des particules. La densité apparente de la poudre presque sphérique est d'environ 20 % supérieure à celle de la poudre irrégulière, et la densité du frittage peut atteindre plus de 99 %. La technologie de sphéroïdisation par plasma fait fondre la poudre de tungstène avec du plasma à haute température (>10000°C) pour former une forme sphérique sous tension superficielle.

### 3.1.4 Inspection de la qualité des matières premières

Les tests de matières premières comprennent l'analyse de la composition chimique, l'analyse de la taille des particules, l'observation de la morphologie et les tests de propriétés physiques. La composition chimique a été analysée à l'aide de la spectrométrie de fluorescence X (XRF), de la spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) et d'analyseurs de gaz avec une précision de 1 ppm. L'analyse granulométrique est effectuée par un analyseur de taille de particules laser avec une plage de mesure de 0,1 µm à 100 µm. La microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie électronique à transmission (MET) ont été utilisées pour l'observation de la

topographie avec une résolution de 1 nm. Les tests de propriétés physiques comprennent des mesures d'écoulement et de densité apparente pour s'assurer que la poudre répond aux exigences de moulage et de frittage.

### 3.2 Procédé de métallurgie des poudres de creuset de tungstène

La métallurgie des poudres est la technologie de base de la préparation des creusets en tungstène, qui implique des étapes telles que le mélange, la pression à froid et la densification. Ce qui suit est une discussion détaillée de trois aspects : le mélange et les additifs, la pression à froid et le préformage, ainsi que la densification et le déliant.

#### 3.2.1 Mélange de poudre de tungstène et additifs

Pour améliorer les performances du creuset, des oligo-éléments (par exemple, lanthane, cérium, yttrium) ou des liants (par exemple, alcool polyvinylique PVA, polyméthacrylate de méthyle PMMA) sont généralement ajoutés à la poudre de tungstène. Le lanthane (0,5-1 %) améliore la résistance à haute température et la résistance au fluage du tungstène, tandis que le cérium (0,2-0,5 %) améliore la résistance aux chocs thermiques. Les liants sont utilisés pour améliorer la résistance des corps pressés à froid, généralement à une dose de 1 à 3 % en poids. Le processus de mélange utilise des broyeurs à boulets planétaires ou des mélangeurs en V avec un temps de mélange de 4 à 8 heures et une vitesse de 100 à 300 tr/min pour assurer une distribution uniforme des additifs.

#### 3.2.2 Technique de pressage à froid et de préformage

Le formage par pression à froid est réalisé par la technologie de pressage uniaxial ou de pressage isostatique avec une plage de pression de 100 MPa à 300 MPa. Le pressage à arbre unique convient aux petits creusets (diamètre < 200 mm) avec des moules en acier à haute résistance ou en carbure et polis en surface à  $Ra < 0,1 \mu\text{m}$ . Le pressage isostatique (NEP) applique une pression uniforme à travers un milieu liquide et convient aux grands creusets (diamètre > 300 mm) avec une densité de 60 à 70 % de la densité théorique. La forme du corps de la préforme doit tenir compte du retrait de frittage (15 % à 20 %), et la taille du moule est généralement agrandie de 1,2 fois.

#### 3.2.3 Densification et déliantage des poudres

Le processus de déliantage est effectué dans une atmosphère d'hydrogène de 400°C à 600°C, avec un temps de maintien de 2 à 4 heures et un taux d'enlèvement de plus de 99 %. L'atmosphère d'hydrogène empêche l'oxydation de la poudre de tungstène et élimine les impuretés d'oxygène de la surface. La densification est obtenue par frittage, et la densité finale du creuset peut atteindre plus de 99 %. Le corps de pré-frittage est pré-fritté (800-1000°C) pour augmenter la résistance initiale.

### 3.3 Procédé de formage du creuset en tungstène

Le processus de formage détermine la précision géométrique, l'uniformité structurelle et l'efficacité de production du creuset. Ce qui suit est une discussion détaillée de cinq aspects : le pressage isostatique, le moulage, la filature, le formage de formes complexes et la conception de moules.

#### 3.3.1 Pressage isostatique (pressage isostatique à froid, pressage isostatique à chaud)

##### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Le pressage isostatique à froid (CIP) applique une pression (100-200 MPa) uniformément à travers un milieu liquide tel que l'eau ou l'huile, et convient au formage de grands creusets. La chambre de pression d'une installation CIP est généralement en acier à haute résistance et doublée d'un moule en caoutchouc pour protéger la surface du corps vert. Le pressage isostatique à chaud (HIP) est effectué à des températures élevées (1000-1500°C) et à des pressions élevées (100-200 MPa) pour augmenter encore la densité du creuset et réduire la porosité à moins de 0,1 %.

### 3.3.2 Moulage par compression et extrusion

Le moulage par compression est réalisé par pressage uniaxial ou biaxial, ce qui convient à la production de petits volumes avec de faibles coûts d'outillage. L'extrusion est utilisée pour produire des creusets minces (par exemple hauteur > 1000 mm) avec un rapport d'aspect élevé (> 10:1) obtenu par extrusion continue. Les deux procédés nécessitent un contrôle précis du débit de poudre et des lubrifiants de moule (par exemple, émulsion de graphite).

### 3.3.3 Filage et étirement

Le moulage par filage façonne des creusets en faisant tourner des moules à grande vitesse (500-2000 tr/min) et convient à la production de creusets à paroi mince (épaisseur de paroi < 3 mm). Le moule est en carbure ou en céramique, et la surface est polie à  $Ra < 0,05 \mu\text{m}$ . Le formage par étirement est réalisé au moyen d'une matrice d'étirage et convient aux creusets de grandes hauteurs. Selon le rapport technique de Chinatungsten Online, l'uniformité de l'épaisseur de paroi du creuset formé par filage est de  $\pm 0,1 \text{ mm}$  et l'efficacité de production est supérieure d'environ 50 % à celle du moulage.

### 3.3.4 Technique de formage pour creusets de formes complexes

Les creusets aux formes complexes, tels que les conceptions à brides, à plusieurs cavités ou étagés, sont souvent filés par filage CN, pressage isostatique ou fabrication additive. La filature CNC permet des géométries complexes grâce à une liaison multi-axes, tandis que le pressage isostatique est formé par des moules flexibles.

### 3.3.5 Conception et fabrication du moule

La conception du moule doit tenir compte du retrait de frittage, de la distribution des contraintes thermiques et de la durée de vie du moule. Le matériau du moule est généralement de l'acier à haute résistance, du carbure ou de la céramique, et la surface doit être chromée ou recouverte de DLC (revêtement de type diamant) pour améliorer la résistance à l'usure.

## 3.4 Procédé de frittage de creusets en tungstène

Le processus de frittage du creuset en tungstène est l'étape centrale de son processus de préparation, qui détermine directement la densité, la microstructure, les propriétés mécaniques, la stabilité à haute température et la durée de vie finale du creuset. Le frittage provoque la diffusion et la combinaison des particules de poudre de tungstène à travers un traitement à haute température pour former une structure solide uniforme à haute densité. En raison du point de fusion ultra-élevé (environ 3422°C), de la dureté élevée et de l'inertie chimique du tungstène, le processus de frittage

doit être effectué dans des conditions contrôlées avec précision pour garantir une qualité de produit constante et des performances fiables. Ce chapitre abordera en profondeur les différentes technologies de frittage de creusets de tungstène, y compris le frittage sous vide, le frittage sous protection contre l'hydrogène ou le gaz inerte, l'optimisation des paramètres de frittage, le frittage multi-étapes, le frittage de gradient, le retrait de frittage et le contrôle de la taille, combinées aux pratiques techniques des entreprises mondiales de produits de tungstène, aux dernières recherches universitaires et aux informations sur l'industrie fournies par Chinatungsten Online, Analyser de manière exhaustive les principes, les équipements, les paramètres et les défis du processus de frittage.

### 3.4.1 Technologie de frittage sous vide

Le frittage sous vide est le procédé de choix pour la production de creusets en tungstène de haute pureté, qui sont largement utilisés dans des domaines exigeants tels que la croissance de cristaux semi-conducteurs, la fusion de métaux de terres rares et l'industrie nucléaire. L'environnement sous vide réduit considérablement l'oxydation du tungstène par l'oxygène et d'autres gaz réactifs, assurant ainsi une grande pureté et d'excellentes performances du creuset.

#### Principe du processus

Le frittage sous vide chauffe le corps en tungstène à une température inférieure au point de fusion du tungstène (généralement entre 1800°C et 2600°C) pour favoriser la diffusion de surface, la diffusion des joints de grains et la diffusion stéréoscopique entre les particules pour former une microstructure dense. Sous vide, les molécules de gaz sont éliminées de l'environnement, ce qui réduit la formation d'oxydes (par exemple, le trioxyde de tungstène) et d'autres impuretés. Au cours du processus de frittage, les particules de tungstène sont liées par migration atomique et fermeture des pores pour former une structure de creuset d'une densité proche de la densité théorique (19,25 g/cm<sup>3</sup>).

#### Exigences en matière d'équipement :

Le frittage sous vide utilise généralement un four de frittage sous vide à haute température équipé d'éléments chauffants en molybdène, en tungstène ou en graphite pour atteindre des températures extrêmement élevées. Le corps du four doit avoir les caractéristiques suivantes :

Système de vide : Équipé de pompes mécaniques, de diffusion ou turbomoléculaires pour assurer un niveau de vide de 10<sup>-3</sup> Pa à 10<sup>-5</sup> Pa.

Éléments chauffants : Les éléments chauffants en molybdène ou en graphite doivent résister à des températures élevées supérieures à 2600°C et avoir une répartition uniforme de la température.

Contrôle de la température : un thermomètre infrarouge ou un thermocouple est utilisé et la précision est contrôlée à ±5°C.

Matériau du four : Doublé de graphite ou de molybdène de haute pureté pour éviter toute réaction avec le corps en tungstène à haute température.

#### Paramètres du processus

##### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Les paramètres clés du processus ont un impact significatif sur l'effet de frittage :

Température de frittage : généralement entre 2000°C et 2400°C. Une température élevée (>2500°C) peut entraîner une croissance anormale des grains et réduire la résistance à la propagation des fissures du creuset. Des températures trop basses (<1900°C) peuvent entraîner une densité insuffisante (<95 %).

Temps de maintien : En fonction de la taille du creuset et de l'épaisseur de la paroi, le temps de maintien est généralement de 2 à 10 heures. Il faut compter 2 à 4 heures pour les creusets à paroi mince (épaisseur de paroi <5 mm) et 6 à 10 heures pour les creusets à paroi épaisse (épaisseur de paroi > 10 mm).

Vide : en dessous de  $10^{-3}$  Pa, certaines applications haut de gamme (par exemple, les creusets pour semi-conducteurs) nécessitent  $10^{-4}$  Pa ou plus.

Vitesse de chauffage : contrôle à 3°C/min à 10°C/min, trop rapide peut provoquer des contraintes thermiques et provoquer des fissures du corps vert.

Vitesse de refroidissement : contrôlée en dessous de 5°C/min, en utilisant le refroidissement sectionnel pour réduire les contraintes résiduelles.

### Avantages technologiques

Haute pureté : L'environnement sous vide empêche efficacement l'oxydation et la pollution par les impuretés, et la pureté du creuset peut atteindre plus de 99,99 %.

Microstructure homogène : Les granulométries de 10 à 50  $\mu\text{m}$  peuvent être contrôlées par un contrôle précis de la température et du temps, optimisant ainsi les propriétés mécaniques.

Faible taux de défauts : Réduit la porosité et les inclusions, ce qui permet d'obtenir des densités de 98 % à 99,5 % pour répondre aux besoins des applications haut de gamme.

### Défis techniques

Coûts d'équipement élevés : Les fours de frittage sous vide sont coûteux à fabriquer et à entretenir, en particulier pour le fonctionnement de systèmes à vide poussé.

Consommation d'énergie élevée : Consommation d'énergie élevée en raison de la température élevée et du frittage à long terme, et le processus doit être optimisé pour améliorer l'économie.

Exigences élevées pour le corps vert : La densité et l'uniformité initiales du corps vert affectent directement l'effet de frittage, et le processus précédent (tel que le moulage sous pression isostatique) doit être strictement contrôlé.

### 3.4.2 Frittage sous protection contre l'hydrogène ou le gaz inerte

Le frittage protégé contre l'hydrogène ou les gaz inertes (par exemple l'argon, l'azote) est une autre technologie importante dans la production de creusets en tungstène pour des applications sensibles aux coûts ou de pureté relativement faible, telles que la fusion des métaux précieux dans l'industrie métallurgique et le traitement des matériaux en silicium dans l'industrie photovoltaïque.

### Principe du processus

Protégé par de l'hydrogène ou un gaz inerte, l'environnement de frittage peut empêcher efficacement la réaction du corps de tungstène avec l'oxygène ou d'autres gaz réactifs. Le frittage d'hydrogène améliore la pureté des matériaux en tungstène en réduisant les oxydes traces tels que le  $WO_3$  et favorise la liaison par diffusion entre les particules. Les gaz inertes (tels que l'argon) empêchent le tungstène de réagir avec l'oxygène ou l'azote à haute température en formant une atmosphère inerte, ce qui convient aux scénarios avec des exigences élevées en matière de stabilité chimique.

### Exigences en matière d'équipement :

Les fours de frittage d'hydrogène et les fours de frittage de gaz inerte doivent avoir les caractéristiques suivantes :

Système de chauffage : le fil de tungstène, le fil de molybdène ou l'élément chauffant en graphite est utilisé pour résister à des températures élevées supérieures à 2300°C.

Système de purification des gaz : Équipé d'un tamis moléculaire ou d'un catalyseur pour garantir que la pureté de l'hydrogène atteint 99,999 % et éliminer les impuretés de l'eau et de l'oxygène.

Système de circulation d'atmosphère : contrôlez le débit et la pression du gaz pour éviter une atmosphère locale inégale.

Système de sécurité : Les fours de frittage d'hydrogène doivent être équipés de dispositifs antidéflagrants et de systèmes de détection de fuites pour garantir un fonctionnement sûr.

### Paramètres du processus

Température de frittage : généralement entre 1800°C et 2300°C, inférieure à celle du frittage sous vide pour réduire la consommation d'énergie.

### Contrôle de l'atmosphère :

Hydrogène : pureté  $\geq 99,999\%$ , débit 0,5 à 2 L/min, teneur en humidité  $< 5$  ppm.

Argon : pureté  $\geq 99,999\%$ , teneur en oxygène  $< 10$  ppm, pression 0,1 à 0,5 MPa.

Temps de maintien : 3 à 12 heures, en fonction de la taille du creuset et des exigences de densité.

Vitesse de chauffage : 5°C/min à 15°C/min, efficacité d'équilibrage et stress thermique.

Vitesse de refroidissement : 3 °C/min à 8 °C/min, refroidissement assisté par gaz inerte pour réduire les contraintes.

### Avantages technologiques

Coût inférieur : Par rapport au frittage sous vide, le frittage d'hydrogène a des coûts d'équipement et d'exploitation inférieurs, et convient à la production en grand volume.

Réduction des oxydes : L'hydrogène peut éliminer efficacement les traces d'oxydes dans la poudre de tungstène et améliorer la pureté des matériaux.

Flexibilité : Le frittage sous gaz inerte peut être adapté à une variété de scénarios en sélectionnant différents gaz (par exemple l'argon ou l'hélium) en fonction des exigences de l'application.

### Défis techniques

Sécurité de l'hydrogène : L'inflammabilité de l'hydrogène nécessite des mesures de sécurité strictes,

[Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale](#)

ce qui ajoute à la complexité de la conception de l'équipement.

Difficulté du contrôle de l'atmosphère : Contrôle précis de la pureté et du débit des gaz pour éviter l'introduction d'humidité ou d'autres impuretés.

Limites de pureté : Le frittage sous atmosphère a une pureté légèrement inférieure à celle du frittage sous vide et peut ne pas convenir aux applications d'ultra-haute pureté.

### 3.4.3 Optimisation de la température, du temps et de l'atmosphère de frittage

L'optimisation de la température, du temps et de l'atmosphère de frittage est la clé pour obtenir des creusets en tungstène haute performance, qui affectent directement la densité, la taille des grains, les propriétés mécaniques et la stabilité à haute température. En optimisant systématiquement ces paramètres, il est possible d'atteindre le meilleur équilibre entre performance et coût.

#### Optimisation de la température

La température de frittage est le principal facteur affectant le taux de diffusion et la croissance des grains des particules de tungstène. Des études ont montré que :

En dessous de 2000°C, le taux de diffusion des particules est plus lent et la densité est généralement inférieure à 95 %, ce qui le rend inadapté aux applications exigeantes.

À 2200°C à 2400°C, la densité peut atteindre 97 % à 99,5 %, et la taille des grains est contrôlée de 20 à 50µm, en tenant compte de la résistance et de la ténacité.

Au-dessus de 2500°C, la prolifération des grains (>100µm) peut entraîner une diminution de la résistance à la propagation des fissures et affecter la durée de vie du creuset. La stratégie d'optimisation comprend l'utilisation de courbes de chauffage à gradient (par exemple, préchauffage à 1000 °C, frittage à moyenne température 1800 °C, densification à haute température à 2300 °C) pour équilibrer la densification et le contrôle des grains. Selon un article technique de Chinatungsten Online, une optimisation précise de la température peut améliorer la résistance aux chocs thermiques du creuset jusqu'à 20 %.

#### Optimisation du temps

Le temps de maintien doit correspondre à la taille du creuset, à l'épaisseur de la paroi et aux objectifs de densité :

Petit creuset (diamètre < 100mm) : maintenir au chaud pendant 2 à 4 heures, et la densité peut atteindre plus de 97 %.

Creusets de taille moyenne (100 à 300 mm de diamètre) : maintenir au chaud pendant 4 à 8 heures pour assurer une densification uniforme.

Grands creusets (diamètre > 300 mm) : tenir pendant 8 à 12 heures, prolongés pour compenser le retard de diffusion dans les zones à parois épaisses. Une conservation trop longue peut entraîner une augmentation de la consommation d'énergie et des grains grossiers, tandis qu'une conservation trop courte peut entraîner une porosité résiduelle. Des études ont montré que l'efficacité de la production peut être augmentée de 10 à 15 % en ajustant dynamiquement le temps de maintien.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Optimisation de l'atmosphère

La sélection et le contrôle de l'atmosphère sont essentiels à la pureté et aux performances du creuset en tungstène :

Atmosphère d'hydrogène : Augmente la pureté du tungstène à plus de 99,95 % en réduisant les oxydes traces (par exemple  $WO_2$ ,  $WO_3$ ). La teneur en humidité (<5 ppm) doit être strictement contrôlée pour éviter la réaction de la vapeur d'eau avec le tungstène pour former des composés volatils.

Atmosphère d'argon : convient aux applications d'ultra-haute pureté, telles que les creusets pour l'industrie nucléaire, où la teneur en oxygène < de 10 ppm.

Atmosphère d'hélium : conductivité thermique élevée, adaptée aux scénarios de refroidissement rapide, mais à un coût plus élevé. Les technologies de conditionnement dynamique de l'atmosphère, telles que la commutation d'étage de l'hydrogène et de l'argon, optimisent encore l'effet de frittage. Des recherches menées par le groupe Plansee ont montré que le contrôle dynamique de l'atmosphère peut réduire jusqu'à 30 % la teneur en impuretés chimiques des creusets.

### 3.4.4 Procédé de frittage en plusieurs étapes et de frittage par gradient

Le frittage à plusieurs étapes et le frittage à gradient sont des technologies de pointe dans la fabrication de creusets en tungstène, qui sont conçues pour résoudre les problèmes d'inhomogénéité, de contrainte thermique et de défauts de microstructure dans le processus de frittage des creusets à grande échelle.

#### Frittage en plusieurs étapes

Le frittage en plusieurs étapes réalise progressivement la densification du corps vert en contrôlant la température et le temps de maintien en étapes, qui est divisé en :

Phase basse température (800°C à 1200°C) : Élimine les liants, les impuretés volatiles et les gaz adsorbés pour éviter la formation de pores dans la phase à haute température qui s'ensuit.

Stade à température moyenne (1600°C à 1800°C) : favorise la liaison initiale des particules et réduit la porosité à moins de 20 %.

Phase haute température (2200°C à 2400°C) : Densification finale avec une densité supérieure à 98 %. Les avantages du frittage en plusieurs étapes sont la réduction des contraintes thermiques, la réduction des microfissures et l'amélioration de l'uniformité structurelle. Des études ont montré que le frittage en plusieurs étapes peut réduire le taux de défauts des grands creusets jusqu'à 25 %.

#### Frittage de gradient

Le frittage de gradient optimise la distribution des propriétés en appliquant différentes températures, atmosphères ou pressions à différentes zones du creuset. Par exemple:

Frittage à haute température de la paroi extérieure : une température élevée de 2400°C est utilisée pour améliorer la dureté et la résistance à l'usure.

Frittage à basse température de la paroi intérieure : contrôlé à 2200°C, ténacité et résistance aux chocs thermiques optimisées.

Gradient d'atmosphère : l'atmosphère d'argon est utilisée sur la paroi extérieure pour améliorer la

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

pureté, et l'atmosphère d'hydrogène est utilisée sur la paroi intérieure pour éliminer les oxydes. Le frittage par gradient nécessite des conceptions de fours de frittage avancées, telles que le chauffage zonal et les systèmes de contrôle multi-atmosphères. Selon le rapport technique de Chinatungsten Online, la technologie de frittage par gradient peut réduire l'incidence de la fissuration de 35 % dans la production de creusets en tungstène de grand diamètre (>400 mm).

### Équipement et contrôle

Le frittage à plusieurs étages et à gradient nécessite un four de frittage intelligent avec les caractéristiques suivantes :

Chauffage par zone : contrôle indépendant de la température des différentes zones grâce à plusieurs éléments chauffants.

Régulation dynamique de l'atmosphère : Équipé d'un système de distribution de gaz pour prendre en charge la commutation d'hydrogène, d'argon ou d'atmosphères mixtes.

Surveillance en temps réel : La mesure de température infrarouge et la télémétrie laser sont utilisées pour surveiller le champ de température et les changements de taille du creuset.

### 3.4.5 Frittage, retrait et contrôle granulométrique

Le retrait pendant le processus de frittage est un défi clé dans la fabrication de creusets en tungstène, ayant un impact direct sur la précision dimensionnelle finale, les tolérances géométriques et la cohérence de la production.

#### Mécanisme de retrait

Le retrait de l'aggloméré est dû au processus de fermeture des pores et de densification entre les particules de tungstène. La perte est généralement comprise entre 15 % et 22 %, en fonction des facteurs suivants :

Taille des particules de poudre de tungstène : la taille des particules fines (<5 µm) a un retrait élevé (18 % à 22 %), la grande taille des particules (>10 µm) a un retrait plus faible (15 % à 18 %).

Densité du corps vert : Plus la densité initiale du corps vert pressé isostatique à froid est élevée, plus le retrait est faible.

Conditions de frittage : Une température élevée et un frittage long augmenteront le retrait, mais peuvent entraîner des écarts dimensionnels. Le processus de retrait est divisé en trois phases : le retrait initial (fermeture initiale des pores), le retrait intermédiaire (liaison des particules) et le retrait final (achèvement de la densification).

### Technologie de contrôle dimensionnel

Pour garantir la précision dimensionnelle du creuset, les mesures suivantes doivent être prises :

Conception du moule : La marge est réservée en fonction du retrait, généralement de 1,15 à 1,25 fois la taille finale. L'analyse par éléments finis (FEA) est utilisée pour simuler le comportement de retrait et optimiser la géométrie du moule.

Homogénéité : En optimisant le processus de pressage ou de moulage isostatique à froid, l'uniformité de la densité du corps vert (écart <2 %) est assurée et le retrait irrégulier est réduit.

Supports frittés : Des supports en graphite, en molybdène ou en zircone de haute pureté sont utilisés pour éviter que le creuset ne se déforme ou ne s'effondre à haute température.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Surveillance en temps réel : Le télémètre laser ou l'imagerie par rayons X est utilisé pour surveiller le changement de taille du creuset en temps réel, et la précision peut atteindre  $\pm 0,05$  mm.

Frittage segmenté : Le taux de retrait est contrôlé par un frittage en plusieurs étapes pour éviter les concentrations de contraintes causées par un retrait rapide.

### Défis techniques

Écarts dimensionnels : La non-uniformité du retrait des grands creusets ( $> 500$  mm de diamètre) peut entraîner un dépassement des tolérances.

Contrainte thermique : Un retrait rapide peut provoquer des microfissures, qui doivent être atténuées en optimisant la courbe de refroidissement.

Coût de l'outillage : Le coût de fabrication des moules de haute précision est élevé et il est nécessaire d'équilibrer les coûts et les performances.

## 3.5 Usinage et finition du creuset en tungstène

L'usinage et la finition des creusets en tungstène sont une étape essentielle pour garantir leur précision géométrique, leur qualité de surface et leurs performances après frittage. En raison de la dureté élevée de l'alliage de tungstène (environ 7,5 sur l'échelle de Mohs), de sa densité élevée et de sa fragilité à température ambiante, le processus d'usinage nécessite un équipement de haute précision, des outils avancés et un contrôle strict du processus. Ce chapitre discutera en détail des technologies de tournage, de fraisage, de perçage, d'EDM, de découpe laser, de meulage de précision, de polissage et de revêtement de surface, combinées à l'expérience pratique et aux derniers progrès de la recherche des entreprises mondiales de produits en tungstène, et analysera en profondeur les principes, l'équipement, les paramètres, les avantages et les défis de chaque processus.

### 3.5.1 Tournage, fraisage et perçage

#### Principe du processus

Le tournage, le fraisage et le perçage sont les processus de base de l'usinage du creuset en tungstène et sont utilisés pour former la forme, la cavité et les trous fonctionnels du creuset :

Tournage : Découpe de matériaux par rotation de la pièce et d'outils fixes, principalement pour les parois extérieures et intérieures des creusets cylindriques, en assurant la rondeur et la concentricité.

Fraisage : Découpe de matériaux à l'aide d'outils rotatifs et de pièces mobiles, adaptée à l'usinage de géométries complexes, telles que des marches ou des rainures de creusets.

Perçage : L'usinage de trous fonctionnels (par ex. trous d'aération ou trous de montage) dans le creuset en faisant pivoter le foret garantit la précision du diamètre du trou et les tolérances de position.

#### Exigences en matière d'équipement :

Les creusets en tungstène sont généralement usinés à l'aide de machines à commande numérique (CNC) de haute précision équipées des équipements suivants :

Machine-outil : tour CNC 5 axes ou centre d'usinage à haute rigidité et suppression des vibrations.

Outils : Outils diamantés (PCD) ou en nitrure de bore cubique (CBN) d'une dureté supérieure à celle du tungstène (HV $>$ 2000).

Système de refroidissement : système d'injection de liquide de refroidissement à base d'huile ou d'eau haute pression avec une pression de 10 à 20 MPa pour éviter la surchauffe de l'outil.

Système de dépoussiérage : le dépoussiéreur à impulsions à haut rendement recueille la poussière de tungstène (granulométrie  $<10\mu\text{m}$ ) pour garantir un environnement de fonctionnement sûr.

### Paramètres du processus

Vitesse de coupe : 10 à 50 m/min, trop élevée peut entraîner une usure de l'outil, trop faible réduira l'efficacité.

Avances : 0,02 à 0,2 mm/tr, optimisées pour l'épaisseur de la paroi du creuset et les performances de l'outil.

Profondeur de coupe : 0,1 à 0,5 mm, une coupe profonde peut provoquer des microfissures.

Débit de liquide de refroidissement : 10 à 30 L/min pour garantir que la température de la zone de coupe est inférieure à 200°C.

### Avantages technologiques

Haute précision : les machines-outils CNC peuvent atteindre des tolérances dimensionnelles de  $\pm 0,02$  mm, ce qui répond aux applications des semi-conducteurs et de l'aérospatiale.

Flexibilité : Le fraisage et le perçage peuvent être utilisés pour usiner des formes complexes et s'adapter aux besoins de personnalisation.

Qualité de surface : La rugosité de surface (Ra) peut être contrôlée de 0,8 à 1,6  $\mu\text{m}$  en optimisant les paramètres.

### Défis techniques

Usure de l'outil : La dureté élevée du tungstène entraîne une courte durée de vie de l'outil et nécessite le remplacement fréquent des outils en diamant ou CBN.

Microfissures : Les microfissures peuvent être causées par des contraintes mécaniques pendant le processus de coupe et peuvent être causées par des microfissures de surface ou internes, qui doivent être étudiées par des contrôles non destructifs (ultrasons ou rayons X).

Gestion de la poussière : La poussière de tungstène présente un risque potentiel pour la santé et nécessite un strict respect des normes de sécurité au travail (par exemple, OSHA).

### 3.5.2 EDM et découpe laser

#### Usinage par électroérosion (EDM)

L'électroérosion enlève de la matière de la surface de la pièce par arc électrique et convient à l'usinage de creusets en tungstène de haute dureté ou de formes complexes. L'EDM est divisée en deux formes : l'EDM à fil et l'EDM à matrice :

EDM découpé au fil : Utilise un fil métallique mince (par exemple, un fil de molybdène) comme électrode pour couper des contours complexes.

Die EDM : Usinage de cavités ou de rainures internes à l'aide d'électrodes préfabriquées telles que le cuivre ou le graphite.

### Paramètres du processus

Courant de décharge : 5 à 50 A, affectant la vitesse de traitement et la qualité de surface.

Largeur d'impulsion : 10 à 100  $\mu$ s, impulsions courtes pour la finition et impulsions longues pour l'ébauche.

Matériau de l'électrode : cuivre ou graphite, selon la précision de traitement à choisir.

Fluide de travail : eau déminéralisée ou média à base d'huile, qui doit maintenir une isolation élevée.

### Avantages technologiques

Pas de contrainte mécanique : l'usinage sans contact évite les contraintes de coupe et réduit les micro-fissures.

Formes complexes : des creusets de forme spéciale ou de petits éléments (par exemple un diamètre de trou de 0,1 mm) peuvent être usinés.

Adaptabilité à haute dureté : convient aux matériaux en tungstène de très haute dureté.

### Défis techniques

Vitesses d'usinage lentes : l'électroérosion a un taux d'enlèvement de matière plus faible (0,1 à 10  $\text{mm}^3/\text{min}$ ) par rapport à l'usinage.

Défauts de surface : La décharge peut provoquer des brûlures de surface ou des micropores, nécessitant un polissage ultérieur.

Usure des électrodes : La perte de matériau des électrodes augmente les coûts de traitement.

### Découpe laser

La découpe laser utilise un faisceau laser à haute énergie (laser à fibre ou laser  $\text{CO}_2$ ) pour fondre ou vaporiser des matériaux en tungstène et convient au traitement de creusets de haute précision et à paroi mince.

### Paramètres du processus

Puissance laser : 2 à 10 kW, selon l'épaisseur de la paroi.

Vitesse de coupe : 0,5 à 5 m/min, des vitesses plus élevées sont disponibles pour les creusets à paroi mince.

Position de mise au point : 0,1 à 0,5 mm sous la surface de la matière pour assurer la qualité de la coupe.

Gaz d'assistance : azote ou argon à une pression de 5 à 15 bars pour éviter l'oxydation.

### Avantages technologiques

Haute précision : coupe < 0,1 mm, tolérance  $\pm 0,02$  mm.

Petite zone affectée par la chaleur : le laser se concentre sur la concentration d'énergie et la profondeur de la zone affectée par la chaleur < 0,05 mm.

Efficace : Convient pour l'usinage à grande vitesse de creusets à paroi mince (épaisseur de paroi < 3 mm).

### Défis techniques

Stress thermique : Un échauffement rapide peut provoquer des microfissures, et les paramètres

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

d'impulsion laser doivent être optimisés.

Coût de l'équipement : Investissement élevé dans des équipements laser de haute puissance et une maintenance complexe.

Qualité de surface : Les surfaces coupées peuvent nécessiter un traitement secondaire pour réduire la rugosité.

### 3.5.3 Meulage et polissage de précision

#### Principe du processus

Le meulage et le polissage de précision sont utilisés pour améliorer la qualité de surface des creusets en tungstène et réduire la rugosité de surface (Ra) afin de répondre aux exigences strictes des semi-conducteurs, de l'optique et de la fusion à haute température :

Meulage : Enlèvement de matière de surface à l'aide d'une meule diamantée, améliorant la précision géométrique et la planéité de la surface.

Polissage : Le polissage chimico-mécanique (CMP), le polissage électrolytique ou le polissage par ultrasons sont utilisés pour réduire davantage la rugosité et améliorer la finition.

#### Exigences en matière d'équipement :

Rectifieuses : rectifieuses planes de haute précision ou rectifieuses cylindriques avec des vitesses de broche de 5 000 à 10 000 tr/min.

Meule : meule diamantée, granulométrie 400 à 2000 mesh, doit être taillée régulièrement.

Équipement de polissage : La machine CMP est équipée d'une tête de polissage de haute précision, et la machine de polissage à ultrasons doit prendre en charge les vibrations à haute fréquence (20 à 40 kHz).

Équipement d'essai : rugomètre de surface (tel que Talysurf) avec une résolution de 0,01 µm.

#### Paramètres du processus

Broyage:

Taille de la meule : 400 à 2000 mesh, 400 à 800 mesh pour le meulage grossier, 1200 à 2000 mesh pour le meulage fin.

Vitesse d'avance : 0,005 à 0,05 mm/min, garantissant l'absence de rayures sur la surface.

Liquide de refroidissement : à base d'eau ou d'huile, débit de 15 à 30 L/min.

Poli:

Boue CMP : alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ou dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>), granulométrie 0,05 à 0,5 µm.

Pression de polissage : 0,1 à 0,5 MPa, trop élevée peut causer des dommages de surface.

Temps de polissage : 1 à 4 heures, selon la rugosité cible.

#### Avantages technologiques

Rugosité ultra-faible : Ra peut atteindre 0,05 à 0,1 µm après polissage, ce qui répond aux exigences de croissance du cristal de saphir.

Résistance à la corrosion : La surface lisse réduit la réactivité chimique et prolonge la durée de vie du creuset.

Antisalissure : La surface à faible rugosité réduit l'adsorption des impuretés, ce qui la rend adaptée

aux applications de haute pureté.

### Défis techniques

Faible efficacité : La dureté élevée du tungstène entraîne des vitesses de meulage et de polissage lentes et de longs temps de traitement.

Micro-rayures : Des micro-rayures peuvent être introduites pendant le processus de polissage et doivent être éliminées par un polissage en plusieurs étapes.

Coût élevé : Les meules diamantées et les boues CMP sont coûteuses et le processus doit être optimisé pour réduire la consommation.

### 3.5.4 Revêtements de surface (revêtements anti-oxydation, revêtements résistants à l'usure)

#### Principe du processus

Le revêtement de surface est le dépôt de revêtements anti-oxydation, résistants à l'abrasion ou résistants à la corrosion sur la surface du creuset en tungstène par dépôt physique en phase vapeur (PVD), dépôt chimique en phase vapeur (CVD), pulvérisation plasma ou technologie de placage ionique à l'arc, ce qui prolonge considérablement la durée de vie. Les matériaux de revêtement courants comprennent :

Revêtements anti-oxydation : alumine ( $Al_2O_3$ ), zircone ( $ZrO_2$ ), siliciure de molybdène ( $MoSi_2$ ).

Revêtements résistants à l'usure : carbure de tungstène (WC), nitrure de titane (TiN), nitrure de chrome (CrN).

Revêtements résistants à la corrosion : carbure de silicium (SiC), borure de tungstène (WB).

#### Exigences en matière d'équipement :

Équipement PVD/CVD : Four de dépôt sous vide avec évaporation par faisceau d'électrons ou système de pulvérisation magnétron.

Équipement de pulvérisation plasma : Puissance du pistolet à plasma 50 à 100 kW, distance de pulvérisation 100 à 200 mm.

Matériel d'essai : jauge d'épaisseur de revêtement (résolution  $0,1\mu m$ ), testeur de rayures (test d'adhérence).

#### Paramètres du processus

PVD :

Température de dépôt :  $400^\circ C$  à  $800^\circ C$  pour éviter les modifications des propriétés de la matrice de tungstène.

Épaisseur du revêtement : 2 à  $10\mu m$ , en fonction de l'équilibre entre performance et coût.

Vide :  $10^{-2}$  à  $10^{-4}$  Pa pour assurer la qualité du dépôt.

CVD :

Température de dépôt :  $800^\circ C$  à  $1200^\circ C$ , contrainte thermique contrôlée.

Précurseurs de gaz : par exemple  $SiH_4$  (pour les revêtements SiC) ou  $CH_4$  (pour les revêtements WC).

Épaisseur du revêtement : 5 à  $20\mu m$ , adapté aux environnements à haute température.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Pulvérisation plasma :

Puissance de pulvérisation : 40 à 80 kW, affectant la densité du revêtement.

Distance de pulvérisation : 100 à 150 mm pour une adhérence optimale.

Épaisseur du revêtement : 20 à 100  $\mu\text{m}$ , adapté aux applications résistantes à l'usure.

### Avantages technologiques

Résistance à l'oxydation : Les revêtements  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{MoSi}_2$  peuvent prolonger la durée de vie des creusets en tungstène dans un environnement oxydant à  $1500^\circ\text{C}$  d'un facteur 2 à 5.

Résistance à l'abrasion : les revêtements WC ou TiN augmentent considérablement la dureté de surface ( $\text{HV} > 2500$ ) et réduisent l'usure.

Résistance à la corrosion : Le revêtement SiC résiste efficacement à la corrosion acido-basique et aux métaux en fusion, ce qui le rend adapté à l'industrie chimique.

### Défis techniques

Adhérence du revêtement : La différence de coefficient de dilatation thermique entre le revêtement et la matrice de tungstène peut entraîner un écaillage, et la conception de l'interface doit être optimisée.

Stabilité à haute température : Certains revêtements (par exemple TiN) peuvent se décomposer à  $> 1000^\circ\text{C}$ , il est donc nécessaire de sélectionner un matériau approprié.

Coût élevé : les équipements CVD et PVD sont fortement investis, et le processus de revêtement doit trouver un équilibre entre performances et économie.

## 3.6 Technologie de post-traitement du creuset en tungstène

Une fois le creuset en tungstène fritté et usiné, la technologie de post-traitement est une étape essentielle pour garantir ses performances, sa qualité de surface et sa durée de vie. En raison de la dureté, du point de fusion et de l'inertie chimique élevés du tungstène, le processus de post-traitement doit être effectué dans des conditions contrôlées avec précision afin d'optimiser les propriétés mécaniques, la stabilité chimique et l'adaptabilité à haute température du creuset. Ce chapitre discutera en profondeur des technologies de post-traitement du creuset en tungstène, telles que le traitement thermique, le recuit, le renforcement de surface, le nettoyage et la décontamination, le soulagement des contraintes, etc., et analysera de manière exhaustive les principes, l'équipement, les paramètres, les avantages et les défis de chaque processus sur la base de l'expérience pratique des entreprises mondiales de produits en tungstène et des informations sur l'industrie fournies par Chinatungsten Online.

### 3.6.1 Traitement thermique et processus de recuit

#### Principe du processus

Le processus de traitement thermique et de recuit optimise la microstructure, élimine les contraintes résiduelles et améliore les propriétés mécaniques des creusets en tungstène en les chauffant et en les refroidissant à des températures et des atmosphères spécifiques. Le traitement thermique est principalement utilisé pour ajuster la taille des grains et la structure de la phase, tandis que le recuit

[Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale](#)

se concentre sur l'élimination des contraintes internes introduites pendant le traitement et l'amélioration de la ténacité et de la résistance aux chocs thermiques du creuset.

### Exigences en matière d'équipement :

Le traitement thermique et le recuit sont généralement effectués dans des fours à vide à haute température ou des fours de protection de l'atmosphère, et l'équipement doit avoir les caractéristiques suivantes :

Système de chauffage : élément chauffant en molybdène ou en graphite, résistant aux hautes températures supérieures à 2000°C.

Contrôle de la température : thermomètre infrarouge ou thermocouple avec une précision de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  pour assurer une chauffe uniforme.

Contrôle de l'atmosphère : vide (inférieur à  $10^{-3}$  Pa) ou gaz inerte (tel que l'argon, l'hélium, pureté  $\geq 99,999\%$ ) pour éviter l'oxydation.

Système de refroidissement : Équipé d'un système de refroidissement par gaz ou par eau pour contrôler la vitesse de refroidissement afin d'éviter les contraintes thermiques.

### Paramètres du processus

Température de traitement thermique : généralement entre 1200°C et 1800°C, selon l'application du creuset. Les creusets pour semi-conducteurs nécessitent des températures plus basses (1200°C à 1400°C) pour maintenir les grains fins ; Les creusets métallurgiques peuvent être utilisés à des températures plus élevées (1600°C à 1800°C) pour augmenter la résistance.

Temps de maintien : 1 à 6 heures, 1 à 2 heures pour les creusets à paroi mince (épaisseur de paroi < 5 mm), et 4 à 6 heures pour les creusets à paroi épaisse (épaisseur de paroi > 10 mm).

Atmosphère : Atmosphère sous vide ou argon, teneur en oxygène < 5 ppm, empêchant l'oxydation de surface.

Vitesse de refroidissement : 2°C/min à 10°C/min, refroidissement segmenté pour réduire les contraintes résiduelles.

Nombre de cycles : Certains procédés nécessitent plusieurs traitements thermiques (par exemple, 2 à 3 fois) pour optimiser la microstructure.

Soulagement des contraintes : Le recuit peut réduire la contrainte de traitement de plus de 80 %, améliorant considérablement la résistance à la propagation des fissures du creuset.

Optimisation des grains : Le traitement thermique peut contrôler la taille des grains de 10 à 50  $\mu\text{m}$ , équilibrant la résistance et la ténacité.

Performances stables : améliorent la stabilité structurelle du creuset sous un cycle à haute température et prolongent la durée de vie.

Adaptabilité à haute température : Après avoir optimisé la microstructure, la résistance aux chocs thermiques du creuset peut être augmentée de 20 à 30 %.

### Défis techniques

Uniformité de la température : Les grands creusets (> 300 mm de diamètre) sont sujets à des gradients de température à des températures élevées, ce qui entraîne des performances inégales.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Risque d'oxydation : Un mauvais contrôle de l'atmosphère peut entraîner une oxydation de surface, nécessitant un gaz de haute pureté et une étanchéité étanche.

Consommation d'énergie élevée : Les températures élevées et le traitement à long terme augmentent la consommation d'énergie, et le processus doit être optimisé pour améliorer l'économie.

Variations dimensionnelles : Le traitement thermique peut provoquer de petits écarts dimensionnels, qui doivent être pré-compensés par la conception du moule.

### 3.6.2 Renforcement de surface (cémentation, nitruration, implantation ionique)

#### Principe du processus

Le renforcement de surface améliore les performances des creusets en tungstène dans des environnements difficiles en introduisant du carbone, de l'azote ou d'autres éléments à la surface pour former une couche de composés très durs, résistants à l'usure ou à la corrosion. Les techniques courantes de renforcement de surface comprennent :

Carburation : Les atomes de carbone sont infiltrés à la surface du tungstène à haute température pour former une couche de carbure de tungstène (WC).

Nitruration : Le nitrure de tungstène (WN) ou la couche composite de nitrure est formée par traitement sous atmosphère d'azote.

Implantation ionique : Du carbone, de l'azote ou des éléments métalliques (par exemple, le chrome, le titane) sont implantés dans une surface à l'aide de faisceaux d'ions à haute énergie pour améliorer la dureté et la stabilité chimique.

#### Exigences en matière d'équipement :

Équipement de cémentation : four de cémentation sous vide ou four de cémentation à gaz équipé d'un système d'alimentation en source de carbone (par exemple méthane, acétylène).

Équipement de nitruration : four de nitruration au plasma ou four de nitruration au gaz pour soutenir l'atmosphère d'azote ou d'ammoniac.

Équipement d'implantation ionique : Machine d'implantation ionique à vide poussé équipée d'une source d'ions (par exemple, carbone, azote, titane) et d'un accélérateur.

Équipement d'essai : diffractomètre à rayons X (XRD) pour analyser la structure de la couche de composé, testeur de nanodureté pour tester la dureté de surface.

#### Paramètres du processus

Cémentation :

Température : 1000°C à 1400°C pour éviter les gros grains dus à une température excessive.

Source de carbone : méthane (CH<sub>4</sub>) ou acétylène (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) avec un débit de 0,2 à 1 L/min.

Temps de mise en œuvre : 2 à 8 heures, épaisseur de couche contrôlée de 5 à 20 μm.

Atmosphère : Vide ou basse pression (10<sup>-1</sup> Pa) pour éviter l'oxydation.

Nitruration :

Température : 800°C à 1200°C, équilibrant l'épaisseur de la couche de nitrure et les performances du substrat.

Source d'azote : azote (N<sub>2</sub>) ou ammoniac (NH<sub>3</sub>), pureté ≥ 99,999 %.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Temps de mise en œuvre : 4 à 12 heures, épaisseur de couche 10 à 30  $\mu\text{m}$ .

Tension plasma : 500 à 1000 V (nituration plasma).

Implantation ionique :

Énergie ionique : 50 à 200 keV, profondeur d'implantation contrôlée (0,1 à 1  $\mu\text{m}$ ).

Dose ionique :  $10^{16}$  à  $10^{18}$  ions/ $\text{cm}^2$  pour des propriétés de surface optimales.

Vide :  $10^{-4}$  Pa ou moins pour garantir la pureté du faisceau d'ions.

### Avantages technologiques

Haute dureté : La dureté de la couche WC formée par la cémentation peut atteindre HV 2500, et la dureté de la couche de nituration peut atteindre HV 2000.

Résistance à l'abrasion : La couche de renfort de surface réduit considérablement l'usure à haute température et prolonge la durée de vie du creuset de 2 à 3 fois.

Résistance à la corrosion : La couche de nitrure et la couche d'implantation d'ions résistent efficacement à la corrosion acide-base et aux métaux en fusion.

Amélioration de la microstructure : L'implantation ionique peut former une couche de surface amorphe et améliorer la résistance à la fatigue.

### Défis techniques

Uniformité de l'épaisseur de la couche : La géométrie complexe des grands creusets peut entraîner des épaisseurs de couche de renforcement inégales.

Contrainte thermique : La cémentation ou la nituration à haute température peut provoquer une contrainte interfaciale entre la matrice et la couche de renforcement, et le processus doit être optimisé.

Coût de l'équipement : L'équipement d'implantation ionique a un investissement élevé et convient aux applications haut de gamme.

Complexité du processus : Le processus d'intensification en plusieurs étapes nécessite un contrôle strict des paramètres, ce qui augmente la difficulté de la production.

### 3.6.3 Procédés de nettoyage et de décontamination

#### Principe du processus

Le processus de nettoyage et de décontamination élimine les oxydes, les huiles, les résidus métalliques et les contaminants particuliers de la surface des creusets en tungstène par des méthodes physiques, chimiques ou ultrasoniques pour garantir une grande pureté et des propriétés antisalissure. Le processus de nettoyage est particulièrement critique pour les creusets de semi-conducteurs, photovoltaïques et de recherche scientifique, où tout contaminant à l'état de traces peut affecter la qualité du produit final.

#### Exigences en matière d'équipement :

Équipement de nettoyage : Nettoyeur à ultrasons (fréquence 20 à 80 kHz) avec système de nettoyage multi-réservoirs.

Équipement de nettoyage chimique : réservoir de nettoyage acide et alcalin, équipé de fonctions

d'agitation et de chauffage.

Équipement de séchage : four de séchage sous vide ou séchoir infrarouge pour garantir l'absence de résidus de filigrane.

Matériel d'essai : analyseur de taille de particules laser (détection de particules de surface), spectromètre à fluorescence X (XRF, analyse des éléments résiduels).

### Paramètres du processus

Nettoyage par ultrasons :

Fréquence : 40 kHz (nettoyage normal) ou 80 kHz (nettoyage de précision).

Solution de nettoyage : eau désionisée (résistivité > 18 MΩ·cm) ou agent de nettoyage neutre.

Température : 40°C à 60°C pour éviter les dommages de surface causés par des températures élevées.

Temps : 5 à 20 minutes, selon le niveau de contamination.

Nettoyage chimique :

Décapage : diluer l'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>, 5 % à 10 %) ou l'acide chlorhydrique (HCl, 5 %) pour éliminer les oxydes et les résidus métalliques.

Lavage caustique : hydroxyde de sodium (NaOH, 2 % à 5 %) pour éliminer les contaminants organiques.

Temps : 2 à 10 minutes, étroitement contrôlé pour éviter la corrosion.

Sec:

Température : 80°C à 120°C, sous vide ou sous atmosphère de gaz inerte.

Temps : 10 à 30 minutes pour éviter les traces d'eau ou la pollution secondaire.

### Avantages technologiques

Haute pureté : les contaminants de surface peuvent être réduits à moins de 10 ppb après le nettoyage, ce qui répond aux exigences de l'industrie des semi-conducteurs.

Anti-pollution : La surface lisse et non polluante réduit l'adsorption d'impuretés et prolonge la durée de vie du creuset.

Cohérence : Un processus de nettoyage standardisé garantit une qualité de surface constante d'un lot à l'autre.

Protection de l'environnement : Le processus de nettoyage moderne utilise des agents de nettoyage à faible toxicité pour réduire l'impact environnemental.

### Défis techniques

Élimination des particules : Les particules submicroniques (<0,1 μm) sont difficiles à éliminer complètement et nécessitent un nettoyage en plusieurs étapes.

Corrosion chimique : Le nettoyage à l'acide et à l'alcali peut endommager la surface, et la concentration et le timing doivent être contrôlés avec précision.

Contrôle du séchage : Un séchage inadéquat peut introduire des marques d'eau ou une pollution secondaire, et un environnement de haute pureté est requis.

Coût élevé : L'investissement dans les équipements de nettoyage par ultrasons et chimiques est

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

important et le coût d'exploitation doit être optimisé.

### 3.6.4 Soulagement des contraintes et optimisation structurale

#### Principe du processus

Réduit les contraintes résiduelles à l'intérieur et à la surface du creuset en tungstène au moyen d'un traitement thermique, de vibrations mécaniques ou d'un traitement laser, et optimise sa stabilité structurale. Les contraintes introduites lors du traitement et du frittage peuvent provoquer la fissuration ou la déformation du creuset sous des cycles à haute température, et le processus de soulagement des contraintes est la clé de la prolongation de la durée de vie.

#### Exigences en matière d'équipement :

Four de traitement thermique : four sous vide ou sous gaz inerte, précision du contrôle de la température  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Équipement vibrant : agitateur mécanique d'une fréquence de 10 à 100 Hz et d'une amplitude de 0,1 à 1 mm.

Machines laser : lasers pulsés d'une puissance de 1 à 5 kW pour la décharge de traction locale.

Équipement d'essai : Analyseur de contraintes à rayons X pour mesurer les contraintes résiduelles (précision  $\pm 5\text{ MPa}$ ).

#### Paramètres du processus

Soulagement du stress thermique :

Température :  $1000^{\circ}\text{C}$  à  $1400^{\circ}\text{C}$ , en dessous de la température de recristallisation pour éviter la croissance des grains.

Temps de maintien : 1 à 4 heures, selon la taille du creuset.

Atmosphère : argon ou vide, teneur en oxygène  $< 5\text{ ppm}$ .

Vitesse de refroidissement :  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  à  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , refroidissement segmenté.

Soulagement des vibrations :

Fréquence : 20 à 80 Hz pour une efficacité de décharge de traction optimisée.

Amplitude : 0,2 à 0,8 mm pour éviter d'endommager la surface.

Durée : 30 à 120 minutes, selon la répartition du stress.

Soulagement du stress au laser :

Puissance laser : 1 à 3 kW, largeur d'impulsion 10 à 100 ns.

Vitesse de balayage : 0,5 à 2 m/min, apport de chaleur contrôlé.

Diamètre de la mise au point : 0,1 à 0,5 mm, topique.

#### Avantages technologiques

Faible contrainte : La contrainte résiduelle peut être réduite à moins de 5 MPa pour améliorer la résistance à la fissuration.

Stabilité structurale : Après optimisation, le taux de déformation du creuset sous un cycle à haute température est réduit de 50 %.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Flexibilité : Le traitement par vibration et au laser peut être ciblé dans des zones localisées à forte contrainte et adapté aux formes complexes.

Non dommageable : Le processus non destructif n'affecte pas la microstructure du creuset.

### Défis techniques

Distribution complexe des contraintes : La répartition des contraintes des grands creusets est inégale et plusieurs méthodes doivent être combinées.

Précision de l'équipement : Les équipements laser et vibrants doivent être contrôlés avec une grande précision pour éviter les contraintes secondaires.

Consommation d'énergie et coût : Le traitement thermique consomme beaucoup d'énergie et doit être optimisé pour réduire les coûts.

Difficulté : La mesure précise des contraintes résiduelles nécessite un équipement et une technologie coûteux.

## 3.7 Contrôle de la qualité et essais du creuset en tungstène

Le contrôle de la qualité et les tests sont le maillon central de la production de creusets en tungstène, garantissant que leur précision dimensionnelle, leurs propriétés matérielles et leur fiabilité répondent aux normes de l'industrie. Les scénarios d'application exigeants et à forte valeur ajoutée des creusets en tungstène (par exemple, les semi-conducteurs, l'aérospatiale) nécessitent des systèmes de gestion de la qualité stricts. Cette section aborde en détail les essais de tolérance dimensionnelle et géométrique, les essais non destructifs, l'analyse de la composition chimique et de la microstructure, les essais de performance à haute température et les systèmes de certification de la qualité et de traçabilité.

### 3.7.1 Essais de tolérance dimensionnelle et géométrique

#### Principe du processus

Les essais de tolérance dimensionnelle et géométrique vérifient les dimensions géométriques (diamètre, épaisseur de paroi, hauteur) et les tolérances géométriques (circularité, parallélisme, concentricité) du creuset en tungstène à l'aide d'un équipement de mesure de précision afin de s'assurer qu'il répond aux exigences de conception. Les résultats des tests affectent directement les performances d'installation et d'utilisation du creuset.

#### Exigences en matière d'équipement :

Machine à mesurer tridimensionnelle (CMM) : Précision  $\pm 0,001$  mm, adaptée aux mesures géométriques complexes.

Télémètre laser : résolution 0,01 mm, pour une inspection dimensionnelle rapide.

Profilomètre : Mesurez la circularité et le profil de surface avec une précision de  $\pm 0,005$  mm.

Jauge de hauteur et pied à coulisse : pour une vérification dimensionnelle simple avec une précision de  $\pm 0,01$  mm.

#### Paramètres de détection

Tolérances dimensionnelles : Tolérances de diamètre et de hauteur  $\pm 0,05$  mm, tolérances d'épaisseur

de paroi  $\pm 0,02$  mm (creusets pour semi-conducteurs).

Tolérances géométriques :

Rondeur :  $\leq 0,02$  mm.

Parallélisme :  $\leq 0,01$  mm.

Concentricité :  $\leq 0,015$  mm.

Fréquence de mesure : 10 % à 20 % d'échantillonnage de chaque lot, inspection complète des applications clés.

Exigences environnementales : température  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , humidité  $< 60\%$ , pour éviter l'influence de la dilatation thermique.

### Avantages technologiques

Haute précision : les MMT et les équipements laser garantissent que l'erreur de mesure est  $< 0,01$  mm.

Efficacité : Le système de mesure automatisé peut traiter de grandes quantités de creusets.

Cohérence : Le processus d'inspection standardisé garantit la précision géométrique de chaque creuset.

### Défis techniques

Formes complexes : La mesure de creusets de forme spéciale nécessite une MMT multi-axes et le coût de l'équipement est élevé.

Effets de surface : Les surfaces de haute finition peuvent entraîner des erreurs de réflexion de mesure et nécessiter un étalonnage.

Inspection de grandes dimensions : les creusets d'un diamètre de  $> 500$  mm nécessitent un équipement spécial, ce qui augmente les coûts.

## 3.7.2 Contrôles non destructifs (échographie, rayons X, tomographie)

### Principe du processus

Le contrôle non destructif (CND) utilise des ultrasons, des rayons X ou des tomographies pour détecter les défauts (par exemple, porosité, fissures, inclusions) à l'intérieur des creusets en tungstène sans endommager leur structure. Le CND est une étape essentielle pour garantir la fiabilité du creuset.

### Exigences en matière d'équipement :

Détecteur à ultrasons : fréquence 1 à 10 MHz, diamètre de la sonde 5 à 10 mm.

Appareils d'inspection par rayons X : énergie 100 à 300 kV, adaptés aux creusets à paroi épaisse.

Scanner CT : résolution de 0,01 mm pour l'analyse 3D des défauts.

Échantillon d'étalonnage : Échantillon de tungstène avec des défauts connus pour l'étalonnage de l'équipement.

### Paramètres de détection

Ultrasonique:

Fréquence : 5 MHz (détection conventionnelle), 10 MHz (détection de haute précision).

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Couplant : eau ou gel pour assurer la transmission des ondes sonores.

Résolution du défaut :  $\geq 0,1$  mm.

Rayon X:

Temps de pose : 10 à 60 secondes, selon l'épaisseur de la paroi.

Énergie : 150 kV (épaisseur de paroi  $< 10$  mm), 250 kV (épaisseur de paroi  $> 10$  mm).

Résolution du défaut :  $\geq 0,2$  mm.

Scanner:

Épaisseur de la couche de balayage : 0,05 à 0,2 mm.

Temps de reconstruction : 5 à 20 minutes, selon la taille du creuset.

Résolution du défaut :  $\geq 0,05$  mm.

### Avantages technologiques

Haute sensibilité : les tomodensitogrammes peuvent détecter de petits défauts aussi petits que 0,05 mm.

Complet : les rayons X et la tomodensitométrie assurent une distribution tridimensionnelle des défauts, et les ultrasons conviennent au dépistage rapide.

Pas de dommages : n'affecte pas les performances et la durée de vie du creuset.

### Défis techniques

Interférence à haute densité : La haute densité du tungstène ( $19,25 \text{ g/cm}^3$ ) affaiblit la pénétration des rayons X, nécessitant un équipement à haute énergie.

Géométrie complexe : La détection de creusets de forme spéciale nécessite un balayage multi-angles, ce qui augmente la difficulté.

Coût élevé : L'équipement de tomodensitométrie et les coûts d'exploitation sont élevés, ce qui le rend adapté aux applications haut de gamme.

### 3.7.3 Analyse de la composition chimique et de la microstructure

#### Principe du processus

Analyse de la composition chimique et de la microstructure La pureté du matériau et les caractéristiques de la microstructure (telles que la taille des grains et la distribution de phase) du creuset en tungstène sont vérifiées par analyse spectroscopique et observation microscopique pour s'assurer qu'elles répondent aux exigences de l'application.

#### Exigences en matière d'équipement :

Spectromètre à fluorescence X (XRF) : détecte le contenu élémentaire avec une précision de  $\pm 0,01$  %.

Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) : Analysez les impuretés à l'état de traces avec une limite de détection de  $< 1$  ppb.

Microscopie électronique à balayage (MEB) : Observez les grains et les défauts avec une résolution de  $< 1$  nm.

Diffraction par rétrodiffusion d'électrons (EBSD) : Analysez l'orientation des grains et la structure de la phase.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Paramètres de détection

Composition chimique:

Pureté du tungstène :  $\geq 99,95$  % (conventionnel),  $\geq 99,999$  % (pour les semi-conducteurs).

Fréquence des tests : 5 % à 10 % de chaque lot.

Microstructure:

Granulométrie : 10 à 50  $\mu\text{m}$  (conventionnel), 5 à 20  $\mu\text{m}$  (haute performance).

Porosité :  $< 1$  %, analysée par images MEB.

Distribution de phase : S'assurer qu'il n'y a pas de phases anormales (par exemple des oxydes ou des carbures).

### Avantages technologiques

Haute précision : L'ICP-MS détecte les impuretés de l'ordre du ppb pour garantir une pureté ultra-élevée.

Complet : Le MEB et l'EBSD fournissent des informations complètes sur les grains, les défauts et les phases.

Assurance qualité : L'analyse chimique et structurale garantit des performances constantes du creuset.

### Défis techniques

Préparation de l'échantillon : La dureté du tungstène rend la coupe et le polissage difficiles, nécessitant des outils diamantés.

Détection de traces : La détection d'impuretés à très faible taux nécessite un équipement très sensible et un coût élevé.

Analyse complexe : Le traitement des données EBSD nécessite des logiciels et du personnel spécialisés.

### 3.7.4 Essai de performance à haute température (choc thermique, fluage, fatigue)

#### Principe du processus

L'essai de performance à haute température évalue les performances aux chocs thermiques, le comportement au fluage et la durée de vie en fatigue des creusets en tungstène en simulant les conditions d'utilisation réelles pour garantir leur fiabilité dans des environnements à haute température.

#### Exigences en matière d'équipement :

Four d'essai de choc thermique : plage de température de 25°C à 2500°C, vitesse de chauffage  $> 100^\circ\text{C/s}$ .

Essai de fluage : appliquer une contrainte constante (10 à 100 MPa) à une température de 1800°C à 2200°C.

Machine d'essai de fatigue : fréquence de charge cyclique 1 à 10 Hz, température 1000°C à 2000°C.

Équipement de test : thermomètre infrarouge, capteur de déplacement, précision  $\pm 0,01$  mm.

### Paramètres de détection

Test de choc thermique :

Différence de température : 1000°C à 2000°C (par exemple cycle 2000°C à 25°C).

Nombre de cycles : 50 à 500 cycles, selon les exigences de l'application.

Détection des fissures : pénétration au microscope ou à un colorant, longueur de la fissure < 0,1 mm.

Test de fluage :

Contrainte : 20 à 80 MPa.

Température : 1800° C à 2200° C.

Temps : 100 à 1000 heures, taux de déformation mesuré (<0,1 %).

Essai de fatigue :

Contrainte cyclique : ±50 MPa.

Température : 1000°C à 2000°C.

Nombre de cycles : 10<sup>4</sup> à 10<sup>6</sup> pour détecter les fissures de fatigue.

### Avantages technologiques

Simulation réaliste : les conditions de test sont proches de l'environnement d'utilisation réel pour garantir la fiabilité.

Optimisation des performances : les données de test guident l'amélioration des processus et augmentent la durée de vie du creuset.

Vérification de la qualité : S'assurer que les creusets répondent aux exigences strictes des industries aérospatiale et nucléaire.

### Défis techniques

Exigences élevées en matière d'équipement : l'équipement de test à haute température doit résister à 2500°C, ce qui est coûteux.

Longs cycles d'essai : les essais de fluage et de fatigue peuvent prendre des semaines, ce qui a un impact sur la productivité.

Données complexes : les données de performance à haute température doivent être analysées par des professionnels, ce qui augmente la difficulté technique.

### 3.7.5 Certification de la qualité et système de traçabilité

#### Principe du processus

Le système de certification de la qualité et de traçabilité garantit que la production, les essais et la livraison des creusets en tungstène répondent aux normes internationales et industrielles grâce à la mise en place de processus de gestion de la qualité standardisés et de mécanismes de traçabilité des produits. Le système de traçabilité enregistre des informations à chaque étape, des matières premières aux produits finis, facilitant le dépannage et l'amélioration de la qualité.

#### Équipement et outils

Système de gestion de la qualité : Une plate-forme logicielle basée sur la norme ISO 9001:2015 qui

enregistre les données de production et d'inspection.

Système de traçabilité : code-barres ou étiquette RFID qui corrèle le lot, les paramètres du processus et les résultats des tests du creuset.

Outils d'analyse de données : Logiciel de contrôle statistique des processus (SPC) pour analyser les fluctuations de qualité.

Système de documentation : archivage électronique des registres de production, des rapports d'essais et des documents de certification.

### Paramètres de mise en œuvre

Critères d'accréditation :

ISO 9001:2015 (Management de la qualité).

ISO 14001:2015 (Management environnemental).

GB/T 3459-2022 (exigences techniques pour les creusets en tungstène).

Traçabilité:

Matières premières : lot de poudre de tungstène, fournisseur, composition chimique.

Processus : frittage, usinage, paramètres de post-traitement.

Inspection : Dimension, CND, résultats des tests de performance.

Conservation des données : au moins 5 ans, plus de 10 ans pour les applications haut de gamme (ex : industrie nucléaire).

Fréquence des audits : les audits internes sont effectués tous les 6 mois et les audits externes sont effectués une fois par an.

### Avantages technologiques

Conformité : Respecter les normes internationales et nationales et améliorer la compétitivité du marché.

Transparence : Le système de traçabilité améliore la confiance des clients et facilite la localisation des problèmes.

Amélioration continue : l'analyse SPC identifie les goulets d'étranglement de la qualité et optimise les processus de production.

### Défis techniques

Gestion des données : La production à grande échelle nécessite des systèmes efficaces de stockage et de récupération des données.

Coût élevé : La mise en œuvre de systèmes de certification et de traçabilité nécessite des investissements supplémentaires.

Complexité : La traçabilité multi-liens nécessite une collaboration interdépartementale, ce qui augmente la difficulté de gestion.

### 3.7 Contrôle de la qualité et essais du creuset en tungstène

Le contrôle de la qualité et les tests sont au cœur de la garantie des performances, de la fiabilité et

de la cohérence des creusets en tungstène. En raison de l'application de creusets en tungstène dans des domaines exigeants tels que les semi-conducteurs, l'aérospatiale et l'industrie nucléaire, leur précision dimensionnelle, la pureté des matériaux, leur microstructure et leurs performances à haute température doivent répondre à des normes strictes. Ce chapitre abordera de manière exhaustive les essais de tolérance dimensionnelle et géométrique, les essais non destructifs, l'analyse de la composition chimique et de la microstructure, les essais de performance à haute température et les systèmes de certification de qualité et de traçabilité, et combinera l'expérience pratique des entreprises mondiales de produits en tungstène et les informations sur l'industrie fournies par Chinatungsten Online pour analyser en profondeur les principes, l'équipement, les paramètres, les avantages et les défis de chaque technologie d'essai.

### 3.7.1 Essais de tolérance dimensionnelle et géométrique

#### Principe du processus

Vérifiez les dimensions géométriques (diamètre, épaisseur de paroi, hauteur) et les tolérances géométriques (circularité, parallélisme, concentricité) du creuset en tungstène à l'aide d'un équipement de mesure de haute précision pour vous assurer qu'il répond aux spécifications de conception. Une géométrie précise est essentielle pour l'installation, le transfert de chaleur et les performances du creuset, en particulier dans des applications telles que la croissance de silicium monocristallin ou la fusion à haute température.

#### Exigences en matière d'équipement :

Machine à mesurer tridimensionnelle (CMM) : Équipée d'un laser ou d'une sonde de contact, la précision de mesure est de  $\pm 0,001$  mm, adaptée aux géométries complexes.

Télémètre laser : mesure sans contact avec une résolution de 0,01 mm pour une vérification dimensionnelle rapide.

Profilomètre : Mesurez la circularité, le profil de surface et la tolérance géométrique avec une précision de  $\pm 0,005$  mm.

Projecteur optique : pour la mesure bidimensionnelle de petits creusets avec un grossissement de 50 à 200x.

Jauge de hauteur et pied à coulisse numérique : utilisés pour une inspection dimensionnelle simple, la précision  $\pm 0,01$  mm.

#### Paramètres de détection

Tolérances dimensionnelles :

Diamètre et hauteur :  $\pm 0,05$  mm (applications conventionnelles),  $\pm 0,02$  mm (creusets pour semi-conducteurs).

Épaisseur de paroi :  $\pm 0,03$  mm (conventionnel),  $\pm 0,01$  mm (haute précision).

Tolérances géométriques :

Rondeur :  $\leq 0,02$  mm (régulier),  $\leq 0,01$  mm (haute précision).

Parallélisme :  $\leq 0,015$  mm.

Concentricité :  $\leq 0,01$  mm.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Fréquence de mesure : 10 % à 20 % d'échantillonnage par lot, inspection complète à 100 % pour les applications critiques telles que l'aérospatiale.

Exigences environnementales : température  $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ , humidité  $< 50\%$ , éviter la dilatation thermique ou les interférences d'humidité.

Norme d'étalonnage : Des blocs d'étalonnage certifiés ISO 10360 sont utilisés pour garantir la précision de l'équipement.

### Avantages technologiques

Haute précision : les MMT et les télémètres laser atteignent une précision inférieure au micron et répondent à des tolérances serrées.

Automatisation : Un système de mesure automatisé intégré peut traiter de grands lots de creusets pour une efficacité accrue.

Polyvalence : Les profilers et les projecteurs optiques inspectent à la fois les caractéristiques dimensionnelles et de surface.

Enregistrement des données : numérisation des résultats de mesure pour une traçabilité de qualité et une analyse statistique faciles.

### Défis techniques

Géométries complexes : Les creusets de forme spéciale ou de grande taille (diamètre  $> 500\text{ mm}$ ) nécessitent des MMT multi-axes, ce qui peut entraîner des coûts d'équipement élevés.

Réflexion de surface : Les surfaces en tungstène de haute finition peuvent provoquer des erreurs de mesure laser et le chemin optique doit être calibré.

Temps de mesure : Il faut beaucoup de temps pour inspecter complètement les grands creusets, et il est nécessaire d'équilibrer l'efficacité et la précision.

Sensibilité environnementale : Les fluctuations de température ou de vibration peuvent affecter les résultats de mesure, et un environnement de température et d'humidité constant est requis.

CTIA GROUP LTD

Tungsten Crucible Introduction

1. Overview of Tungsten Crucibles

Tungsten crucibles are essential tools in the fields of metallurgy, chemistry, and materials science. They are particularly suitable for processes that involve melting or heating substances to extremely high temperatures. Studies have shown that tungsten crucibles perform exceptionally well in applications such as sapphire crystal growth, rare earth metal melting, vacuum coating, and high-temperature furnaces.

2. Features of Tungsten Crucibles

Ultra-high melting point: Making them ideal for extreme high-temperature environments.

High purity: purity of  $\geq 99.95\%$  minimizes the impact of impurities on experiments or production processes.

Excellent corrosion resistance: Offering outstanding chemical stability.

High density and low vapor pressure: Ensuring material stability.

High strength and wear resistance: Ensuring long service life.

Low surface roughness: Reducing residue buildup and extends the crucible's lifespan.

3. Applications of Tungsten Crucibles

**Rare earth metal melting:** Performed in vacuum or inert gas environments to ensure material purity.

**Vacuum coating:** Used in thermal evaporation-deposition technology in electronics manufacturing.

**High-temperature furnaces:** Functions as a key component capable of withstanding environments below 2400°C.

**Chemical synthesis:** Suitable for handling corrosive substances such as acids and molten metals.

**Metal smelting and refining:** Used for melting and refining high-purity metals.

**Sapphire crystal growth:** Utilized for melting and holding materials like silicon, gallium arsenide, and germanium in semiconductor production at temperatures between 2000 – 2500° C.

4. Specifications of Tungsten Crucibles

Specification	Details
Material	Pure tungsten or tungsten alloy
Purity	99.95%
Diameter	20–620 mm
Height	20–500 mm
Wall Thickness	3.5–30 mm (depending on diameter)
Shape	Round, square, rectangular, stepped, or customized shapes
Surface Finish	Smooth inner and outer walls, no internal cracks

5. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten.com.cn](http://www.tungsten.com.cn)

Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### 3.7.2 Contrôles non destructifs (échographie, rayons X, tomodynamométrie)

#### Principe du processus

Le contrôle non destructif (CND) utilise des techniques d'ultrasons, de rayons X ou de tomodynamométrie (TDM) pour détecter les défauts (par exemple, la porosité, les fissures, les inclusions) à l'intérieur et à la surface des creusets en tungstène sans endommager leur structure. Les CND sont essentiels pour garantir la fiabilité et la sécurité des creusets, en particulier dans l'industrie nucléaire et les applications de semi-conducteurs.

#### Exigences en matière d'équipement :

Détecteur à ultrasons : Équipé d'une sonde haute fréquence (1 à 15 MHz), il est adapté à la détection de petites fissures.

Appareils d'inspection par rayons X : énergie 100 à 400 kV, équipés d'un système d'imagerie numérique.

Scanner CT : haute résolution (0,01 mm), prise en charge de la reconstruction 3D des défauts.

Système couplant : milieu eau ou gel pour assurer la transmission des ultrasons.

Échantillon d'étalonnage : Échantillon de tungstène avec des défauts connus (par exemple, une porosité de 0,1 mm) pour l'étalonnage de l'équipement.

#### Paramètres de détection

Contrôle par ultrasons :

Fréquence : 5 MHz (détection conventionnelle), 10 à 15 MHz (détection de haute précision).

Type de sonde : sonde longitudinale ou à ondes de cisaillement, de 5 à 10 mm de diamètre.

Résolution des défauts :  $\geq 0,1$  mm (fissure),  $\geq 0,2$  mm (porosité).

Couplant : eau ou gel, épaisseur 0,1 à 0,5 mm.

Inspection par rayons X :

Énergie : 150 kV (épaisseur de paroi  $< 10$  mm), 300 kV (épaisseur de paroi  $> 10$  mm).

Temps de pose : 10 à 60 secondes, selon l'épaisseur du creuset.

Résolution des défauts :  $\geq 0,2$  mm (porosité),  $\geq 0,1$  mm (fissure).

Scanner:

Épaisseur de la couche de balayage : 0,05 à 0,2 mm, selon la taille du creuset.

Résolution : 0,01 à 0,05 mm pour la détection de petites inclusions.

Temps de reconstruction : 5 à 30 minutes pour générer un modèle de défaut 3D.

#### Avantages technologiques

Haute sensibilité : les tomodynamogrammes peuvent détecter de minuscules défauts aussi petits que 0,05 mm, et l'échographie convient à un dépistage rapide.

Exhaustivité : Les rayons X et la tomodynamométrie fournissent une distribution tridimensionnelle des défauts internes, révélant des problèmes cachés.

Non destructif : n'affecte pas les performances et la durée de vie du creuset.

Visualisation des données : Le modèle 3D généré par CT facilite l'analyse des défauts et

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

l'amélioration des processus.

### Défis techniques

Interférence à haute densité : La haute densité du tungstène ( $19,25 \text{ g/cm}^3$ ) affaiblit la pénétration des rayons X, nécessitant un équipement à haute énergie.

Géométrie complexe : Les creusets de forme spéciale doivent être balayés sous plusieurs angles, ce qui augmente le temps de détection et la complexité.

Coût élevé : L'équipement de tomodensitométrie a des coûts d'investissement et d'exploitation élevés, ce qui le rend adapté aux applications haut de gamme.

Technique de fonctionnement : Le CND exige une utilisation professionnelle et des exigences élevées en matière d'interprétation des données.

### 3.7.3 Analyse de la composition chimique et de la microstructure

#### Principe du processus

Analyse de la composition chimique et de la microstructure La pureté du matériau, la teneur en impuretés et les propriétés de la microstructure (par exemple, taille des grains, distribution de phase, porosité) des creusets en tungstène sont vérifiées par des techniques d'analyse spectroscopique, d'observation microscopique et de diffraction. Ces analyses permettent de s'assurer que la stabilité chimique et les propriétés mécaniques du creuset répondent aux exigences de l'application.

#### Exigences en matière d'équipement :

Spectromètre à fluorescence X (XRF) : détecte les principaux éléments et impuretés avec une précision de  $\pm 0,01 \%$ .

Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) : Les impuretés à l'état de traces sont analysées avec une limite de détection de  $< 0,1 \text{ ppb}$ .

Microscopie électronique à balayage (MEB) : Observez les grains, les pores et les défauts avec une résolution de  $< 1 \text{ nm}$ .

Diffractomètre à rétrodiffusion d'électrons (EBSD) : Analyse l'orientation des grains et la structure de phase avec une précision de  $\pm 0,1^\circ$ .

Microscopie électronique à transmission (MET) : Analysez des structures à l'échelle nanométrique avec une résolution  $< 0,1 \text{ nm}$ .

#### Paramètres de détection

Composition chimique:

Pureté du tungstène :  $\geq 99,95 \%$  (conventionnel),  $\geq 99,999 \%$  (industrie des semi-conducteurs ou nucléaire).

Éléments impurés : C, O, N, Fe, Ni, Mo, etc., teneur  $< 50 \text{ ppm}$  (conventionnel),  $< 10 \text{ ppm}$  (haute pureté).

Fréquence des tests : 5 % à 10 % d'échantillonnage par lot, inspection complète des applications clés.

Microstructure:

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Granulométrie : 10 à 50  $\mu\text{m}$  (conventionnel), 5 à 20  $\mu\text{m}$  (haute performance).  
Porosité : <1 % (analyse d'images MEB), <0,5 % (applications haut de gamme).  
Distribution de phase : pas de phases anormales (par exemple, oxydes, carbures), vérifiée par XRD.  
Caractéristiques des joints de grains : EBSD analyse les angles des joints de grains pour optimiser la résistance aux fissures.

### Avantages technologiques

Ultra-haute précision : l'ICP-MS détecte les impuretés dans la plage du ppb pour garantir la pureté du matériau.

Analyse complète : le MEB et l'EBSD fournissent des informations complètes sur les grains, les défauts et les phases.

Prédiction des performances : les données de la microstructure guident l'optimisation des performances à haute température.

Assurance qualité : Assurer la cohérence chimique et structurale de chaque lot de creusets.

### Défis techniques

Préparation de l'échantillon : La dureté du tungstène rend la coupe, le polissage et l'amincissement difficiles, nécessitant des outils diamantés et un amincissement ionique.

Détection de traces : L'analyse à très faible teneur en impuretés nécessite un équipement très sensible et des coûts d'exploitation élevés.

Données complexes : Les données EBSD et TEM nécessitent des logiciels et du personnel professionnels pour être interprétées.

Chronophage : L'analyse de haute précision (p. ex., TEM) prend beaucoup de temps, ce qui affecte l'efficacité de la production.

### 3.7.4 Essai de performance à haute température (choc thermique, fluage, fatigue)

#### Principe du processus

L'essai de performance à haute température évalue les performances aux chocs thermiques, le comportement au fluage et la durée de vie en fatigue des creusets en tungstène en simulant des conditions d'utilisation réelles (par exemple, cyclage à haute température, contrainte à long terme). Ces tests garantissent la fiabilité et la durabilité du creuset dans des environnements extrêmes tels que au-dessus de 2000°C.

#### Exigences en matière d'équipement :

Four d'essai de choc thermique : plage de température de 25°C à 2600°C, vitesse de chauffage > 100°C/s, équipé d'un système de refroidissement rapide.

Testeur de fluage : appliquer une contrainte constante (10 à 100 MPa), une température de 1800°C à 2300°C, une précision de déplacement  $\pm 0,001\text{mm}$ .

Machine d'essai de fatigue : fréquence de charge cyclique 1 à 20 Hz, température 1000°C à 2200°C, précision de force  $\pm 0,1\text{N}$ .

Matériel d'essai : thermomètre infrarouge (précision  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ ), capteur de déplacement laser (précision

± 0,01 mm), microscope (analyse des fissures).

### Paramètres de détection

Test de choc thermique :

Différence de température : 1000°C à 2000°C (par exemple cycle rapide de 2000°C à 25°C).

Nombre de cycles : 50 à 1000 cycles, selon les exigences de l'application.

Détection de fissures : microscope optique ou pénétration de colorant, la longueur de fissure <0,1 mm est qualifiée.

Environnement : Vide ou gaz inerte (argon, teneur en oxygène < 5 ppm).

Test de fluage :

Contrainte : 20 à 100 MPa, charge réelle simulée.

Température : 1800°C à 2300°C, proche des conditions d'utilisation.

Temps : 100 à 2000 heures, taux de déformation mesuré (<0,1 % est qualifié).

Atmosphère : vide ou argon pour éviter l'oxydation.

Essai de fatigue :

Contrainte cyclique : ±50 à ±200 MPa, simule la charge cyclique thermique.

Température : 1000°C à 2200°C.

Nombre de cycles : 10<sup>4</sup> à 10<sup>7</sup> fois, détection de fissure de fatigue (<0,05mm est qualifié).

Fréquence : 5 à 10 Hz, équilibrant efficacité et précision.

### Avantages technologiques

Simulation réaliste : les conditions de test sont proches de l'environnement d'utilisation réel et prédisent la durée de vie du creuset.

Optimisation des performances : les données de test guident les améliorations du processus pour améliorer la résistance aux chocs thermiques et au fluage.

Vérification de la fiabilité : S'assurer que le creuset répond aux exigences strictes des industries aérospatiale et nucléaire.

Prise en charge des données : Fournir des indicateurs quantitatifs (tels que le taux de fluage, la durée de vie en fatigue) pour faciliter l'évaluation par le client.

### Défis techniques

Exigences élevées en matière d'équipement : L'équipement de test à haute température doit résister à 2600 °C et les coûts de fabrication et de maintenance sont élevés.

Longs cycles d'essai : les essais de fluage et de fatigue peuvent prendre des semaines, voire des mois, ce qui a un impact sur la productivité.

Contrôle de l'environnement : Le vide à haute température ou les atmosphères inertes doivent être strictement gérés pour éviter l'oxydation ou la pollution.

Interprétation des données : Les données de test complexes doivent être analysées par un professionnel, ce qui augmente la difficulté technique.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### 3.7.5 Certification de la qualité et système de traçabilité

#### Principe du processus

Le système de certification de la qualité et de traçabilité garantit que la production, les tests et la livraison des creusets en tungstène sont conformes aux normes internationales et industrielles (telles que ISO 9001, GB/T 3459-2022) en établissant un processus de gestion de la qualité standardisé et un mécanisme de traçabilité des produits. Le système de traçabilité enregistre les informations à chaque étape du processus, des matières premières aux produits finis, pour faciliter le dépannage, améliorer la qualité et la confiance des clients.

#### Équipement et outils

Système de gestion de la qualité : Une plateforme numérique basée sur la norme ISO 9001:2015 qui enregistre les données de production, d'inspection et de livraison.

Système de traçabilité : code-barres, code QR ou étiquette RFID avec lot, paramètres de processus et résultats d'essai du creuset.

Outils d'analyse de données : Logiciel de contrôle statistique des processus (SPC) pour analyser les fluctuations de qualité et les tendances des défauts.

Système de documentation : archivage électronique des registres de production, des rapports d'essais, des documents de certification et des retours clients.

Technologie blockchain : Certaines entreprises utilisent la blockchain pour s'assurer que les données ne peuvent pas être falsifiées et améliorer la crédibilité de la traçabilité.

#### Paramètres de mise en œuvre

Critères d'accréditation :

ISO 9001:2015 (Système de gestion de la qualité).

ISO 14001:2015 (Système de management environnemental).

GB/T 3459-2022 (exigences techniques pour les creusets en tungstène).

ASTM B760-07 (spécification standard pour les produits en tungstène).

Traçabilité:

Matières premières : lot de poudre de tungstène, fournisseur, composition chimique, distribution de la taille des particules.

Paramètres du processus : température de frittage, tolérances d'usinage, conditions de post-traitement.

Résultats des tests : taille, contrôles non destructifs, composition chimique, performances à haute température.

Informations de livraison : nom du client, date de livraison, numéro de lot.

Conservation des données : 5 ans pour les applications courantes et plus de 10 ans pour les applications haut de gamme (comme l'industrie nucléaire).

Fréquence des audits : audit interne tous les 6 mois, audit externe une fois par an, examen de certification par un tiers tous les 3 ans.

#### Avantages technologiques

##### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés 电话/TEL :0086 592 512 9696  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版 CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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

Conformité : Respecter les normes internationales et nationales et améliorer la compétitivité du marché.

Transparence : La traçabilité de l'ensemble du processus renforce la confiance des clients et facilite la localisation rapide des problèmes de qualité.

Amélioration continue : l'analyse SPC identifie les goulets d'étranglement des processus et optimise l'efficacité et la qualité de la production.

Gestion numérique : les systèmes électroniques réduisent les erreurs manuelles et améliorent la fiabilité des données.

### Défis techniques

Gestion des données : La production à grande échelle nécessite des systèmes efficaces de stockage, de récupération et d'analyse des données.

Coûts de mise en œuvre : Les systèmes de certification, de traçabilité et de numérisation sont coûteux à investir et à entretenir.

Collaboration interdépartementale : la traçabilité doit couvrir la chaîne d'approvisionnement, la production et l'inspection, et la gestion est complexe.

Sécurité des données : Il est nécessaire d'empêcher les fuites ou la falsification des données, et il est difficile de mettre en œuvre la technologie blockchain.

## 3.8 Technologie de fabrication avancée du creuset en tungstène

Avec l'essor de l'industrie 4.0 et de la fabrication intelligente, la technologie de fabrication des creusets en tungstène se développe dans le sens d'une haute précision, d'une efficacité élevée et d'une durabilité. Les technologies de fabrication avancées ont considérablement amélioré les performances, la productivité et les capacités de personnalisation des creusets grâce à l'introduction de la fabrication additive, du traitement laser, de la micro-nanofabrication et des systèmes de fabrication intelligents. Ce chapitre abordera en profondeur la fabrication additive (impression 3D), la fusion laser et la pulvérisation plasma, la technologie de micro-nanofabrication, la fabrication intelligente et les applications de l'industrie 4.0, combinées à la pratique des entreprises mondiales de produits en tungstène et aux informations sur l'industrie de Chinatungsten Online, et analysera de manière exhaustive les principes, l'équipement, les paramètres, les avantages et les défis de ces technologies.

### 3.8.1 Fabrication additive (creuset en tungstène imprimé en 3D)

#### Principe du processus

La fabrication additive (impression 3D) permet de construire directement des creusets en tungstène aux géométries complexes en déposant couche par couche des matériaux en poudre de tungstène ou en alliage de tungstène. Contrairement à la métallurgie et à l'usinage traditionnels des poudres, l'impression 3D ne nécessite pas de moules et permet de prototypage rapide de structures complexes telles que des raidisseurs de cavités ou des conceptions poreuses. Les techniques courantes comprennent la fusion sélective par laser (SLM), la fusion par faisceau d'électrons (EBM) et le jet de liant.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Exigences en matière d'équipement :

Équipement SLM : laser à fibre de haute puissance (500 W à 2 kW) avec une chambre protégée sous gaz inerte.

Équipement EBM : puissance du faisceau d'électrons 3 à 6 kW, environnement sous vide (jusqu'à  $10^{-4}$  Pa).

Matériel d'injection de liant : buse de haute précision (résolution  $\leq 50 \mu\text{m}$ ) équipée d'un four de frittage.

Système de manipulation des poudres : système de tamisage et de récupération pour assurer une taille uniforme des particules de poudre (10 à  $50 \mu\text{m}$ ).

Équipement d'inspection : scanner CT (pour détecter les défauts internes), profilleur laser (pour vérifier la précision géométrique).

### Paramètres du processus

Au-dessus du niveau de la mer :

Puissance laser : 500 à 1000 W.

Vitesse de balayage : 0,5 à 2 m/s.

Épaisseur de la couche : 20 à  $50 \mu\text{m}$ .

Atmosphère : Argon, teneur en oxygène  $< 100$  ppm.

EBM :

Puissance du faisceau d'électrons : 3 à 5 kW.

Vitesse de balayage : 1 à 5 m/s.

Épaisseur de couche : 50 à  $100 \mu\text{m}$ .

Vide :  $10^{-4}$  à  $10^{-5}$  Pa.

Jet de liant :

Taux d'injection de liant : 10 à 50 pL/goutte.

Température de frittage :  $1800^{\circ}\text{C}$  à  $2200^{\circ}\text{C}$ .

Temps de frittage : 4 à 8 heures.

Atmosphère : Vide ou hydrogène.

### Avantages technologiques

Géométries complexes : Il est possible de fabriquer des creusets de forme spéciale difficiles à réaliser avec des procédés conventionnels (par exemple, des canaux de refroidissement intégrés).

Efficacité des matériaux : Taux de récupération de la poudre  $>95\%$ , réduisant les déchets de matières premières.

Prototypage rapide : Il ne faut que quelques jours entre la conception et le produit fini, ce qui convient à la personnalisation à faible volume.

Optimisation des performances : la conception des matériaux à gradient peut améliorer les propriétés locales (par exemple, la résistance à la corrosion de la paroi intérieure).

### Défis techniques

Densité : La densité des creusets imprimés en 3D ( $<99\%$ ) est légèrement inférieure à celle du

frittage traditionnel et doit être optimisée pour le post-traitement.

Qualité de surface : La rugosité de la surface imprimée (Ra 5 à 20  $\mu\text{m}$ ) doit être usinée ou polie.

Coût de l'équipement : Les équipements SLM et EBM ont des investissements élevés et des coûts d'exploitation élevés.

Exigences en poudre : une poudre de tungstène sphérique ultra-fine (<20 $\mu\text{m}$ ) est nécessaire, ce qui augmente le coût du matériau.

### 3.8.2 Fusion laser et pulvérisation plasma

#### Principe du processus

La fusion au laser et la pulvérisation plasma utilisent une source de chaleur à haute énergie pour déposer des revêtements fonctionnels à la surface des creusets en tungstène ou réparer les défauts locaux, améliorant ainsi leur résistance à l'abrasion, à l'oxydation et à la corrosion. La fusion laser utilise un faisceau laser pour faire fondre la poudre de tungstène ou la poudre d'alliage pour former un revêtement ; La pulvérisation au plasma pulvérise la poudre sur la surface à travers un arc plasma, créant ainsi un revêtement épais.

#### Exigences en matière d'équipement :

Équipement de fusion laser : lasers à fibre (1 à 10 kW) avec un étage de mouvement à cinq axes.

Équipement de pulvérisation plasma : Canon à plasma (puissance 40 à 100 kW) avec système d'alimentation en poudre.

Système de manipulation des poudres : équipement de tamisage et de séchage, pour garantir que la taille des particules de poudre est de 10 à 100  $\mu\text{m}$ .

Matériel d'essai : jauge d'épaisseur de revêtement (précision  $\pm 1\mu\text{m}$ ), testeur de rayures (test d'adhérence).

Contrôle de l'atmosphère : Chambre à gaz inerte (argon ou hélium) avec une teneur en oxygène < 50 ppm.

#### Paramètres du processus

Fusion laser :

Puissance laser : 2 à 5 kW.

Vitesse de balayage : 0,5 à 2 m/min.

Alimentation en poudre : 5 à 20 g/min.

Épaisseur du revêtement : 50 à 500  $\mu\text{m}$ .

Atmosphère : Argon, teneur en oxygène < 100 ppm.

Pulvérisation plasma :

Puissance plasma : 50 à 80 kW.

Distance de pulvérisation : 100 à 200 mm.

Débit en poudre : 20 à 50 g/min.

Épaisseur du revêtement : 100 à 1000  $\mu\text{m}$ .

Débit de gaz : argon 50 L/min, hydrogène 5 L/min.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Avantages technologiques

Revêtements haute performance : les revêtements SiC ou WC formés par fusion laser ont une dureté de HV 2500 et les revêtements MoSi<sub>2</sub> pulvérisés au plasma ont une excellente résistance à l'oxydation.

Réparation locale : Réparation précise des zones usées ou fissurées pour prolonger la durée de vie du creuset.

Flexibilité : Convient à une large gamme de matériaux de revêtement (par exemple alliage de tungstène, céramique).

Processus rapide : le temps de dépôt d'un revêtement monocouche est de <1 heure, ce qui convient à la production à grande échelle.

### Défis techniques

Adhérence : La différence de coefficient de dilatation thermique entre le revêtement et le substrat de tungstène peut entraîner un écaillage, et l'interface doit être optimisée.

Stress thermique : Les sources de chaleur à haute énergie peuvent provoquer des micro-fissures dans le substrat, et l'apport de chaleur doit être contrôlé.

Rugosité de surface : Revêtement par projection plasma Ra > 10µm, un traitement secondaire est nécessaire.

Coût élevé : L'investissement dans les équipements laser et plasma est important, les matériaux en poudre sont chers.

## 3.8.3 Technologie de microfabrication

### Principe du processus

La microfabrication utilise le micro-usinage laser, la gravure par faisceau d'ions ou le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) pour fabriquer des structures de taille microscopique (1 à 100 µm) ou nanométrique (<1 µm) à la surface des creusets en tungstène, telles que des microvias, des microrainures ou des nanorevêtements. Ces structures améliorent le rayonnement thermique, la mouillabilité ou les propriétés antisalissure des creusets, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications optiques et semi-conductrices.

### Exigences en matière d'équipement :

Lasers femtosecondes : largeur d'impulsion < 500 fs, puissance 1 à 5 kW, pour le micro-usinage.

Dispositifs à faisceau d'ions focalisés (FIB) : Énergie ionique 10 à 50 keV, résolution < 10 nm.

Équipement CVD : système CVD basse température (400°C à 800°C) pour le dépôt de nanorevêtements.

Matériel de détection : Microscope à force atomique (AFM, résolution < 0,1 nm), MEB (observation de micro-nano structures).

Salle blanche : Classe ISO 5 (classe 100) pour éviter la contamination particulaire.

### Paramètres du processus

Micro-usinage laser femtoseconde :

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Largeur d'impulsion : 100 à 500 fs.  
Puissance : 1 à 3 kW.  
Vitesse de balayage : 0,1 à 1 m/s.  
Taille des caractéristiques : 1 à 50  $\mu\text{m}$  (microsillon ou micropuits).

Gravure par faisceau d'ions :  
Énergie ionique : 20 à 40 keV.  
Densité du faisceau : 0,1 à 1 A/cm<sup>2</sup> .  
Profondeur de gravure : 0,1 à 10  $\mu\text{m}$ .  
Vide : inférieur à 10<sup>-6</sup> Pa.  
Revêtement Nano CVD :  
Température : 400° C à 600° C.  
Précurseur : SiH<sub>4</sub> (revêtement SiC) ou WF<sub>6</sub> (revêtement à base de tungstène).  
Épaisseur du revêtement : 10 à 100 nm.  
Atmosphère : basse pression (10<sup>-1</sup> Pa).

#### Avantages technologiques

Améliorations : La structure microporeuse améliore l'efficacité du rayonnement thermique et le nano-revêtement améliore les performances anti-salissure.

Haute précision : le laser femtoseconde et FIB peuvent atteindre une précision d'usinage inférieure au micron.

Personnalisation : Des microstructures spécifiques (par exemple, des réflecteurs optiques) peuvent être conçues en fonction des exigences de l'application.

#### Défis techniques

Efficacité de traitement : La vitesse de traitement des micro-nano est lente, adaptée aux applications de petite surface ou à forte valeur ajoutée.

Coût de l'équipement : Le laser femtoseconde et l'équipement FIB nécessitent un investissement élevé et une maintenance complexe.

Dommages de surface : La gravure par faisceau d'ions peut introduire des défauts cristallins qui nécessitent un post-traitement.

Exigences de propreté : Le micro-nano-traitement nécessite un environnement ultra-propre, ce qui augmente les coûts d'exploitation.

### 3.8.4 Applications de la fabrication intelligente et de l'industrie 4.0

#### Principe du processus

La fabrication intelligente et l'industrie 4.0 optimisent le processus de production des creusets en tungstène grâce à l'Internet des objets (IoT), à l'intelligence artificielle (IA), à l'analyse du big data et à la technologie d'automatisation, et réalisent la gestion numérique de l'ensemble de la chaîne, de la conception à la livraison. Ces technologies améliorent la productivité, l'uniformité de la qualité et le contrôle des processus, tout en réduisant la consommation d'énergie et les taux de rebut.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

## Équipement et outils

Système Internet des objets : capteurs (température, pression, déplacement) et plateforme Internet industrielle pour collecter les données de production en temps réel.

Système d'IA : Modèles d'apprentissage automatique pour optimiser les paramètres de processus et prédire les pannes d'équipement.

Équipement d'automatisation : robot à six axes (pour la manutention, l'usinage), système de chargement et de déchargement automatique.

Plateforme de jumeau numérique : simulez le processus de production du creuset et optimisez la conception et le processus.

Outils d'analyse Big Data : systèmes d'analyse basés sur Hadoop ou Spark qui traitent des téraoctets de données de production.

## Paramètres de mise en œuvre

Internet des objets :

Nombre de capteurs : 10 à 50 par appareil, fréquence d'échantillonnage de 1 Hz à 1 kHz.

Transmission de données : 5G ou Ethernet industriel avec une latence de < 10 ms.

Stockage des données : Stockage en nuage, d'une capacité de > 1 Po, stocké pendant plus de 5 ans.

Optimisation de l'IA :

Type de modèle : Réseau de neurones profonds (DNN) ou Apprentissage par renforcement (RL).

Données d'entraînement : >10<sup>5</sup> enregistrements de processus, couvrant la température, la pression, le taux de défauts.

Objectif d'optimisation : < taux de rebut de 0,5 % et réduction de 10 % de la consommation d'énergie.

Automatisation:

Précision du robot : ±0,01 mm (manutention), ±0,05 mm (usinage).

Temps de cycle : 5 à 10 minutes par creuset.

Taux d'automatisation : >80 % (processus clés).

Jumeau numérique :

Précision de la simulation : erreur géométrique <0,1 mm, erreur de performance <5 %.

Fréquence de mise à jour : en temps réel (<1 seconde) ou par lots (toutes les heures).

Gamme de simulation : du pressage de la poudre au post-traitement.

## Avantages technologiques

Production efficace : L'automatisation et l'optimisation de l'IA augmentent l'efficacité de la production de 20 à 30 %.

Qualité constante : l'IoT et l'analyse du big data ont permis de réduire le taux de rebut à moins de 0,3 %.

Maintenance prédictive : l'IA prédit les pannes d'équipement et réduit les temps d'arrêt de 80 %.

Personnalisation flexible : le jumeau numérique prend en charge l'itération rapide de la conception pour répondre aux besoins individuels des clients.

### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Défis techniques

Intégration technologique : l'IoT, l'IA et l'automatisation doivent être intégrés de manière transparente et les systèmes sont complexes.

Sécurité des données : les données de production doivent être protégées contre les fuites, et un cryptage et un contrôle d'accès avancés sont nécessaires.

Coût de mise en œuvre : L'investissement dans le système de fabrication intelligent est important et il est difficile pour les petites et moyennes entreprises de le supporter.

Formation du personnel : Il est nécessaire de cultiver des talents interdisciplinaires qui maîtrisent l'IA et les technologies de l'industrie 4.0.



CTIA GROUP Ltd Creuset en tungstène

### Chapitre 4 : Production de creusets en tungstène : technologie et innovation

La technologie de production du creuset en tungstène se développe rapidement dans le sens de l'automatisation, de l'intelligence, de l'écologie et de la haute performance pour répondre aux besoins stricts des semi-conducteurs, de l'aérospatiale, de l'industrie nucléaire et d'autres domaines. Ce chapitre discutera en profondeur de l'automatisation et de la production intelligente, des technologies d'économie d'énergie et de protection de l'environnement, de l'économie circulaire et de la gestion des ressources du creuset de tungstène, ainsi que de l'exploration des technologies de pointe, combinée à l'expérience pratique des entreprises mondiales de produits en tungstène et aux informations sur l'industrie fournies par Chinatungsten Online, et analysera de manière exhaustive les principes, l'équipement, les paramètres, Avantages et défis de ces technologies.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

#### 4.1 Automatisation du creuset en tungstène et production intelligente

L'automatisation et la production intelligente ont considérablement amélioré l'efficacité de la production, la cohérence de la qualité et la contrôlabilité des processus des creusets en tungstène grâce à l'introduction de l'usinage CNC, de la robotique, de l'Internet des objets (IoT), de l'intelligence artificielle (IA) et de la prise de décision basée sur les données. Ces technologies sont au cœur de l'industrie 4.0 dans l'industrie des produits en tungstène.

##### 4.1.1 Usinage CNC et automatisation robotisée

###### Principe du processus

L'usinage à commande numérique (CNC) utilise des machines-outils de haute précision contrôlées par ordinateur pour tourner, fraiser, percer et meuler des creusets en tungstène afin d'assurer la précision géométrique et la qualité de surface. L'automatisation robotique automatise la manutention, le chargement et le déchargement des pièces, l'assistance au traitement et l'inspection à l'aide de robots à six axes ou de robots collaboratifs (Cobots), réduisant ainsi les interventions manuelles et améliorant l'efficacité de la production.

###### Exigences en matière d'équipement :

Machines CNC : centres d'usinage 5 ou 7 axes avec outils diamantés ou en nitrure de bore cubique (CBN), vitesses de broche de 5 000 à 20 000 tr/min et précision de positionnement  $\pm 0,001$  mm.

Système robotique : Robot à six axes (charge de 5 à 50 kg) avec système de reconnaissance visuelle (résolution  $< 0,1$  mm) et capteurs de contrôle de force (précision  $\pm 0,1$  N).

Ligne d'assemblage automatisée : système de chargement et de déchargement intégré, bande transporteuse et fixation, temps de cycle de 5 à 15 secondes par pièce.

Équipement de test : télémètre laser (précision  $\pm 0,01$  mm) et machine à mesurer tridimensionnelle (CMM, précision  $\pm 0,001$  mm).

###### Paramètres du processus

Usinage CNC :

Vitesse de coupe : 10 à 50 m/min (la dureté élevée du tungstène nécessite un couple élevé à basse vitesse).

Avance : 0,02 à 0,2 mm/tr.

Profondeur de coupe : 0,1 à 0,5 mm pour éviter les micro-fissures.

Liquide de refroidissement : fluide à base d'huile haute pression avec un débit de 20 à 40 L/min.

###### Automatisation robotique :

Vitesse de manutention : 0,5 à 2 m/s, précision  $\pm 0,05$  mm.

Reconnaissance visuelle : Le temps de traitement est  $< 0,1$  seconde et le taux de reconnaissance  $> 99,5$  %.

Force de serrage : 50 à 500 N, adaptée à différentes tailles de creusets.

Taux d'automatisation : 90 %  $>$  les processus clés.

###### Avantages technologiques

###### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Haute précision : L'usinage CNC contrôle la tolérance dimensionnelle à  $\pm 0,01$  mm, ce qui répond aux exigences de l'industrie des semi-conducteurs.

Efficacité : L'automatisation robotisée réduit les temps de cycle de 30 à 50 %.

Cohérence : L'automatisation réduit les erreurs humaines et augmente la cohérence des lots à 99,8 %.

Sécurité : Les robots remplacent les processus dangereux (tels que la manutention à haute température) et réduisent les risques professionnels.

### Défis techniques

Coût de l'équipement : L'investissement dans les systèmes CNC et robotisés à cinq axes est élevé, ce qui est difficile à payer pour les petites et moyennes entreprises.

Programmation complexe : les CNC et les robots doivent être personnalisés pour augmenter le temps de développement.

Difficulté de maintenance : Les équipements de haute précision doivent être calibrés et entretenus régulièrement, et les exigences techniques sont élevées.

Adaptabilité : Conception complexe de montages automatisés pour creusets de petite taille ou de forme spéciale.

## 4.1.2 Numérisation des lignes de production et intégration de l'Internet des objets

### Principe du processus

La ligne de production numérique connecte les équipements, les capteurs et les systèmes de gestion via la technologie IoT pour collecter et analyser les données de production (telles que la température, la pression et la taille) en temps réel afin de surveiller et d'optimiser l'ensemble du processus. L'intégration IoT permet la connectivité des appareils, le partage de données et la gestion à distance pour améliorer la transparence et le contrôle de la production.

### Exigences en matière d'équipement :

Capteurs IoT : capteurs de température (précision  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ), de pression ( $\pm 0,1$  kPa), de déplacement ( $\pm 0,01$  mm), fréquence d'échantillonnage de 1 Hz à 10 kHz.

Plate-forme Internet industrielle : prise en charge de la 5G ou de l'Ethernet industriel, délai de transmission des données  $< 5$  ms.

Appareils Edge Computing : traitez des données en temps réel avec  $> 10$  TFLOPS de puissance de calcul.

Système de stockage des données : serveur cloud ou local, capacité  $> 1$  Po, conservation des données  $> 5$  ans.

Système de visualisation : tableau de bord de surveillance en temps réel, résolution 4K, prise en charge de l'accès multi-terminaux.

### Paramètres du processus

Déploiement des capteurs : 10 à 50 capteurs par machine, couvrant les processus de frittage, d'usinage et d'inspection.

Acquisition des données : Fréquence d'échantillonnage 1 à 100 Hz (conventionnelle), 1 kHz (procédé hautement dynamique).

Taux de transmission :  $> 100$  Mbps pour garantir des performances en temps réel.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Traitement des données : la latence de l'edge computing < de 10 ms et le cycle d'analyse du cloud < de 1 minute.

Fiabilité du système : Le taux en ligne de l'équipement est de > 99,9 % et l'intégrité des données > de 99,99 %.

#### Avantages technologiques

Surveillance en temps réel : l'ensemble des données du processus est collecté et le temps de détection des anomalies est de <1 seconde.

Gestion transparente : L'état de la production est visualisé en temps réel, et les managers peuvent prendre des décisions à distance.

Amélioration de l'efficacité : l'Internet des objets optimise la planification des ressources et augmente l'efficacité de la production de 20 à 30 %.

Traçabilité de la qualité : l'enregistrement des données permet la traçabilité des défauts et le temps de positionnement est raccourci de 70 %.

#### Défis techniques

Sécurité des données : un cryptage avancé (tel que AES-256) et un contrôle d'accès sont nécessaires pour éviter les fuites.

Intégration du système : le protocole d'appareil multimarque n'est pas unifié et nécessite des interfaces personnalisées.

Dépendance au réseau : les pannes 5G ou Ethernet peuvent affecter les performances en temps réel.

Coûts de mise en œuvre : les déploiements de capteurs et de plates-formes cloud nécessitent un investissement initial élevé.

### 4.1.3 Application de l'intelligence artificielle dans l'optimisation des processus

#### Principe du processus

L'intelligence artificielle (IA) analyse les données de production par le biais de l'apprentissage automatique (ML), de l'apprentissage profond (DL) et de l'apprentissage par renforcement (RL) pour optimiser les paramètres de processus, prédire les défaillances des équipements et améliorer le contrôle de la qualité. L'IA identifie la meilleure combinaison de variables clés telles que la température de frittage, les tolérances d'usinage, etc., réduisant ainsi le coût des essais et des erreurs.

#### Exigences en matière d'équipement :

Plateforme de calcul IA : cluster GPU (puissance de calcul > 100 TFLOPS) ou TPU pour exécuter des modèles ML/DL.

Système d'acquisition de données : capteur haute fréquence (au-dessus de 1 kHz) permettant de collecter des données telles que la température, la pression, le taux de défauts, etc.

Outils de développement de modèles : TensorFlow, PyTorch ou AutoML, qui prend en charge l'itération rapide.

Interface d'interaction homme-machine : prise en charge de la recommandation de paramètres de processus et de l'alarme anormale, et le temps de réponse est de < 0,5 seconde.

Stockage des données : prise en charge des enregistrements de processus >10<sup>5</sup>, durée de

conservation > 5 ans.

### Paramètres du processus

Types de modèles : Réseau de neurones convolutifs (CNN, analyse d'images), réseaux de neurones récurrents (RNN, séries chronologiques), apprentissage par renforcement (optimisation des processus).

Données d'entraînement : enregistrements >10<sup>6</sup>, couvrant le frittage, le traitement, les tests et d'autres processus.

Objectifs d'optimisation :

Taux de rebut : <0,3 %.

Consommation d'énergie : réduction de 10 % à 20 %.

Efficacité de la production : augmentation de 15 % à 25 %.

Précision de la prédiction : le taux de prédiction des défauts est de >95 % et l'erreur d'optimisation des paramètres est de <1 %.

Fréquence de mise à jour : Le modèle est mis à jour chaque semaine ou chaque mois pour s'adapter aux nouvelles données.

### Avantages technologiques

Optimisation du processus : l'IA recommande la température de frittage et les paramètres de traitement optimaux, et le taux de rebut est réduit à 0,2 %.

Maintenance prédictive : la prédiction des pannes d'équipement réduit les temps d'arrêt jusqu'à 80 %.

Contrôle adaptatif : ajustez le processus en temps réel en réponse aux changements des matières premières ou de l'environnement.

Économies de coûts : optimisez la consommation d'énergie et l'utilisation des matériaux, ce qui réduit les coûts de production de 10 à 15 %.

### Défis techniques

Qualité des données : des données multidimensionnelles de haute qualité sont nécessaires et le coût de collecte est élevé.

Modèles complexes : l'entraînement des modèles DL nécessite beaucoup de puissance de calcul et de temps.

Interprétabilité : Les paramètres recommandés par l'IA doivent être vérifiés par les ingénieurs pour garantir leur fiabilité.

Obstacles techniques : Le développement de l'IA nécessite des équipes interdisciplinaires, ce qui rend difficile la mise en œuvre par les PME.

## 4.1.4 Décisions de fabrication fondées sur les données

### Principe du processus

La prise de décision de fabrication basée sur les données utilise l'analyse du Big Data et le contrôle statistique des processus (SPC) pour analyser les données de production (par exemple, la taille, le taux de défauts, la consommation d'énergie) à partir des données de production en temps réel afin de guider l'amélioration des processus, l'allocation des ressources et la gestion de la qualité. Ces

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

décisions augmentent la productivité, réduisent les coûts et garantissent la qualité des produits.

### Exigences en matière d'équipement :

Plateforme Big Data : Basée sur Hadoop ou Spark, elle traite des téraoctets de données avec un temps d'analyse de < 1 heure.

Logiciel SPC : Minitab ou JMP, analyse des fluctuations de qualité, précision des cartes de contrôle  $\pm 0,01$  %.

Outils de visualisation de données : Tableau ou Power BI pour générer des rapports en temps réel et des cartes de contrôle.

Système de cloud computing : AWS ou Azure, qui prend en charge le stockage de données au niveau du pétaoctet et le calcul parallèle.

Système d'aide à la décision (DSS) : intègre l'IA et le SPC pour fournir des recommandations de prise de décision automatisées.

### Paramètres du processus

Types de données : tolérances dimensionnelles, taux de défauts, consommation d'énergie, état de fonctionnement de l'équipement, caractéristiques des matières premières.

Fréquence : en temps réel (<1 seconde) ou par lots (toutes les heures ou tous les jours).

Limite de contrôle : limites supérieure et inférieure du SPC (par exemple,  $\pm 3\sigma$ ), taux de défaut < 0,5 %.

Types de rapports : graphique de Pareto, graphique de contrôle, histogramme, graphique en nuage de points.

Cycle de décision : en temps réel (processus critiques) ou quotidien (analyse sommaire).

### Avantages technologiques

Prise de décision précise : l'analyse des données réduit de 60 % le temps nécessaire pour localiser les problèmes de qualité.

Optimisation des ressources : augmentation de 15 à 20 % de l'utilisation des équipements et des matières premières.

Amélioration de la qualité : le SPC contrôle le taux de défauts du lot en dessous de 0,3 %.

Ajustement dynamique : les données en temps réel permettent de réagir rapidement aux changements de la demande du marché.

### Défis techniques

Intégration des données : les données multisources doivent être standardisées et complexes à traiter.

Complexité de l'analyse : des téraoctets de données nécessitent des algorithmes efficaces et une puissance de calcul.

Exigences en personnel : les scientifiques et les ingénieurs des données sont tenus de collaborer, et le coût de la formation est élevé.

Stabilité du système : la plate-forme cloud doit être hautement disponible pour éviter la perte de données.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

## 4.2 Creuset en tungstène : économie d'énergie et technologie de protection de l'environnement

La technologie d'économie d'énergie et de protection de l'environnement réduit la consommation d'énergie et l'impact environnemental de la production de creusets en tungstène en optimisant la conception des fours de frittage, la récupération de la chaleur résiduelle, la production à faible émission de carbone et les technologies propres, et atteint l'objectif de fabrication écologique.

### 4.2.1 Conception d'un four de frittage à haut rendement

#### Principe du processus

Les fours de frittage à haut rendement réduisent les pertes de chaleur et améliorent l'efficacité énergétique en optimisant les éléments chauffants, l'isolation et les systèmes de contrôle de la température. Les fours de frittage modernes utilisent des champs thermiques simulés et un contrôle intelligent pour garantir l'uniformité de la température et une consommation d'énergie minimale.

#### Exigences en matière d'équipement :

Élément chauffant : tungstène ou graphite de haute pureté, résistant à 2600°C, durée de vie > 5000 heures.

Isolation thermique : composites en zircone (ZrO<sub>2</sub>) ou en fibre de carbone, conductivité thermique < 0,1 W/m·K.

Contrôle de la température : contrôleur PID, précision ± 1°C, thermomètre infrarouge intégré.

Système de vide : pompe turbomoléculaire, degré de vide 10<sup>-5</sup> Pa, empêche l'oxydation.

Logiciel de simulation : ANSYS ou COMSOL pour simuler les champs thermiques et les distributions d'énergie.

#### Paramètres du processus

Température de frittage : 1800°C à 2400°C, gradient contrôlé (±5°C).

Vitesse de chauffage : 5 à 15°C/min, équilibrant efficacité et contrainte.

Temps de maintien : 2 à 12 heures, selon la taille du creuset.

Consommation d'énergie : 10 kWh par kilogramme de tungstène < (fournaise à haut rendement), 15 à 20 kWh pour les fournaies conventionnelles.

Efficacité thermique : >80 %, optimisée par l'isolation thermique et le champ thermique.

#### Avantages technologiques

Faible consommation d'énergie : Les fours de frittage à haut rendement réduisent la consommation d'énergie de 20 à 30 %.

Haute uniformité : déviation du champ thermique < 10°C, réduisant le taux de défauts.

Longue durée de vie : durée de vie 50 % plus longue des éléments chauffants et de l'isolation.

Respectueux de l'environnement : Réduire l'électricité et les émissions, conformément aux normes de fabrication écologiques.

#### Défis techniques

Coût de l'équipement : Investissement élevé dans un four de frittage à haut rendement, période d'amortissement de 3 à 5 ans.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Conception complexe : La simulation de champ thermique nécessite une équipe professionnelle et une assistance logicielle.

Exigences d'entretien : les matériaux isolants à haute température doivent être remplacés régulièrement, ce qui est coûteux.

Barrières techniques : des systèmes de contrôle avancés doivent être personnalisés et développés.

#### 4.2.2 Récupération de la chaleur résiduelle et recyclage de l'énergie

##### Principe du processus

La récupération de chaleur résiduelle capte la chaleur résiduelle générée lors du frittage et du traitement grâce à des échangeurs de chaleur et des systèmes de stockage d'énergie pour le préchauffage des matières premières, le chauffage des fluides de nettoyage ou le chauffage. Le recyclage de l'énergie convertit l'énergie thermique récupérée en énergie électrique ou mécanique, ce qui réduit encore la consommation d'énergie.

##### Exigences en matière d'équipement :

Échangeur de chaleur : à plaques ou tubulaire, efficacité de transfert de chaleur > 90 %, résistance à 1000°C.

Système de stockage d'énergie : matériau à changement de phase (PCM) ou stockage de chaleur à sels fondus avec une densité de stockage d'énergie de > 200 kJ/kg.

Générateurs thermoélectriques : sur la base de l'effet Seebeck, le rendement de conversion est de 10 % à 15 %.

Système de tuyauterie : acier inoxydable résistant aux hautes températures, perte de chaleur < 5 %.

Système de contrôle : contrôleur PLC, surveillance en temps réel du flux de chaleur et de la distribution d'énergie.

##### Paramètres du processus

Température de la chaleur résiduelle : 300°C à 1000°C (échappement du four de frittage), 100°C à 200°C (refroidissement du traitement).

Taux de récupération : L'échangeur de chaleur récupère 70 à 90 % de la chaleur résiduelle.

Temps de stockage de l'énergie : 6 à 24 heures pour répondre à la demande intermittente.

Efficacité de production d'électricité : 10 % à 12 % pour les groupes électrogènes, générant 0,1 à 0,2 kWh par kilogramme de chaleur résiduelle.

Durée de vie du système : 10 ans > échangeur de chaleur, 5000 cycles > matériau de stockage d'énergie.

##### Avantages technologiques

Réduction de la consommation d'énergie : la récupération de la chaleur résiduelle réduit la consommation totale d'énergie de 15 à 25 %.

Économies de coûts : Réduction des factures d'électricité et de carburant, période d'amortissement de 2 à 4 ans.

Avantages environnementaux : Réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, 0,5 à 1 tonne par tonne de tungstène.

##### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Flexibilité : La chaleur résiduelle peut être utilisée à diverses fins, améliorant ainsi l'efficacité énergétique.

#### Défis techniques

Investissement en équipement : Les échangeurs de chaleur et les systèmes de stockage d'énergie sont coûteux et nécessitent une récupération à long terme.

Perte de chaleur : Les pertes de chaleur dans les pipelines et les processus de stockage d'énergie doivent être minimisées.

Intégration du système : La récupération de la chaleur résiduelle doit être intégrée de manière transparente dans les lignes de production existantes.

Maintenance complexe : Les échangeurs de chaleur à haute température doivent être nettoyés et inspectés régulièrement.

### 4.2.3 Production sobre en carbone et fabrication verte

#### Principe du processus

La production à faible émission de carbone réduit l'empreinte carbone de la production de creusets en tungstène grâce à l'utilisation d'énergies renouvelables, à des processus optimisés et à une dépendance réduite aux combustibles fossiles. La fabrication verte combine les technologies propres et la gestion de l'environnement pour atteindre les objectifs de développement durable.

#### Exigences en matière d'équipement :

Systèmes d'énergie renouvelable : solaire (photovoltaïque, rendement >20 %) ou éolien (puissance >5 MW).

Four de frittage bas carbone : chauffage électrique au lieu du gaz, le rendement > 90 %.

Système de capture du carbone : Absorption chimique ou séparation membranaire, taux de capture > 80 %.

Équipement de surveillance de l'environnement : analyseur d'émissions (CO<sub>2</sub>, NOx) avec une précision de ± 0,1 ppm.

Système de management ISO 14001 : Une plateforme numérique qui enregistre les émissions de carbone et les données environnementales.

#### Paramètres du processus

Mix énergétique : >50 % d'énergies renouvelables et 20 % < énergies fossiles.

Émissions carbone : 1 tonne de CO<sub>2</sub> par tonne de tungstène < (bas carbone), 2 à 3 tonnes pour la production conventionnelle.

Taux de captage : Les systèmes de captage du carbone récupèrent 80 % à 90 % des émissions.

Fréquence de surveillance : en temps réel (données d'émission), mensuelle (rapport environnemental).

Cycle de certification : ISO 14001 audité annuellement, empreinte carbone évaluée trimestriellement.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Avantages technologiques

Faibles émissions : réduction de 50 à 70 % de l'empreinte carbone, en ligne avec les objectifs mondiaux de réduction des émissions.

Valeur de la marque : La fabrication écologique améliore l'image de l'entreprise et attire des clients soucieux de l'environnement.

Soutien politique : Conformément à la politique de neutralité carbone, recevoir des subventions ou des incitations fiscales.

Durabilité : Réduire la consommation de ressources et prolonger la durée de vie de la chaîne industrielle.

### Défis techniques

Coûts de l'énergie : Les investissements dans les infrastructures d'énergie renouvelable sont élevés, avec une période de récupération de 5 à 10 ans.

Transformation technologique : Les équipements bas carbone doivent transformer les chaînes de production existantes, ce qui affecte la capacité de production à court terme.

Coût du captage : Les systèmes de captage du carbone sont coûteux à exploiter et doivent être optimisés pour être efficaces.

Pression réglementaire : Les normes mondiales en matière d'émissions de carbone sont différentes et doivent s'adapter aux exigences de plusieurs pays.

## 4.2.4 Technologies de production plus propres

### Principe du processus

Les technologies de production plus propres permettent une production respectueuse de l'environnement en réduisant les gaz d'échappement, les déchets liquides et les déchets solides, et en optimisant les processus de nettoyage, de traitement et de post-traitement. Ces technologies comprennent des agents de nettoyage non toxiques, une circulation d'eau morte et des systèmes de filtration à haute efficacité.

### Exigences en matière d'équipement :

Équipement de nettoyage : Nettoyeur à ultrasons (40 à 80 kHz) utilisant des produits de nettoyage neutres ou biosourcés.

Système de circulation de l'eau : Purificateur par osmose inverse (OI) avec récupération > 95 %.

Équipements de traitement des gaz résiduels : adsorption sur charbon actif ou combustion catalytique, efficacité du traitement > 99 %.

Équipement de traitement des déchets solides : incinérateur ou compresseur haute température, le taux de traitement est de >90 %.

Système de surveillance : surveillance des émissions en temps réel avec une précision de  $\pm 0,01$  ppm.

### Paramètres du processus

Agent nettoyant : pH 6 à 8, biodégradable > 90 %.

Taux de récupération de l'eau : >95 %, qualité de l'eau purifiée < 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Traitement des gaz résiduels :  $\text{NO}_x < 10$  ppm,  $\text{COV} < 5$  ppm.

Réduction des déchets solides : 50 kg par tonne de tungstène < (production plus propre), 100 kg pour les > conventionnelles.

Fréquence de surveillance : en temps réel (gaz d'échappement, déchets liquides), quotidienne (déchets solides).

#### Avantages technologiques

Protection de l'environnement : réduction de 70 à 90 % des rejets de déchets, dans le respect de la réglementation environnementale.

Économies de coûts : le recyclage de l'eau et des matériaux réduit les dépenses d'exploitation de 20 %.

Santé et sécurité : Les agents de nettoyage non toxiques réduisent les risques pour la santé au travail.

Conformité : Répond aux normes internationales telles que REACH et RoHS.

#### Défis techniques

Coûts techniques : Investissement élevé dans les équipements de nettoyage et les systèmes de surveillance.

Adaptation du processus : Les produits de nettoyage et les systèmes de circulation doivent être compatibles avec les processus existants.

Réglementation complexe : De nombreux pays ont des normes environnementales différentes et doivent faire preuve de souplesse et d'adaptabilité.

Performance équilibrée : Les détergents doivent être à la fois efficaces et respectueux de l'environnement.

### 4.3 Creuset en tungstène, économie circulaire et gestion des ressources

L'économie circulaire et la gestion des ressources permettent d'atteindre l'efficacité des ressources et la durabilité environnementale dans la production de creusets en tungstène grâce au recyclage des déchets, à l'élimination des gaz et des liquides, à l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement et à l'analyse du cycle de vie.

#### 4.3.1 Recyclage et réutilisation des déchets de tungstène

##### Principe du processus

Le recyclage des déchets de tungstène convertit les déchets de traitement, les creusets en fin de vie et les matériaux recyclés en poudre de tungstène de haute pureté grâce au tri physique, à la purification chimique et au traitement métallurgique, qui peut être réutilisé dans la production. Le processus de recyclage réduit l'extraction des matières premières, ce qui réduit les coûts et l'impact environnemental.

##### Exigences en matière d'équipement :

Équipement de tri : séparateur magnétique et séparateur à courants de Foucault pour séparer le tungstène et les autres métaux.

Équipement de purification chimique : bassin de lixiviation acide et colonne d'échange d'ions,

pureté > 99,95 %.

Équipement métallurgique : four de fusion sous vide ou four à arc électrique, température de traitement > 3000°C.

Équipement de préparation des poudres : broyeur à boulets et sécheur par atomisation avec une granulométrie de 5 à 20 µm.

Matériel de détection : ICP-MS (impuretés < 10 ppm), analyseur de taille de particules (précision ± 0,1 µm).

### Paramètres du processus

Taux de récupération : >90 % (déchets de tungstène), >95 % (déchets de haute pureté).

Pureté : Poudre de tungstène recyclée >99,95 %, impuretés (Fe, Ni) < 50 ppm.

Taille des particules : 5 à 20 µm, adapté au frittage et à l'impression 3D.

Consommation d'énergie : 5 MWh par tonne de tungstène < récupérée, 10 MWh > l'exploitation minière conventionnelle.

Temps de traitement : 1 à 2 jours pour le tri et la purification, 3 à 5 jours pour le traitement métallurgique.

### Avantages technologiques

Économie de ressources : Le recyclage du tungstène réduit l'extraction du minerai de 80 à 90 %.

Réduction des coûts : 50 % à 60 % du coût du recyclage des matériaux neufs.

Avantages environnementaux : Réduction des déchets miniers et de la consommation d'énergie, réduction de 70 % des émissions de CO<sub>2</sub>.

Système Dead Loop : Permet le recyclage des déchets vers de nouveaux creusets.

### Défis techniques

Contrôle des impuretés : Les éléments non tungstènes dans les déchets doivent être éliminés efficacement.

Techniquement complexe : L'épuration chimique et le traitement métallurgique nécessitent un contrôle précis.

Diversité des déchets : La composition des déchets provenant de différentes sources varie considérablement, ce qui nécessite des processus flexibles.

Économie : Les installations de recyclage à petite échelle ont de faibles économies d'échelle et doivent être centralisées.

## 4.3.2 Traitement des gaz résiduels et des déchets liquides dans le processus de production

### Principe du processus

Le traitement des gaz d'échappement et des déchets utilise des technologies d'adsorption, de catalyse, de filtration et de neutralisation pour éliminer les polluants (par exemple, NO<sub>x</sub>, COV, déchets acides) générés lors du frittage, du traitement et du nettoyage afin de s'assurer que les émissions répondent aux normes environnementales.

### Exigences en matière d'équipement :

Traitement des gaz résiduels : tour d'adsorption sur charbon actif (taux d'adsorption >99 %), four à combustion catalytique (taux de traitement > 98 %).

Traitement des déchets : réacteur de neutralisation (pH 6 à 8), système de filtration membranaire (récupération > 90 %).

Équipement de filtration : Filtre à particules à haute efficacité (HEPA), taille des particules < 0,3µm.

Équipement de surveillance : spectromètre de masse par chromatographie en phase gazeuse (GC-MS, précision ±0,01 ppm), pH-mètre (précision ± 0,01).

Contrôle automatique : système PLC, réglage en temps réel des paramètres d'usinage.

### Paramètres du processus

Gaz d'échappement:

NOx : <10 ppm, COV : <5 ppm.

Taux de traitement : >99 % (combustion catalytique), >95 % (adsorption).

Fréquence d'émission : surveillance continue, enregistrement horaire.

Déchets de liqueur :

pH : 6,5 à 7,5 (après neutralisation).

Métaux lourds : <0,1 ppm (tungstène, nickel, etc.).

Récupération : >90 % (eau), >80 % (produits chimiques).

Consommation d'énergie : <0,5 kWh par tonne de gaz d'échappement, <1 kWh par tonne de liqueur usée.

### Avantages technologiques

Émissions conformes : Conforme aux normes EPA, UE et GB sans amendes environnementales.

Récupération des ressources : L'eau et les produits chimiques contenus dans les déchets liquides peuvent être réutilisés, ce qui réduit les coûts.

Protection de l'environnement : réduction de 90 % des émissions polluantes et protection de l'écosystème.

Gestion automatique : la surveillance en temps réel réduit les coûts de main-d'œuvre et améliore l'efficacité.

### Défis techniques

Coûts d'élimination : Équipement à haut rendement et coûts chimiques élevés.

Diversité des polluants : La composition des gaz résiduels et des déchets liquides dans différents processus est complexe, ce qui nécessite la combinaison de plusieurs technologies.

Exigences en matière de surveillance : La surveillance continue nécessite un équipement de haute précision et des professionnels.

Maintenance du système : Les filtres et les réacteurs doivent être remplacés régulièrement, ce qui augmente les coûts d'exploitation.

### 4.3.3 Gestion durable de la chaîne d'approvisionnement

#### Principe du processus

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

La gestion durable de la chaîne d'approvisionnement réduit l'empreinte carbone, le gaspillage des ressources et l'impact environnemental en optimisant l'approvisionnement en matières premières, la logistique et la collaboration avec les fournisseurs. Ces mesures comprennent l'approvisionnement écologique, l'optimisation de la logistique et l'évaluation environnementale des fournisseurs.

### Équipement et outils

Système de gestion de la chaîne d'approvisionnement : SAP ou Oracle SCM pour intégrer les données d'approvisionnement, d'inventaire et de logistique.

Outils d'analyse de l'empreinte carbone : SimaPro ou GaBi pour calculer les émissions carbone de la chaîne d'approvisionnement.

Logiciel d'optimisation logistique : Route4Me ou OptimoRoute, pour planifier des itinéraires de transport bas carbone.

Système d'évaluation environnementale : Plateforme certifiée ISO 14001 pour évaluer la performance environnementale des fournisseurs.

Technologie blockchain : Enregistre l'origine des matières premières pour assurer la transparence et la traçabilité.

### Paramètres de mise en œuvre

Achats écologiques : > 80 % des matières premières proviennent de sources durables (par exemple, du tungstène recyclé ou des minéraux à faible teneur en carbone).

Empreinte carbone : 0,5 tonne de CO<sub>2</sub> par tonne <d'émissions de la chaîne d'approvisionnement en tungstène.

Efficacité logistique : réduction de 20 % de la consommation d'énergie de transport et de 90 % > utilisation des véhicules.

Évaluation des fournisseurs : Audité annuellement, le score environnemental est > 85 sur 100.

Transparence des données : les enregistrements de la blockchain couvrent 95 % de > chaîne d'approvisionnement.

### Avantages technologiques

Approvisionnement bas carbone : réduction de 50 à 70 % des émissions de carbone de la chaîne d'approvisionnement.

Optimisation des coûts : 15 % à 20 % d'économies en logistique et gestion des stocks.

Conformité : Répondez aux exigences écologiques des clients et des réglementations.

Valorisation de la marque : la chaîne d'approvisionnement durable renforce l'image de responsabilité sociale de l'entreprise.

### Défis techniques

Coordination complexe : La chaîne d'approvisionnement mondiale nécessite une collaboration multipartite et est difficile à gérer.

Collecte de données : Il est difficile de normaliser les données environnementales des fournisseurs, et une plateforme unifiée est nécessaire.

Coût initial : investissement élevé dans les achats écologiques et le système blockchain.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Différences réglementaires : Les normes environnementales varient d'un pays à l'autre, ce qui nécessite une certaine souplesse pour s'adapter.

#### 4.3.4 Analyse du cycle de vie (ACV)

##### Principe du processus

L'analyse du cycle de vie (ACV) guide l'amélioration des processus et la conception durable en quantifiant l'impact environnemental (par exemple, la consommation d'énergie, les émissions, la consommation de ressources) des creusets en tungstène, de l'extraction des matières premières au recyclage en fin de vie. L'ACV couvre les phases de matières premières, de production, d'utilisation et d'élimination.

##### Équipement et outils

Logiciels d'ACV : SimaPro, GaBi ou OpenLCA pour des données multidimensionnelles.

Base de données : Ecoinvent ou ELCD, qui fournit des données environnementales sur les matériaux et l'énergie.

Plate-forme informatique : Un ordinateur haute performance qui traite des téraoctets de données et dont l'analyse prend < 1 jour.

Système d'indicateurs environnementaux : ReCiPe ou TRACI, évalue l'empreinte carbone, l'empreinte eau, etc.

Outils de reporting : Tableau ou Excel pour générer des rapports et des graphiques ACV.

##### Paramètres de mise en œuvre

Portée de l'évaluation : Du berceau à la tombe, y compris l'exploitation minière, la production, l'utilisation et le recyclage.

Indicateurs environnementaux :

Empreinte carbone : <2 tonnes de CO<sub>2</sub> par tonne de tungstène.

Consommation d'énergie : <20 MWh.

Empreinte eau : <500 m<sup>3</sup>.

Sources des données : données internes (80 %), base de données Ecoinvent (20 %).

Période d'analyse : annuelle ou par sortie de nouveau produit.

Incertitude : L'erreur de données est de <10 %, ce qui est vérifié par la simulation de Monte Carlo.

##### Avantages technologiques

Évaluation complète : L'ACV révèle les points chauds environnementaux tout au long du cycle de vie et guide les améliorations.

Aide à la décision : Fournir des données quantitatives pour optimiser les conceptions et les processus.

Conformité : Répond aux normes ISO 14040/14044 et répond aux exigences des clients.

Concurrence sur le marché : les produits à faible impact sur l'environnement sont plus attractifs.

##### Défis techniques

Complexité des données : la collecte et l'intégration des données en plusieurs étapes prennent beaucoup de temps.

##### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Précision du modèle : la base de données externe peut s'écarter de la situation réelle et doit être vérifiée.

Exigences professionnelles : L'ACV nécessite des connaissances en sciences et en ingénierie de l'environnement, et l'équipe a un seuil élevé.

Coût élevé : Les logiciels, les bases de données et les analyses sont coûteux et difficiles à payer pour les PME.

#### 4.4 Exploration de la technologie de pointe du creuset en tungstène

L'exploration technologique de pointe favorise les percées dans les performances des creusets en tungstène grâce à l'introduction de nanomatériaux, d'alliages à haute entropie, d'informatique quantique et de fabrication biomimétique pour répondre aux besoins des futures applications de haute technologie.

##### 4.4.1 Poudre de nano-tungstène et creuset en tungstène ultra-fin

###### Principe du processus

La nano-poudre de tungstène (granulométrie < 100 nm) est préparée par dépôt en phase vapeur ou réduction chimique pour le frittage de creusets en tungstène à grains ultrafins (grain < 1 µm). La structure à grain ultra-fin améliore la solidité, la ténacité et la résistance aux chocs thermiques du creuset, ce qui le rend adapté aux environnements extrêmes tels que les réacteurs à fusion nucléaire.

###### Exigences en matière d'équipement :

Préparation de nanopoudres : réacteur de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) à 800 °C à 1200 °C.

Équipement de frittage : Four de pressage isostatique à chaud (HIP) avec une pression de 100 à 200 MPa et une température de 1800°C à 2200°C.

Manipulation de la poudre : disperseur à ultrasons pour éviter l'agglomération de nanopoudre.

Matériel de détection : microscope électronique à transmission (MET, résolution < 0,1 nm), analyseur de taille de particules (précision ±1 nm).

Salle blanche : classe ISO 4 (classe 10) pour éviter la contamination par les nanopoudres.

###### Paramètres du processus

Taille des particules de poudre : 10 à 100 nm, uniformité ± 5 nm.

Conditions de frittage :

Température : 1800° C à 2000° C (croissance réduite des grains).

Pression : 150 MPa (HIP).

Durée : 1 à 3 heures.

Granulométrie : 0,5 à 1 µm (grain ultra-fin), conventionnel > 10 µm.

Densité : >99,5 %, porosité <0,1 %.

Amélioration des performances : résistance > 1000 MPa (traditionnelle < 800 MPa), résistance aux chocs thermiques > 1000 cycles.

###### Avantages technologiques

Haute performance : augmentation de 30 à 50 % de la résistance et de la ténacité des creusets à

###### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

grains ultra-fins.

Résistant aux environnements extrêmes : 2 fois plus résistant aux chocs thermiques et aux radiations, adapté aux applications nucléaires.

Structure fine : la nanopoudre supporte des géométries complexes et convient à l'impression 3D.

Longue durée de vie : La durée de vie est prolongée de 50 %, ce qui réduit le coût de remplacement.

#### Défis techniques

Coût de la poudre : Le prix de la poudre de nano tungstène est 5 à 10 fois supérieur à celui de la poudre ordinaire.

Problème d'agrégation : la nano-poudre est facile à agglomérer et une technologie de dispersion spéciale est nécessaire.

Difficulté de frittage : les cristaux ultra-fins doivent contrôler avec précision la température et la pression, et les exigences en matière d'équipement sont élevées.

À grande échelle : L'application à grande échelle de la production de nanopoudres et du frittage n'a pas encore été réalisée.

#### 4.4.2 Alliages à haute entropie et creusets composites

##### Principe du processus

Les alliages à haute entropie (HEA) sont composés d'au moins cinq métaux (par exemple, le tungstène, le molybdène, le niobium, le tantale, le zirconium) à des rapports quasi équimolaires et ont une excellente résistance aux hautes températures, à l'oxydation et au fluage. Les creusets composites combinent le tungstène avec des matériaux céramiques (par exemple, SiC, ZrC) ou en carbone (par exemple, le graphène) pour améliorer la résistance à la corrosion et la stabilité thermique.

##### Exigences en matière d'équipement :

Préparation de l'alliage : four de fusion à l'arc sous vide, température  $> 3000^{\circ}\text{C}$ , degré de vide  $10^{-5}$  Pa.

Moulage composite : four de frittage par pression à chaud avec une pression de 50 à 100 MPa et une température de  $2000^{\circ}\text{C}$ .

Mélange de poudres : broyeur planétaire, uniformité  $\pm 1\%$ .

Matériel d'essai : XRD (analyse de phase), MEB (microstructure), machine d'essai à haute température (test de performance).

Équipement de traitement : machine de découpe laser (précision  $\pm 0,01$  mm), rectifieuse CNC (rugosité de surface  $Ra < 0,1$   $\mu\text{m}$ ).

##### Paramètres du processus

Alliages à haute entropie :

Composition : W-Mo-Nb-Ta-Zr (rapport molaire 1:1:1:1:1).

Temps de fusion : 3 à 5 fois pour assurer l'uniformité.

Performance : Résistance  $> 1500$  MPa ( $2000^{\circ}\text{C}$ ), température antioxydante  $> 1800^{\circ}\text{C}$ .

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Matériaux composites :

Composition : tungstène + 20 % SiC ou 5 % graphène.

Conditions de frittage : 2000° C, 80 MPa, 2 heures.

Propriétés : dureté > HV 3000, conductivité thermique > 100 W/m • K.

Densité : >99 %, porosité <0,5 %.

### Avantages technologiques

Ultra-haute performance : les creusets HEA sont deux fois plus résistants que le tungstène pur à 2000°C.

Polyvalence : Les composites combinent dureté, conductivité thermique et résistance à la corrosion.

Résistant aux environnements extrêmes : convient aux industries de la fusion, de l'aérospatiale et de la chimie.

Flexibilité de conception : rapports d'alliage et de composite réglables pour répondre à des besoins spécifiques.

### Défis techniques

Difficulté de préparation : Le HEA doit être fondu plusieurs fois et le contrôle de la composition est complexe.

Problèmes de compatibilité : Les composites présentent de grandes différences de coefficients de dilatation thermique, ce qui peut facilement entraîner des fissures.

Coût élevé : Les métaux de haute pureté et les nanocéramiques sont chers.

Difficulté de traitement : Le moulage et le post-traitement de matériaux de haute dureté nécessitent des processus spéciaux.

## 4.4.3 Application de l'informatique quantique dans la conception des matériaux

### Principe du processus

L'informatique quantique utilise des qubits et des algorithmes quantiques tels que les solveurs intrinsèques quantiques variationnels (VQE) pour simuler le comportement au niveau atomique des matériaux des creusets en tungstène afin d'optimiser les ratios d'alliage, les structures cristallines et les prédictions de performances. L'informatique quantique est des centaines de fois plus rapide que l'informatique classique, ce qui accélère le développement de nouveaux matériaux.

### Exigences en matière d'équipement :

Calculatrices quantiques : processeurs quantiques supraconducteurs (>100 qubits) tels que IBM Quantum ou Google Sycamore.

Cluster de calcul classique : aide au traitement des données, avec une puissance de calcul de > 1 PFLOPS.

Logiciels de simulation : Qiskit, Cirq ou Pennylane pour l'informatique hybride quantique-classique.

Base de données : Materials Project, qui fournit des données sur le tungstène et les alliages.

Matériel d'essai : source lumineuse à rayonnement synchrotron (pour vérifier les résultats de simulation), TEM (structure au niveau atomique).

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Paramètres du processus

Qubits : 50 à 200 qubits avec un taux d'erreur de  $<0,1\%$ .

Échelle de simulation :  $>10^4$  atomes, temps de simulation  $<1$  heure (calculs classiques  $>1$  semaine).

Algorithmes : VQE (optimisation structurelle), Monte Carlo quantique (prédiction de performance).

Précision : erreur de calcul d'énergie  $<0,01$  eV, erreur structurelle  $<0,1$  Å.

Saisie de données : données de structure cristalline et électronique pour le tungstène, les alliages et les composites.

### Avantages technologiques

Conception rapide : les cycles de développement de nouveaux matériaux ont été raccourcis de plusieurs années à quelques mois.

Haute précision : L'erreur de performance de prédiction de la simulation quantique est de  $<1\%$ , ce qui est mieux que celle des méthodes classiques.

Systèmes complexes : Simulez des alliages et des nanostructures à haute entropie, repoussant les limites de l'informatique classique.

Moteur de l'innovation : Accélérez les hautes performances des creusets en tungstène pour répondre aux besoins futurs.

### Défis techniques

Rareté de l'équipement : Les calculatrices quantiques sont limitées en nombre et chères d'accès.

Maturité technologique : L'informatique quantique n'en est actuellement qu'à ses débuts et le taux d'erreur doit encore être réduit.

Exigences en matière de données : La simulation nécessite des données expérimentales de haute qualité, ce qui est difficile à obtenir.

Professionnels : L'informatique quantique nécessite des connaissances interdisciplinaires en physique, en calcul et en science des matériaux.

### 4.4.4 Matériaux bio-inspirés et fabrication biomimétique

#### Principe du processus

Les matériaux bio-inspirés imitent les structures haute performance de la nature (par exemple, la structure en couches des coquilles, la conception poreuse des os) pour développer des matériaux à base de tungstène avec une auto-guérison, un allègement et une résistance élevée. La fabrication biomimétique utilise l'impression 3D et la technologie d'auto-assemblage pour reproduire les structures biologiques afin de créer de nouveaux creusets en tungstène.

#### Exigences en matière d'équipement :

Équipement d'impression 3D : imprimante SLM multi-matériaux, support de composites tungstène et céramique.

Système d'auto-assemblage : plateforme de nano-manipulation pour contrôler la structure au niveau moléculaire (précision  $<1$  nm).

Logiciel de conception biomimétique : Biomimétisme ou CAO pour simuler des structures biologiques.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Equipements de détection : AFM (structure de surface, résolution < 0,1 nm), micro CT (structure interne).

Équipement expérimental : machine d'essai à haute température (test des performances d'auto-guérison), machine d'essai de fatigue.

### Paramètres du processus

Composition du matériau : tungstène + nanocéramiques (par exemple ZrC) ou polymères, rapport 10:1 à 5:1.

Paramètres d'impression :

Épaisseur de la couche : 10 à 50 µm.

Puissance laser : 500 à 1000 W.

Vitesse d'impression : 0,5 à 2 m/s.

Auto-assemblage :

Température : 25 °C à 100 °C (auto-assemblage moléculaire).

Temps : 1 à 24 heures.

Taille de la structure : 1 nm à 100 µm.

Performance:

Résistance : >1200 MPa.

Taux d'auto-cicatrisation : >80 % (réparation de microfissures).

Poids : 10 % à 20 % plus léger que le tungstène pur.

### Avantages technologiques

Haute performance : la structure biomimétique augmente la résistance et la ténacité de 30 % à 40 %.

Auto-réparation : Les micro-fissures sont automatiquement réparées et la durée de vie est prolongée de 2 fois.

Légèreté : les conceptions poreuses ou stratifiées réduisent le poids de 15 % et la consommation d'énergie.

Respectueux de l'environnement : Les matériaux biomimétiques réduisent la consommation de ressources et s'inscrivent dans la lignée de la fabrication verte.

### Défis techniques

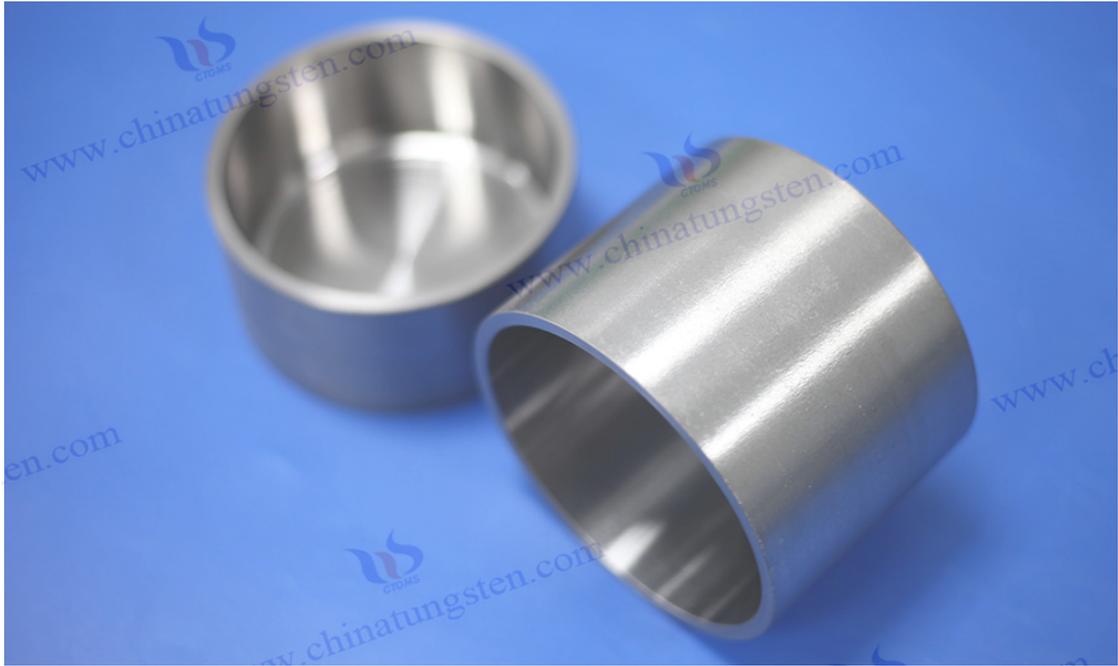
Techniquement complexe : la conception biomimétique et l'auto-assemblage nécessitent une technologie interdisciplinaire.

Difficulté de fabrication : La précision du contrôle de la structure à l'échelle nanométrique est extrêmement élevée.

Coût élevé : les investissements dans les équipements d'impression 3D et d'auto-assemblage sont importants et la commercialisation est difficile.

Cycle de vérification : Les nouveaux matériaux doivent être testés pendant une longue période, et l'application et la promotion sont lentes.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale



CTIA GROUP Ltd Creuset en tungstène

CTIA GROUP LTD

Tungsten Crucible Introduction

1. Overview of Tungsten Crucibles

Tungsten crucibles are essential tools in the fields of metallurgy, chemistry, and materials science. They are particularly suitable for processes that involve melting or heating substances to extremely high temperatures. Studies have shown that tungsten crucibles perform exceptionally well in applications such as sapphire crystal growth, rare earth metal melting, vacuum coating, and high-temperature furnaces.

2. Features of Tungsten Crucibles

Ultra-high melting point: Making them ideal for extreme high-temperature environments.

High purity: purity of  $\geq 99.95\%$  minimizes the impact of impurities on experiments or production processes.

Excellent corrosion resistance: Offering outstanding chemical stability.

High density and low vapor pressure: Ensuring material stability.

High strength and wear resistance: Ensuring long service life.

Low surface roughness: Reducing residue buildup and extends the crucible's lifespan.

3. Applications of Tungsten Crucibles

**Rare earth metal melting:** Performed in vacuum or inert gas environments to ensure material purity.

**Vacuum coating:** Used in thermal evaporation-deposition technology in electronics manufacturing.

**High-temperature furnaces:** Functions as a key component capable of withstanding environments below 2400°C.

**Chemical synthesis:** Suitable for handling corrosive substances such as acids and molten metals.

**Metal smelting and refining:** Used for melting and refining high-purity metals.

**Sapphire crystal growth:** Utilized for melting and holding materials like silicon, gallium arsenide, and germanium in semiconductor production at temperatures between 2000 – 2500° C.

4. Specifications of Tungsten Crucibles

Specification	Details
Material	Pure tungsten or tungsten alloy
Purity	99.95%
Diameter	20–620 mm
Height	20–500 mm
Wall Thickness	3.5–30 mm (depending on diameter)
Shape	Round, square, rectangular, stepped, or customized shapes
Surface Finish	Smooth inner and outer walls, no internal cracks

5. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten.com.cn](http://www.tungsten.com.cn)

Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés 电话/TEL :0086 592 512 9696  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版 CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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

## Chapitre 5 Applications du creuset en tungstène

Les creusets en tungstène jouent un rôle clé dans un certain nombre de domaines de haute technologie en raison de leur point de fusion élevé (3422°C), de leur excellente résistance aux hautes températures, de leur résistance à la corrosion et de leur dureté élevée. Ce chapitre explorera en détail le large éventail d'utilisations des creusets en tungstène dans l'industrie métallurgique, l'industrie des semi-conducteurs et de l'électronique, l'industrie chimique, la recherche scientifique, l'aérospatiale et la défense, l'industrie de l'énergie et les applications émergentes et interdisciplinaires, et fournira une analyse approfondie des exigences du processus, des indicateurs de performance, des avantages et des défis de chaque scénario d'application.

### 5.1 Industrie métallurgique

Les creusets en tungstène sont utilisés dans l'industrie métallurgique pour les procédés de fusion à haute température, de préparation d'alliages et de métallurgie des poudres afin de répondre aux exigences élevées des métaux des terres rares, des métaux précieux, des superalliages et du formage des poudres métalliques. Son point de fusion élevé et sa stabilité chimique en font un récipient irremplaçable dans des conditions extrêmes.

#### 5.1.1 Fusion des terres rares et des métaux précieux

##### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés pour la fusion sous vide ou sous atmosphère inerte des métaux des terres rares (par exemple, le lanthane, le cérium, le néodyme) et des métaux précieux (par exemple, l'or, le platine, le rhodium) afin de garantir une grande pureté et l'absence de contamination. Les métaux des terres rares sont largement utilisés dans les matériaux magnétiques et les catalyseurs, et les métaux précieux sont utilisés dans la bijouterie et la catalyse industrielle.

##### Exigences de performance

Résistance aux hautes températures : résiste à 1800°C à 2800°C pour éviter la déformation ou la fusion du creuset.

Chimiquement inerte : non réactif aux terres rares et métaux précieux fondus, impuretés introduites < 10 ppm.

Finition de surface :  $Ra < 0,1 \mu m$ , réduisant l'adhérence du métal.

Stabilité dimensionnelle : coefficient de dilatation thermique  $< 4,5 \times 10^{-6}/K$ , écart dimensionnel < 0,05 mm.

Durée de vie : > 50 cycles de fusion, l'uniformité de l'épaisseur de la paroi  $\pm 0,02$  mm.

##### Avantages technologiques

Haute pureté : le creuset en tungstène assure une pureté > de 99,99 % du métal fondu, ce qui répond aux besoins des applications haut de gamme.

Anti-corrosion : Résistant à la forte réduction des métaux des terres rares et prolonge la durée de vie.

Transfert de chaleur efficace : conductivité thermique  $> 100$  W/m·K, chauffage uniforme de la

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

masse fondue.

Personnalisation : Des creusets d'un diamètre de 50 à 500 mm peuvent être fabriqués pour s'adapter à différents types de fours.

### Défis techniques

Stress thermique élevé : Les cycles thermiques répétés peuvent entraîner des microfissures, qui nécessitent un traitement thermique optimisé.

Coût élevé : Les creusets en tungstène de haute pureté sont coûteux et il est nécessaire d'équilibrer les performances et l'économie.

Nettoyage complexe : Les résidus après fusion doivent être nettoyés en plusieurs étapes, ce qui augmente la difficulté du processus.

Limitations de taille : Les creusets extra-larges (>500 mm) sont difficiles à fabriquer et le coût est doublé.

## 5.1.2 Production de superalliages et de superalliages

### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés dans la fusion par induction sous vide (VIM) ou la fusion à l'arc de superalliages (tels que les alliages à base de nickel et de cobalt) et de superalliages pour produire des aubes de turbines d'avions, des composants de turbines à gaz, etc. Les superalliages sont fondus entre 1600°C et 2000°C, et les creusets en tungstène offrent un environnement stable à haute température.

### Exigences de performance

Résistance aux hautes températures : résiste à plus de 2000°C, résistance aux chocs thermiques > 500 cycles.

Antioxydant : La teneur en oxygène < 5 ppm sous vide ou sous atmosphère d'argon.

Résistance mécanique : résistance à la traction > 800 MPa, pour éviter la déformation à haute température.

Uniformité de l'épaisseur de la paroi :  $\pm 0,01$  mm, pour assurer la cohérence du champ thermique.

Résistance à l'abrasion : dureté > HV 400, résistance à l'érosion par fusion.

### Avantages technologiques

Stabilité à haute température : le creuset en tungstène maintient la structure intacte à 2000°C et le taux de déformation < 0,1 %.

Stabilité chimique : ne réagit pas avec le nickel, le cobalt ou les éléments ajoutés (par exemple le niobium, le tantale).

Longue durée de vie : il peut être réutilisé 30 à 50 fois, ce qui réduit les coûts de production.

Production efficace : Soutenir la fusion d'alliages à grand volume pour répondre aux besoins de l'aérospatiale.

### Défis techniques

Stress thermique : Les cycles à haute température entraînent une accumulation de contraintes, qui

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

doivent être éliminées par post-traitement.

Contamination de l'alliage : Des traces de dissolution du tungstène peuvent affecter les propriétés du superalliage, et un revêtement de surface est nécessaire.

Difficulté de fabrication : Les creusets de grande taille (>300 mm) doivent être frittés avec précision et le coût est élevé.

Consommation d'énergie élevée : La fusion à haute température consomme beaucoup d'énergie, il est donc nécessaire d'optimiser la conception du champ thermique.

### 5.1.3 Métallurgie des poudres métalliques et moulage par injection

#### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés dans le processus de frittage de la métallurgie des poudres métalliques (PM) et du moulage par injection de métal (MIM) pour préparer des pièces haute performance (par exemple, des composants en alliage de tungstène, des outils en carbure de tungstène). Le creuset contient de la poudre de tungstène ou d'autres poudres métalliques à haute température, assurant ainsi la qualité du frittage.

#### Exigences de performance

Performance haute température : 1600°C à 2200°C, résistance aux chocs thermiques > 300 cycles.

Stabilité chimique : ne réagit pas avec les poudres ou les liants, les impuretés < 20 ppm.

Précision dimensionnelle : tolérance de diamètre intérieur  $\pm 0,02$  mm, adapté aux moules de précision.

Qualité de surface :  $Ra < 0,2 \mu m$ , pour éviter l'adhérence de la poudre.

Conductivité thermique :  $> 120 W/m \cdot K$ , frittage uniforme.

#### Avantages technologiques

Haute consistance : le creuset fournit un champ thermique uniforme avec une densité de > 99 % de pièces frittées.

Durabilité : Il peut résister à plusieurs cycles de frittage et a une durée de vie > 200 fois.

Flexibilité : Prend en charge une large gamme de poudres (par exemple tungstène, molybdène, cobalt) pour s'adapter à différents processus.

Production efficace : raccourcissez le temps de frittage et augmentez le rendement des pièces.

#### Défis techniques

Contamination par la poudre : La volatilisation du liant peut contaminer le creuset et doit être nettoyée régulièrement.

Dilatation thermique : La différence de dilatation thermique entre le creuset et la poudre peut entraîner des contraintes, et la conception doit être optimisée.

Exigences de miniaturisation : Il est difficile de fabriquer de petits creusets (<50 mm) pour le MIM.

Contrôle des coûts : Les creusets haute performance doivent trouver un équilibre entre performance et économie.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés 电话/TEL :0086 592 512 9696

标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版 CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V

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

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

## 5.2 Industrie des semi-conducteurs et de l'électronique

Les creusets en tungstène sont utilisés dans les industries des semi-conducteurs et de l'électronique pour la croissance cristalline, la préparation de semi-conducteurs composés, le dépôt de couches minces et la gestion thermique, et leur haute pureté et leur résistance à haute température répondent aux exigences strictes de l'industrie microélectronique en matière de propreté et de stabilité des matériaux.

### 5.2.1 Croissance cristalline du silicium monocristallin et du saphir (méthode Czochralski, méthode Kyropoulos)

#### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés dans les méthodes Czochralski (CZ) et Kyropoulos (KY) pour la croissance du silicium monocristallin et du saphir ( $Al_2O_3$ ), pour la production de plaquettes de silicium (photovoltaïque, circuits intégrés) et de substrats de saphir (LED, lasers). Les creusets sont soumis à des températures élevées de 1600°C à 2000°C et à la corrosion par fusion.

#### Exigences de performance

Ultra-haute pureté : la pureté du tungstène > 99,999 % et les impuretés < 1 ppb pour éviter les défauts de cristaux.

Résistance aux hautes températures : 1800°C à 2000°C, choc thermique > 1000 fois.

Finition de surface :  $R_a < 0,05\mu m$ , réduire les inclusions de cristaux.

Stabilité dimensionnelle : diamètre 100 à 500 mm, écart d'épaisseur de paroi  $\pm 0,01$  mm.

Résistant à la corrosion : Résistant aux attaques chimiques du silicium et de l'alumine fondus.

#### Avantages technologiques

Cristaux de haute pureté : Les creusets en tungstène réduisent l'introduction d'impuretés à 0,1 ppb et < taux de défauts cristallins de 0,01 %.

Longue durée de vie : il peut être réutilisé 50 à 100 fois, ce qui réduit les coûts de production.

Champ thermique uniforme : conductivité thermique > 110 W/m·K pour assurer une croissance cristalline constante.

Support de grande taille : répondez aux besoins des plaquettes de silicium de 300 mm et des grands verres saphir.

#### Défis techniques

Déformation à haute température : Une température élevée à long terme peut provoquer une micro-déformation du creuset, et l'épaisseur de la paroi doit être optimisée.

Adhérence du silicium : Le silicium fondu peut adhérer aux creusets et nécessite un revêtement ou un nettoyage spécial.

Coût élevé : Le creuset en tungstène de très haute pureté a un coût de fabrication élevé et doit être produit à grande échelle.

Stress thermique : L'élévation et la baisse rapides de la température peuvent provoquer des fissures, et le contrôle de la température doit être contrôlé par étapes.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

## 5.2.2 Préparation des matériaux semi-conducteurs composés (GaAs, GaN)

### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés dans l'épitaxie en phase liquide (LPE) ou la Brinell horizontale (HB) pour cultiver des semi-conducteurs composés tels que l'arséniure de gallium (GaAs, puces 5G), le nitrure de gallium (GaN, dispositifs de puissance). Les creusets doivent résister à 1400°C à 1800°C et aux fondants corrosifs.

### Exigences de performance

Stabilité chimique : ne réagit pas avec le gallium fondu, l'arsenic ou l'azote, les impuretés < 5 ppb.

Performance haute température : 1500°C à 1800°C, choc thermique > 500 fois.

Qualité de surface :  $Ra < 0,1 \mu\text{m}$ , pour éviter les défauts de cristaux.

Précision dimensionnelle : tolérance de diamètre intérieur  $\pm 0,02$  mm, adaptée à la croissance précise des cristaux.

Anti-oxydation : La teneur en oxygène < 1 ppm dans une atmosphère vide ou inerte.

### Avantages technologiques

Cristaux de haute pureté : Le creuset assure > pureté de 99,9999 % de GaAs et de GaN.

Croissance efficace : Le champ thermique uniforme augmente le rendement cristallin de 20 %.

Résistance à la corrosion : Résistant à la forte corrosion de l'arsenic et du gallium, avec une durée de vie > 50 fois.

Personnalisation : Prend en charge les creusets de petite taille (50 mm) à moyens (200 mm).

### Défis techniques

Risque de corrosion : L'arsenic fondu peut éroder le creuset et nécessite un renforcement de surface.

Contrôle de l'atmosphère : un gaz inerte de haute pureté est nécessaire, ce qui augmente les coûts d'exploitation.

Défauts mineurs : Une rugosité de surface légèrement plus élevée peut provoquer des dislocations cristallines.

Coût élevé : Le prix des creusets en tungstène de haute pureté est élevé et le processus de production doit être optimisé.

## 5.2.3 PVD et CVD

### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés pour le dépôt physique en phase vapeur (PVD) et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) afin d'évaporer ou de déposer de manière réactive des matériaux en couches minces (par exemple, des métaux, des céramiques, des oxydes) pour la fabrication de puces, d'écrans et de revêtements optiques. Les creusets doivent résister à 1200°C à 2000°C et aux gaz réactifs.

### Exigences de performance

Stabilité à haute température : 1500°C à 2000°C sans volatilisation ni décomposition.

Chimiquement inerte : Résistant aux gaz réactionnels tels que le chlorure et le fluorure, les impuretés

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

< 10 ppb.

Conductivité thermique : >100 W/m·K pour assurer une évaporation uniforme.

Gamme de tailles : diamètre 20 à 200 mm, épaisseur de paroi 1 à 5 mm.

Finition de surface : Ra <0,2 µm pour éviter les éclaboussures de matériau.

### Avantages technologiques

Films de haute pureté : Les creusets introduisent des impuretés jusqu'à 1 ppb pour répondre aux besoins en puces.

Dépôt efficace : le champ thermique uniforme augmente le taux de dépôt de 30 %.

Support multi-matériaux : adapté à l'évaporation du titane, de l'aluminium, du silicium et d'autres matériaux.

Longue durée de vie : il peut être réutilisé plus de 100 fois, ce qui réduit les coûts.

### Défis techniques

Corrosion des gaz : Les gaz réactionnels CVD peuvent corroder les creusets et doivent être protégés par des revêtements.

Contrôle de la température : Un contrôle précis de la température ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) est nécessaire pour éviter un dépôt irrégulier.

Miniaturisation : Les micro-creusets (<20mm) sont difficiles à fabriquer et coûteux.

Nettoyage complexe : Les résidus déposés doivent être nettoyés en plusieurs étapes, ce qui accélère le processus.

## 5.2.4 Emballage microélectronique et gestion thermique

### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés pour le frittage à haute température et la gestion thermique dans les emballages microélectroniques, la préparation de substrats à haute conductivité thermique (tels que les composites tungstène-cuivre) ou les dissipateurs thermiques, et sont utilisés dans les puces haute puissance et les emballages LED. Les creusets doivent résister à 1000°C à 1500°C.

### Exigences de performance

Conductivité thermique : >120 W/m·K, dissipation thermique rapide.

Stabilité chimique : ne réagit pas avec le cuivre, l'argent et d'autres matériaux d'encapsulation, les impuretés < 20 ppm.

Précision dimensionnelle : tolérance  $\pm 0,01$  mm, adaptée aux moules de précision.

Qualité de surface : Ra <0,1µm, empêche le matériau de coller.

Résistance aux chocs thermiques : > 300 cycles, pas de fissures.

### Avantages technologiques

Dissipation thermique efficace : Il prend en charge le fonctionnement de puces haute puissance avec une résistance thermique de < 0,5 K/W.

Haute fiabilité : le creuset garantit une pureté de > 99,99 % du matériau d'encapsulation.

Miniaturisation : Support micro creuset (<30mm) pour s'adapter à l'emballage des puces.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Longue durée de vie : 50 à 80 fois la réutilisation, ce qui réduit les coûts.

### Défis techniques

Micro-fabrication : Les petits creusets nécessitent un usinage de haute précision et sont coûteux.

Dilatation thermique : La différence de dilatation thermique entre le tungstène et le matériau d'encapsulation peut causer des contraintes.

Contamination des surfaces : Un environnement ultra-propre est nécessaire pour prévenir la pollution par les particules.

Contrôle de la consommation d'énergie : Le frittage à haute température a une consommation d'énergie élevée et le processus doit être optimisé.

## 5.3 Industrie chimique

Les creusets en tungstène sont utilisés dans l'industrie chimique pour la synthèse de catalyseurs à haute température, les réactions corrosives fortes et le raffinage chimique de haute pureté, et sa résistance à la corrosion et sa stabilité à haute température répondent aux exigences des environnements chimiques difficiles.

### 5.3.1 Synthèse par catalyseur à haute température

#### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés dans les catalyseurs de synthèse à haute température (tels que les catalyseurs à base de platine et de palladium), la pétrochimie et la catalyse de protection de l'environnement. Les creusets doivent résister à 1200°C à 1800°C et aux gaz réactifs (par exemple ammoniac, chlore).

#### Exigences de performance

Résistance à la corrosion : Résistant aux gaz acides, alcalins et oxydants, la perte de surface < 0,01 mm / an.

Performance haute température : 1500°C à 1800°C, choc thermique > 200 fois.

Chimiquement inerte : ne réagit pas avec les précurseurs du catalyseur, les impuretés < 10 ppm.

Finition de surface : Ra<0,2 μm, pour éviter l'adhérence du catalyseur.

Gamme de tailles : diamètre 50 à 300 mm, épaisseur de paroi 2 à 10 mm.

#### Avantages technologiques

Catalyseur de haute pureté : Le creuset réduit l'introduction d'impuretés à 5 ppm, assurant ainsi l'efficacité catalytique.

Durabilité : Il peut être réutilisé plus de 50 fois, ce qui réduit les coûts de production.

Chauffage uniforme : conductivité thermique > 100 W/m·K pour une meilleure cohérence de synthèse.

Flexibilité : Prend en charge une large gamme de systèmes catalytiques (par exemple, métaux précieux, oxydes).

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Défis techniques

Corrosion par les gaz : Le chlore ou l'ammoniac peuvent éroder le creuset et nécessiter un renforcement de surface.

Volatilisation à haute température : Certains précurseurs de catalyseurs peuvent se déposer et doivent être nettoyés régulièrement.

Coût élevé : Les creusets en tungstène hautement résistants à la corrosion sont coûteux à fabriquer et doivent être optimisés.

Contrôle de l'atmosphère : un gaz inerte de haute pureté est nécessaire, ce qui augmente les coûts d'exploitation.

### 5.3.2 Récipients de réaction chimique hautement corrosifs

#### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés comme récipients pour des réactions chimiques corrosives fortes pour traiter les acides forts (tels que l'acide nitrique, l'acide fluorhydrique), les alcalis forts ou les sels fondus à haute température dans la production de produits chimiques spécialisés. Les creusets doivent résister à des environnements chimiques extrêmes de 1000°C à 1600°C.

#### Exigences de performance

Résistant à la corrosion : Résistant aux produits chimiques pH 0 à 14 avec un taux de corrosion de <0,005 mm/an.

Stabilité à haute température : 1200°C à 1600°C, pas de volatilisation ni de décomposition.

Résistance mécanique : résistance à la traction > 600 MPa, évitant la casse du conteneur.

Qualité de surface : Ra <0,1µm, réduisant les résidus de réactifs.

Uniformité de l'épaisseur de la paroi : ±0,02 mm, pour assurer la résistance à la pression.

#### Avantages technologiques

Extrêmement résistant à la corrosion : supporte de fortes réactions acido-basiques, la durée de vie du creuset > 100 fois.

Haute sécurité : l'inertie chimique garantit des processus de réaction sans contamination.

Polyvalent : Convient aux sels fondus, aux solutions acides et aux réactions gazeuses à haute température.

Production efficace : le champ thermique uniforme augmente la vitesse de réaction de 20 %.

### Défis techniques

Corrosion extrême : L'acide fluorhydrique peut provoquer une micro-corrosion et nécessite un revêtement spécial.

Difficulté de nettoyage : Le résidu de réaction doit être nettoyé en plusieurs étapes, ce qui accélère le processus.

Stress thermique élevé : Une rampe et une chute rapides de la température peuvent entraîner des fissures, et le traitement thermique doit être optimisé.

Coût élevé : Les creusets à haute résistance à la corrosion nécessitent du tungstène de très haute pureté, ce qui est coûteux.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### 5.3.3 Raffinage et raffinage de produits chimiques de haute pureté

#### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés pour la distillation sous vide ou la sublimation de produits chimiques de haute pureté (tels que le silicium de haute pureté, le bore, le phosphore) dans les industries des semi-conducteurs et du photovoltaïque. Le creuset doit être d'une pureté ultra-élevée et exempt de contamination.

#### Exigences de performance

Ultra-haute pureté : pureté du tungstène > 99,9999 %, impuretés < 0,1 ppb.

Performance à haute température : 1400°C à 1800°C, choc thermique > 300 fois.

Finition de surface : Ra < 0,05 μm, empêche l'adhérence chimique.

Stabilité chimique : ne réagit pas avec les vapeurs ou fond, contamine < 1 ppb.

Précision dimensionnelle : tolérance ± 0,01 mm, adaptée aux équipements de précision.

#### Avantages technologiques

Ultra-haute pureté : le creuset réduit les impuretés chimiques à 0,05 ppb pour répondre aux exigences en matière de semi-conducteurs.

Longue durée de vie : peut être réutilisé 80 à 120 fois, ce qui réduit les coûts.

Raffinage efficace : Un champ thermique uniforme améliore l'efficacité du raffinage de 25 %.

Personnalisation : Prend en charge les creusets de petite taille (20 mm) à moyens (150 mm).

#### Défis techniques

Exigences d'ultra-pureté : la production et le nettoyage des salles blanches de classe ISO 4 sont nécessaires.

Volatilisation à haute température : Des traces de volatilisation du tungstène peuvent contaminer les produits chimiques et doivent être protégées par des revêtements.

Difficulté de fabrication : Le creuset en tungstène de très haute pureté nécessite un processus complexe et un coût élevé.

Contrôle de l'atmosphère : Un vide ultra-poussé ( $10^{-6}$  Pa) est nécessaire, ce qui augmente les besoins en équipement.

### 5.4 Recherche scientifique

Les creusets en tungstène sont utilisés dans la recherche scientifique pour les essais de matériaux à haute température, la simulation d'environnements extrêmes, la synthèse de matériaux avancés et les expériences de rayonnement synchrotron, et leur grande stabilité et durabilité soutiennent l'exploration scientifique de pointe.

#### 5.4.1 Essais de performance des matériaux à haute température

##### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés pour tester le point de fusion, la stabilité thermique, la résistance à l'oxydation et les propriétés mécaniques de nouveaux matériaux, et sont utilisés dans la recherche en science des matériaux et en ingénierie. La plage de température d'essai est de 1500°C

à 3000°C.

### Exigences de performance

Température extrêmement élevée : résiste à 2800°C à 3000°C, résistant aux chocs thermiques > 200 fois.

Inerte chimiquement : ne réagit pas avec les matériaux d'essai, les impuretés < 10 ppm.

Résistance mécanique : résistance à la traction > 700 MPa, résistant à la rupture à haute température.

Taille flexible : 20 à 200 mm de diamètre, adaptée à différentes expériences.

Conductivité thermique : >100 W/m·K pour assurer un chauffage uniforme.

### Avantages technologiques

Support haute température : proche du point de fusion du tungstène (3422°C) pour des besoins d'essai extrêmes.

Haute fiabilité : la structure du creuset est stable et la cohérence des données expérimentales > 99,5 %.

Compatible multi-matériaux : Prend en charge les tests de métal, de céramique et de composite.

Longue durée de vie : 50 à 100 réutilisations, ce qui réduit le coût des expériences.

### Défis techniques

Déformation à haute température : Il peut être légèrement déformé lorsqu'il est proche du point de fusion, et la conception doit être optimisée.

Contamination du matériau : Des traces de volatilisation du tungstène peuvent affecter le test et doivent être protégées par un revêtement.

Miniaturisation : Les micro-creusets (<20mm) sont difficiles à fabriquer et coûteux.

Contrôle de l'atmosphère : Un vide de haute pureté ou un gaz inerte est nécessaire, ce qui augmente la complexité de l'expérience.

## 5.4.2 Expériences de simulation d'environnement extrême

### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés pour simuler des environnements extrêmes (par exemple, les réacteurs nucléaires, les atmosphères planétaires) et tester les performances des matériaux à haute température, à haute pression ou dans des conditions corrosives. La température expérimentale est de 1500°C à 2800°C, et l'atmosphère comprend du vide, des gaz oxydants ou réducteurs.

### Exigences de performance

Résistance aux hautes températures : 2500°C à 2800°C, choc thermique > 300 fois.

Résistance à la corrosion : Résistant à l'oxydation, à la réduction et aux environnements plasma, le taux de corrosion < 0,01 mm / an.

Stabilité mécanique : résistance à la compression > 1000 MPa pour éviter la casse.

Qualité de surface : Ra <0,1 µm, réduisant l'interaction avec les matériaux.

Compatible avec l'atmosphère : le vide ( $10^{-5}$  Pa) ou la haute pression (>10 MPa) sont pris en charge.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Avantages technologiques

Tolérance extrême : Soutient les conditions expérimentales proches du point de fusion pour la recherche nucléaire et aérospatiale.

Haute fiabilité : les performances du creuset sont stables et la répétabilité expérimentale est  $> 99\%$ .

Flexibilité : Adaptez-vous à une variété d'atmosphères et de pressions pour répondre à des expériences complexes.

Longue durée de vie : 50 à 80 fois peuvent être réutilisés, ce qui réduit les coûts.

### Défis techniques

Environnement complexe : les atmosphères et les pressions variables rendent la conception du creuset difficile.

Stress à haute température : Des conditions extrêmes peuvent provoquer des microfissures et nécessiter un post-traitement.

Coût élevé : Les creusets en tungstène haute performance sont coûteux à fabriquer et doivent être optimisés.

Difficulté de détection : L'état du creuset doit être un contrôle non destructif après l'expérience, et les exigences techniques sont élevées.

### 5.4.3 Synthèse et caractérisation des matériaux avancés

#### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés pour synthétiser des matériaux avancés (tels que des alliages à haute entropie, des matériaux supraconducteurs, des nanomatériaux) et caractériser leurs propriétés physiques à haute température. Le creuset fournit un environnement stable à haute température pour assurer la pureté de la synthèse du matériau.

#### Exigences de performance

Ultra-haute température : température de synthèse jusqu'à  $2500^{\circ}\text{C}$ , choc thermique  $> 200$  fois.

Exigences de pureté :  $1\text{ ppm}$  d'impuretés pour éviter la contamination du matériau.

Chauffage uniforme : conductivité thermique  $> 120\text{ W/m}\cdot\text{K}$  pour assurer la cohérence de la synthèse.

Contrôle de l'atmosphère : Atmosphères oxydantes et réductrices réglables pour une caractérisation fine.

### Avantages technologiques

Pureté du matériau : Le creuset ne participe pas aux réactions chimiques, ce qui garantit la qualité du matériau.

Haute stabilité : il peut être synthétisé de manière stable à des températures élevées pour garantir des propriétés de matériau constantes.

Polyvalence : Prend en charge une variété de méthodes de synthèse, telles que le superalliage, le dépôt en phase vapeur.

Longue durée de vie : peut être réutilisé 50 à 100 fois, ce qui réduit les coûts.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Défis techniques

Contrôle de l'atmosphère : Un contrôle précis de l'atmosphère est nécessaire, ce qui augmente la complexité de l'expérience.

Difficulté de synthèse : Les fluctuations de température pendant la synthèse peuvent affecter la structure du matériau.

Volatilisation à haute température : Les matériaux en tungstène se volatilisent en petites quantités à des températures élevées, de sorte que la conception doit être optimisée.

### 5.4.4 Expériences de rayonnement synchrotron et de diffusion des neutrons

#### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés dans les expériences de rayonnement synchrotron et de diffusion des neutrons pour accueillir des échantillons à haute température (par exemple, métaux, céramiques) pour l'analyse structurale et physique. La température expérimentale est de 1000°C à 2000°C, ce qui nécessite une grande stabilité et une faible interférence de fond.

#### Exigences de performance

Stabilité à haute température : 1500°C à 2000°C sans volatilisation ni décomposition.

Faible bruit de fond : la pureté du tungstène > 99,99 %, ce qui réduit les interférences de diffusion des rayons X ou des neutrons.

Résistance mécanique : résistance à la traction > 600 MPa, résistant à la rupture à haute température.

Précision dimensionnelle : tolérance  $\pm 0,01$  mm, adaptée aux instruments de précision.

Qualité de surface : Ra < 0,1  $\mu$ m, réduisant la contamination de l'échantillon.

#### Avantages technologiques

Faible interférence : le tungstène de haute pureté réduit le bruit de fond de l'expérience et la précision des données > 99,5 %.

Support haute température : Répond aux besoins à haute température du rayonnement synchrotron et de la diffusion des neutrons.

Haute fiabilité : la structure du creuset est stable et la répétabilité expérimentale est > 99 %.

Personnalisation : Prise en charge des creusets micro (10 mm) à moyens (100 mm).

### Défis techniques

Pureté ultra-élevée : 99,999 % de tungstène est nécessaire et le coût de fabrication est élevé.

Volatilisation à haute température : Des traces de volatilisation du tungstène peuvent interférer avec les données et doivent être protégées par des revêtements.

Miniaturisation : Les micro-creusets nécessitent un usinage de haute précision, ce qui est difficile.

Complexité expérimentale : il doit être parfaitement adapté à l'équipement de rayonnement synchrotron.

### 5.5 Aérospatiale et défense

Les creusets en tungstène sont utilisés dans l'aérospatiale et la défense pour la fabrication de composants à haute température, les essais de matériaux et les systèmes de contrôle thermique avec

leur point de fusion élevé et leur résistance mécanique pour répondre aux exigences environnementales extrêmes.

### 5.5.1 Fabrication de tuyères et de chambres de combustion de moteurs-fusées

#### Aperçu de l'application

Le creuset en tungstène est utilisé pour la fusion et le frittage des tuyères de moteurs de fusée et des matériaux de la chambre de combustion pour préparer des composites à matrice de tungstène ou des superalliages, qui peuvent résister à des températures de combustion supérieures à 3000°C.

#### Exigences de performance

Température extrêmement élevée : 2800°C à 3100°C, résistant aux chocs thermiques > 200 fois.

Résistance mécanique : résistance à la traction > 1000 MPa, pour éviter la casse à haute température.

Antioxydant : atmosphère sous vide ou à l'argon, teneur en oxygène < 1 ppm.

Stabilité dimensionnelle : écart d'épaisseur de paroi  $\pm 0,01$  mm, dilatation thermique  $< 4,5 \times 10^{-6}/K$ .

Résistance à l'abrasion : dureté > HV 500, résistance au lavage à l'air à haute température.

#### Avantages technologiques

Résistance aux hautes températures : proche du point de fusion du tungstène, supportant des environnements de combustion extrêmes.

Haute fiabilité : le creuset garantit une pureté de > 99,99 % du matériau et des performances constantes.

Longue durée de vie : 30 à 50 fois réutilisation, réduisant les coûts de production.

Support de grande taille : 300 à 500mm de diamètre pour répondre aux besoins des grands composants.

#### Défis techniques

Stress à haute température : Des microfissures peuvent se produire près du point de fusion et le traitement thermique doit être optimisé.

Risque d'oxydation : l'ultra-vide ou le gaz inerte sont nécessaires, ce qui augmente les coûts.

Difficulté de fabrication : Les creusets en tungstène de haute pureté de grande taille ont un coût élevé et un processus complexe.

Nettoyage complexe : les résidus à haute température doivent être nettoyés en plusieurs étapes, ce qui augmente le processus.

### 5.5.2 Essais de matériaux structuraux à haute température

#### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés pour tester les performances des matériaux structurels à haute température (par exemple, les alliages de tungstène, les composites à matrice céramique) pour les applications aérospatiales, simulant des environnements de moteur ou de rentrée à des températures allant de 2000°C à 3000°C.

### Exigences de performance

Température extrêmement élevée : 2500°C à 3000°C, résistant aux chocs thermiques > 200 fois.  
Chimiquement inerte : ne réagit pas avec les matériaux d'essai, les impuretés < 5 ppm.  
Résistance mécanique : résistance à la compression > 1200 MPa, pour éviter la casse.  
Conductivité thermique : >100 W/m·K pour assurer un chauffage uniforme.  
Taille flexible : 20 à 200 mm de diamètre, adaptée à différentes expériences.

### Avantages technologiques

Support à haute température : proche du point de fusion du tungstène, rencontre la simulation de l'environnement de rentrée.  
Haute fiabilité : les performances du creuset sont stables et la cohérence des données de test > 99,5 %.  
Compatible multi-matériaux : Prend en charge les tests de métal, de céramique et de composite.  
Longue durée de vie : 50 à 80 réutilisations, ce qui réduit le coût des expériences.

### Défis techniques

Déformation à haute température : Une température élevée à long terme peut entraîner une micro-déformation, et la conception doit être optimisée.  
Contamination du matériau : Des traces de volatilisation du tungstène peuvent affecter le test et doivent être protégées par un revêtement.  
Miniaturisation : Les micro-creusets (<20mm) sont difficiles à fabriquer et coûteux.  
Contrôle de l'atmosphère : Un vide de haute pureté ou un gaz inerte est nécessaire, ce qui ajoute de la complexité.

## 5.5.3 Composants d'équipement militaire à haute température

### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés pour la fusion et le frittage de composants d'équipements militaires à haute température, tels que les tuyères de missiles, les matériaux de blindage et les capteurs à haute température, et résistent à 2000°C à 2800°C.

### Exigences de performance

Performance haute température : 2500°C à 2800°C, choc thermique > 200 fois.  
Résistance mécanique : résistance à la traction > 1000 MPa pour éviter la casse.  
Antioxydant : atmosphère sous vide ou à l'argon, teneur en oxygène < 1 ppm.  
Résistance à l'abrasion : dureté > HV 500, résistance à l'érosion à haute température.  
Précision dimensionnelle : tolérance  $\pm 0,01$  mm, adaptée aux pièces de précision.

### Avantages technologiques

Résistance à haute température : support d'environnement militaire extrême, performances stables.  
Haute pureté : le creuset garantit que la pureté du matériau est > 99,99 %, ce qui répond à la norme militaire.  
Longue durée de vie : réutilisation 40 à 60 fois, réduction des coûts de production.  
Personnalisation : Prend en charge les géométries complexes et les petits creusets (<50mm).

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Défis techniques

Stress à haute température : Une montée en puissance et une chute rapides de la température peuvent provoquer des fissures, et le traitement thermique doit être optimisé.

Coût de fabrication : Le prix du creuset en tungstène de haute pureté est élevé et une production à grande échelle est requise.

Nettoyage complexe : Les résidus de matériaux militaires nécessitent un nettoyage spécial pour accélérer le processus.

Exigences de confidentialité : Les applications militaires nécessitent une gestion stricte des données et des processus.

### 5.5.4 Système de contrôle thermique par satellite

#### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés pour le frittage et les tests de matériaux pour les systèmes de contrôle thermique par satellite, et pour la préparation de composites à matrice de tungstène à haute conductivité thermique (tels que le cuivre de tungstène) pour les dissipateurs thermiques et les caloducs, qui peuvent résister à 1000°C à 1500°C.

#### Exigences de performance

Conductivité thermique :  $>120 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , dissipation thermique rapide.

Stabilité chimique : ne réagit pas avec le cuivre, l'argent, etc., les impuretés  $< 10 \text{ ppm}$ .

Précision dimensionnelle : tolérance  $\pm 0,01 \text{ mm}$ , adaptée aux moules de précision.

Qualité de surface :  $Ra < 0,1 \mu\text{m}$ , empêche le matériau de coller.

Résistance aux chocs thermiques :  $> 300$  cycles, pas de fissures.

#### Avantages technologiques

Dissipation thermique efficace : prend en charge les appareils satellites haute puissance avec une résistance thermique de  $< 0,5 \text{ K/W}$ .

Haute fiabilité : le creuset garantit que la pureté du matériau  $> 99,99 \%$ .

Miniaturisation : Support micro creuset ( $< 30\text{mm}$ ) pour s'adapter à la fabrication des caloducs.

Longue durée de vie : 50 à 80 fois la réutilisation, ce qui réduit les coûts.

### Défis techniques

Micro-fabrication : Les petits creusets nécessitent un usinage de haute précision et sont coûteux.

Dilatation thermique : La différence de dilatation thermique entre le tungstène et les matériaux composites peut entraîner des contraintes.

Contamination des surfaces : Un environnement ultra-propre est nécessaire pour prévenir la pollution par les particules.

Contrôle de la consommation d'énergie : Le frittage à haute température a une consommation d'énergie élevée et le processus doit être optimisé.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Tungsten Crucible Introduction

1. Overview of Tungsten Crucibles

Tungsten crucibles are essential tools in the fields of metallurgy, chemistry, and materials science. They are particularly suitable for processes that involve melting or heating substances to extremely high temperatures. Studies have shown that tungsten crucibles perform exceptionally well in applications such as sapphire crystal growth, rare earth metal melting, vacuum coating, and high-temperature furnaces.

2. Features of Tungsten Crucibles

Ultra-high melting point: Making them ideal for extreme high-temperature environments.

High purity: purity of  $\geq 99.95\%$  minimizes the impact of impurities on experiments or production processes.

Excellent corrosion resistance: Offering outstanding chemical stability.

High density and low vapor pressure: Ensuring material stability.

High strength and wear resistance: Ensuring long service life.

Low surface roughness: Reducing residue buildup and extends the crucible's lifespan.

3. Applications of Tungsten Crucibles

**Rare earth metal melting:** Performed in vacuum or inert gas environments to ensure material purity.

**Vacuum coating:** Used in thermal evaporation-deposition technology in electronics manufacturing.

**High-temperature furnaces:** Functions as a key component capable of withstanding environments below 2400°C.

**Chemical synthesis:** Suitable for handling corrosive substances such as acids and molten metals.

**Metal smelting and refining:** Used for melting and refining high-purity metals.

**Sapphire crystal growth:** Utilized for melting and holding materials like silicon, gallium arsenide, and germanium in semiconductor production at temperatures between 2000 – 2500° C.

4. Specifications of Tungsten Crucibles

Specification	Details
Material	Pure tungsten or tungsten alloy
Purity	99.95%
Diameter	20–620 mm
Height	20–500 mm
Wall Thickness	3.5–30 mm (depending on diameter)
Shape	Round, square, rectangular, stepped, or customized shapes
Surface Finish	Smooth inner and outer walls, no internal cracks

5. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten.com.cn](http://www.tungsten.com.cn)

Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

## 5.6 Industrie de l'énergie

Les creusets en tungstène sont utilisés dans l'industrie de l'énergie dans les réacteurs nucléaires, le photovoltaïque, les piles à combustible et la fusion nucléaire, où leurs performances à haute température et leur résistance aux radiations répondent aux exigences strictes de la technologie énergétique.

### 5.6.1 Composants à haute température des réacteurs nucléaires

#### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés pour la fusion et le frittage de composants à haute température de réacteurs nucléaires (tels que les barres de contrôle et les échangeurs de chaleur) pour préparer des matériaux à base de tungstène, qui peuvent résister à 2000°C à 2800°C et à des environnements à fort rayonnement.

#### Exigences de performance

Température extrêmement élevée : 2500°C à 2800°C, > 200 fois de choc thermique.

Résistance aux rayonnements : Résistant aux rayonnements neutroniques et gamma, atténuation des performances < 5 % (10 ans).

Stabilité chimique : ne réagit pas avec le sodium ou l'uranium fondu, les impuretés < 5 ppm.

Résistance mécanique : résistance à la traction > 1000 MPa pour éviter la casse.

Stabilité dimensionnelle : écart d'épaisseur de paroi  $\pm 0,01$  mm, dilatation thermique  $< 4,5 \times 10^{-6}/K$ .

#### Avantages technologiques

Résistance aux hautes températures : soutenir l'environnement extrême des réacteurs nucléaires et des performances stables.

Résistance aux radiations : Résistant aux rayonnements de haute énergie, adapté aux applications d'énergie nucléaire.

Longue durée de vie : 30 à 50 fois réutilisation, réduisant les coûts de production.

Haute pureté : le creuset garantit que la pureté du matériau > 99,99 %.

#### Défis techniques

Vieillesse par rayonnement : Un rayonnement élevé peut entraîner une détérioration du matériau, et le temps d'exposition doit être contrôlé.

Risque d'oxydation : Un vide poussé ou un gaz inerte est nécessaire pour éviter l'oxydation.

Difficulté de fabrication : Le coût de production du creuset en tungstène de haute pureté est élevé et le processus est complexe.

### 5.6.2 Fabrication de matériaux solaires photovoltaïques

#### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés dans le frittage et la fusion de matériaux solaires photovoltaïques, tels que les cellules solaires à pérovskite, et résistent à des températures élevées de 1000°C à 1500°C.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Exigences de performance

Performance à haute température :  $>1200^{\circ}\text{C}$ , forte stabilité.

Chimiquement inerte : ne réagit pas avec les matériaux pérovskites, les impuretés  $< 5$  ppm.

Précision dimensionnelle : tolérance  $\pm 0,01$  mm, adaptée aux moules de précision.

Qualité de surface :  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ , empêche la contamination du matériau.

### Avantages technologiques

Stabilité à haute température : soutenir la fabrication de matériaux photovoltaïques à haut rendement, et les performances sont stables.

Haute pureté : le creuset garantit que la pureté du matériau  $> 99,99$  %.

Longue durée de vie : 30 à 50 fois réutilisation, réduisant les coûts de production.

### Défis techniques

Exigences de pureté élevées : Le creuset doit maintenir une pureté élevée pour éviter la contamination.

Contrôle de la température élevée : Un système de contrôle précis de la température est nécessaire pour éviter la surchauffe.

Fabrication miniaturisée : les petits creusets sont difficiles et coûteux à fabriquer.

## 5.6.3 Fabrication des composants des réacteurs à fusion nucléaire

### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés pour le frittage et la fusion des composants des réacteurs à fusion nucléaire, tels que le matériau de la première paroi des réacteurs tokamaks, et sont soumis à des températures et à des radiations extrêmement élevées.

### Exigences de performance

Température extrêmement élevée :  $2800^{\circ}\text{C}$  à  $3000^{\circ}\text{C}$ , résistant aux chocs thermiques  $> 500$  fois.

Résistance aux rayonnements : résistance aux rayonnements neutroniques, atténuation  $< 2$  % (100 ans).

Résistance mécanique : résistance à la traction  $> 1200$  MPa, pour éviter la casse.

Stabilité chimique : ne réagit pas avec le deutérium et le tritium, et les impuretés  $< 5$  ppm.

Précision dimensionnelle : tolérance  $\pm 0,01$  mm, adapté à la conception de précision.

### Avantages technologiques

Température extrêmement élevée : proche du point de fusion du tungstène, soutenant l'environnement de fusion.

Résistance aux rayonnements : Résistant aux rayonnements neutroniques, adapté à une utilisation à long terme.

Haute pureté : le creuset garantit que la pureté du matériau  $> 99,99$  %.

Longue durée de vie : 50 à 100 fois la réutilisation, ce qui réduit les coûts de production.

### Défis techniques

Stress à haute température : Une utilisation à long terme peut entraîner des contraintes thermiques

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

et la conception structurelle doit être optimisée.

Effets des rayonnements : Les rayonnements neutroniques ont un impact plus important sur les performances du creuset.

#### 5.6.4 Matériaux des réacteurs de fusion nucléaire

##### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés pour la fusion et le frittage de matériaux de réacteurs de fusion nucléaire tels que les matériaux de revêtement au plasma à base de tungstène, les PFM, et résistent à 2500°C à 3000°C et à de forts impacts de plasma.

##### Exigences de performance

Température extrêmement élevée : 2800°C à 3000°C, résistant aux chocs thermiques > 200 fois.

Résistance aux radiations : Résistance aux bombardements de neutrons et de plasma, atténuation des performances < 3 % (10 ans).

Résistance mécanique : résistance à la traction > 1200 MPa, pour éviter la casse.

Résistance à la corrosion : résistant à l'hélium et au plasma d'hydrogène, le taux de corrosion < 0,005 mm/an.

Stabilité dimensionnelle : écart d'épaisseur de paroi  $\pm 0,01$  mm, dilatation thermique  $< 4,5 \times 10^{-6}/K$ .

##### Avantages technologiques

Résistance à haute température : proche du point de fusion du tungstène pour répondre aux besoins de l'environnement de fusion.

Résistance aux radiations : Le creuset en tungstène assure la stabilité à long terme du matériau et répond aux exigences d'ITER.

Haute pureté : Les impuretés sont introduites < 1 ppm pour garantir les performances PFM.

Longue durée de vie : 30 à 50 fois la réutilisation, ce qui réduit les coûts.

##### Défis techniques

Choc plasma : Un plasma fort peut causer des dommages à la surface et nécessite une protection par revêtement.

Stress à haute température : Des microfissures peuvent se produire près du point de fusion et le traitement thermique doit être optimisé.

Coût de fabrication : Le creuset en tungstène de très haute pureté a un prix élevé et doit être produit à grande échelle.

Nettoyage complexe : Les résidus de matériaux de fusion nécessitent un nettoyage spécial pour augmenter le processus.

#### 5.7 Applications émergentes et transversales

Les creusets en tungstène ont montré des avantages uniques dans des domaines émergents tels que la bijouterie haut de gamme, le médical, l'impression 3D et la technologie quantique, élargissant ainsi leurs limites d'application.

##### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### 5.7.1 Joaillerie haut de gamme et fabrication de luxe

#### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés dans la joaillerie haut de gamme et la fabrication de luxe pour fondre les métaux précieux (par exemple, le platine, l'or) et les pierres précieuses synthétiques (par exemple, les diamants synthétiques, les saphirs) et résister à 1400°C à 2000°C.

#### Exigences de performance

Haute pureté : Pureté du tungstène > 99,99 %, impuretés < 10 ppm.

Résistance aux hautes températures : 1600° C à 2000° C, choc thermique > 200 fois.

Finition de surface : Ra < 0,05 μ m, pour éviter l'adhérence du métal.

Précision dimensionnelle : tolérance ± 0,01 mm, adaptée aux moules de précision.

Stabilité chimique : ne réagit pas avec les métaux précieux ou les pierres précieuses.

#### Avantages technologiques

Produit de haute pureté : Le creuset réduit l'introduction d'impuretés à 5 ppm, garantissant ainsi la qualité des bijoux.

Champ thermique uniforme : Améliore la consistance des pierres précieuses et des métaux, et le taux de défauts < 0,1 %.

Longue durée de vie : 50 à 80 fois la réutilisation, ce qui réduit les coûts.

Personnalisation : Prend en charge les creusets de petite taille (20 mm) à moyens (100 mm).

#### Défis techniques

Contamination des surfaces : Un environnement ultra-propre est nécessaire pour prévenir la pollution par les particules.

Volatilisation à haute température : Des traces de volatilisation du tungstène peuvent affecter les pierres précieuses, et une protection du revêtement est nécessaire.

Miniaturisation : Les micro-creusets sont difficiles à fabriquer et coûteux.

Contrôle des coûts : les creusets en tungstène de haute pureté doivent trouver un équilibre entre performances et économie.

### 5.7.2 Production d'implants et de dispositifs médicaux

#### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés pour la fusion et le frittage d'implants médicaux (tels que les alliages de titane, les alliages de cobalt-chrome) et de pièces de dispositifs, la préparation d'implants osseux, de stents cardiaques, etc., et résistent à 1200°C à 1800°C.

#### Exigences de performance

Ultra-haute pureté : Pureté du tungstène > 99,999 %, impuretés < 1 ppb.

Résistance aux hautes températures : 1400°C à 1800°C, choc thermique > 200 fois.

Qualité de surface : Ra < 0,05 μ m, empêche la contamination du matériau.

Stabilité chimique : ne réagit pas avec le titane, le chrome, etc., et < contamination de 1 ppb.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Précision dimensionnelle : tolérance  $\pm 0,01$  mm, adaptée aux moules de précision.

### Avantages technologiques

Biocompatibilité : Le creuset garantit que la pureté du matériau  $> 99,999$  % et répond aux normes médicales.

Champ thermique uniforme : améliore la consistance de l'implant, taux de défauts  $< 0,05$  %.

Longue durée de vie : 60 à 100 fois de réutilisation, ce qui réduit les coûts.

Miniaturisation : Supporte des creusets miniatures ( $< 30$ mm) pour s'adapter aux composants médicaux.

### Défis techniques

Exigences d'ultra-propreté : la production et le nettoyage des salles blanches de classe ISO 3 sont nécessaires.

Volatilisation à haute température : des traces de volatilisation du tungstène peuvent contaminer le matériau et doivent être protégées par un revêtement.

Coût de fabrication : Le creuset en tungstène de très haute pureté a un prix élevé et le processus doit être optimisé.

Hautement réglementé : Les applications médicales sont soumises aux normes FDA et ISO 13485.

### 5.7.3 Moules à haute température dans l'impression 3D et la fabrication additive

#### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés comme moules à haute température dans l'impression 3D et la fabrication additive pour contenir des poudres métalliques (par exemple, titane, alliages de tungstène) pour la fusion sélective par laser (SLM) ou la fusion par faisceau d'électrons (EBM) et résister à  $1500^{\circ}\text{C}$  à  $2200^{\circ}\text{C}$ .

#### Exigences de performance

Performance haute température :  $1800^{\circ}\text{C}$  à  $2200^{\circ}\text{C}$ , choc thermique  $> 300$  fois.

Stabilité chimique : ne réagit pas avec le métal en fusion, les impuretés  $< 10$  ppm.

Finition de surface :  $R_a < 0,1$   $\mu\text{m}$ , empêche l'adhérence de la poudre.

Précision dimensionnelle : Tolérance  $\pm 0,02$  mm, adaptée aux moules de précision.

Résistance à l'abrasion : dureté  $> \text{HV } 400$ , résistance au lavage par poudre.

### Avantages technologiques

Haute précision : le creuset prend en charge des moules géométriques complexes et la précision de moulage  $> 99,5$  %.

Champ thermique uniforme : augmentez la densité des pièces imprimées en 3D de  $> 99,8$  %.

Longue durée de vie : 50 à 80 fois la réutilisation, ce qui réduit les coûts.

Support multi-matériaux : convient pour le tungstène, le titane, le nickel et d'autres poudres.

### Défis techniques

Contamination de la poudre : La poudre fondue peut adhérer au creuset et doit être recouverte ou nettoyée.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Stress à haute température : Une montée en puissance et une chute rapides de la température peuvent provoquer des fissures, et le traitement thermique doit être optimisé.

Miniaturisation : Les micro-moules (< 50mm) sont difficiles à fabriquer et coûteux.

Consommation d'énergie élevée : L'impression 3D à haute température consomme beaucoup d'énergie et le processus doit être optimisé.

#### 5.7.4 La technologie quantique et la préparation des matériaux supraconducteurs

##### Aperçu de l'application

Les creusets en tungstène sont utilisés dans la synthèse et le frittage de la technologie quantique et des matériaux supraconducteurs (tels que l'yttrium-baryum-cuivre-oxygène, YBCO), pour la préparation de puces d'informatique quantique et de bobines supraconductrices, qui résistent à 1200°C à 1800°C.

##### Exigences de performance

Ultra-haute pureté : pureté du tungstène > 99,9999 %, impuretés < 0,1 ppb.

Résistance aux hautes températures : 1400°C à 1800°C, choc thermique > 200 fois.

Finition de surface : Ra<0,05µm, empêche la contamination du matériau.

Stabilité chimique : Ne réagit pas avec les oxydes ou le cuivre, contamination < 0,5 ppb.

Précision dimensionnelle : la tolérance ± 0,01 mm, adaptée aux expériences de précision.

##### Avantages technologiques

Ultra-haute pureté : le creuset introduit des impuretés jusqu'à 0,05 ppb, répondant ainsi aux exigences des puces quantiques.

Champ thermique uniforme : améliore la consistance des matériaux supraconducteurs et le taux de défauts < 0,01 %.

Longue durée de vie : 60 à 100 fois de réutilisation, ce qui réduit les coûts.

Miniaturisation : Support creuset miniature (<20mm) pour s'adapter aux dispositifs quantiques.

##### Défis techniques

Exigences d'ultra-pureté : la production et le nettoyage des salles blanches de classe ISO 3 sont nécessaires.

Volatilisation à haute température : des traces de volatilisation du tungstène peuvent contaminer le matériau et doivent être protégées par un revêtement.

Coût de fabrication : Le creuset en tungstène de très haute pureté a un prix élevé et le processus doit être optimisé.

Complexité expérimentale : il doit être parfaitement associé à un équipement supraconducteur, ce qui augmente la difficulté.



CTIA GROUP Ltd Creusets en tungstène

## Chapitre 6 Avantages, inconvénients et défis du creuset en tungstène

Les creusets en tungstène sont largement utilisés dans les domaines à haute température en raison de leurs excellentes propriétés, mais ils sont également confrontés à des défis de fabrication et d'application. Ce chapitre analyse ses forces, ses limites et ses points à améliorer.

### 6.1 Analyse de l'avantage du creuset en tungstène

#### 6.1.1 Point de fusion ultra-élevé et stabilité thermique

Caractéristiques : Point de fusion du tungstène 3422 °C, coefficient de dilatation thermique  $4,5 \times 10^{-6}/K$ , 3000 °C maintient toujours la stabilité structurelle.

Avantages : Résistant à la chaleur extrême, cycles de chocs thermiques > 500 fois, adapté à la fusion nucléaire, à l'aérospatiale, etc.

Application : Croissance du silicium monocristallin, fusion de superalliage, champ thermique uniforme, taux de déformation <0,1 %.

#### 6.1.2 Excellente inertie chimique

Caractéristiques : Résistant aux acides et aux alcalis, au métal en fusion et aux gaz réactifs, taux de corrosion < 0,01 mm/an.

Avantages : Ne réagit pas avec le silicium fondu, le gallium, le platine, etc., et les impuretés sont introduites dans <1 ppb.

Application : croissance cristalline semi-conductrice, raffinage chimique de haute pureté, pureté > 99,999 %.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### 6.1.3 Haute fiabilité et longue durée de vie

Caractéristiques : résistance à la traction > 800 MPa, dureté > HV 400, durée de vie 50-100 fois.

Avantages : Performances stables en cas d'utilisation répétée, consistance des lots > 99,5 %.

Application : Production de plaquettes de silicium photovoltaïque, synthèse de catalyseurs, réduction des coûts de remplacement.

### 6.1.4 Capacité d'adaptation à des environnements extrêmes

Caractéristiques : Résistant aux radiations et aux impacts plasma, atténuation des performances <5 % (10 ans).

Avantages : Prend en charge des conditions extrêmes telles que les réacteurs nucléaires et les simulations d'atmosphère planétaire.

Application : matériau PFM de fusion nucléaire, test aérospatial à haute température, fonctionnement stable > 1000 heures.

## 6.2 Limites et défis des creusets en tungstène

### 6.2.1 Coûts de fabrication et de traitement élevés

Problème : Les creusets en tungstène de haute pureté nécessitent un frittage complexe et un usinage CNC, et leur coût est 5 à 10 fois supérieur à celui des creusets ordinaires.

Impact : Difficile pour les petites et moyennes entreprises, période de récupération de 3 à 5 ans.

Défi : Le processus doit être optimisé pour réduire les coûts de matières premières et d'énergie.

### 6.2.2 Fragilité et difficulté de traitement à température ambiante

Problème : Le tungstène a une dureté élevée (HV 400) à température ambiante, est facile à casser et des outils diamantés sont nécessaires pour le traitement.

Impact : Les creusets micro ou complexes sont difficiles à traiter, avec un taux de rebut de >5 %.

Défi : Développer des alliages de tungstène avec une ténacité plus élevée ou de nouvelles technologies de traitement.

### 6.2.3 Restrictions relatives à la fabrication des creusets de grande taille

Problème : Un creuset d'un diamètre de >500 mm nécessite un grand four de frittage, et l'uniformité de l'épaisseur de la paroi  $\pm 0,05$  mm est difficile à garantir.

Impact : Cycle de production long, multiplication des coûts, limitation des applications photovoltaïques et métallurgiques.

Défi : Améliorer l'équipement de frittage et améliorer la consistance des grands creusets.

### 6.2.4 Approvisionnement en matières premières et risques géopolitiques

Problème : Le minerai de tungstène est concentré à l'échelle mondiale, l'offre est affectée par la géopolitique et le prix fluctue de > 20 %.

Impact : Les pénuries de matières premières peuvent perturber la production et les coûts sont incontrôlables.

Défi : Mettre en place un système de recyclage pour réduire la dépendance aux minerais bruts.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### 6.3 Direction d'amélioration du creuset en tungstène

#### 6.3.1 Optimisation des coûts et production à grande échelle

Direction : Adoptez une chaîne de montage automatique et la récupération de la chaleur résiduelle pour réduire la consommation d'énergie de 20 % à 30 %.

L'objectif : réduire les coûts de production à 50 % du niveau actuel et réduire la période d'amortissement à 2 ans.

Technologie : Four de frittage modulaire, optimisation des paramètres de processus par l'IA.

#### 6.3.2 Développement de nouveaux matériaux et procédés composites

Direction : Recherche et développement d'alliages à haute entropie à base de tungstène et de matériaux composites tungstène-céramique, avec une augmentation de 30 % de la ténacité.

Objectif : Réduire la fragilité à température ambiante et prolonger la durée de vie jusqu'à 150 fois.

Technologie : frittage de poudre de nano tungstène, creuset composite d'impression 3D.

#### 6.3.3 Amélioration de la précision et de l'efficacité de l'usinage

Direction : Le traitement au laser, la CNC ultra-précise est introduite et la tolérance  $\pm 0,005$  mm.

Objectif : Taux de rebut réduit à  $<2$  % et efficacité de traitement augmentée de 50 %.

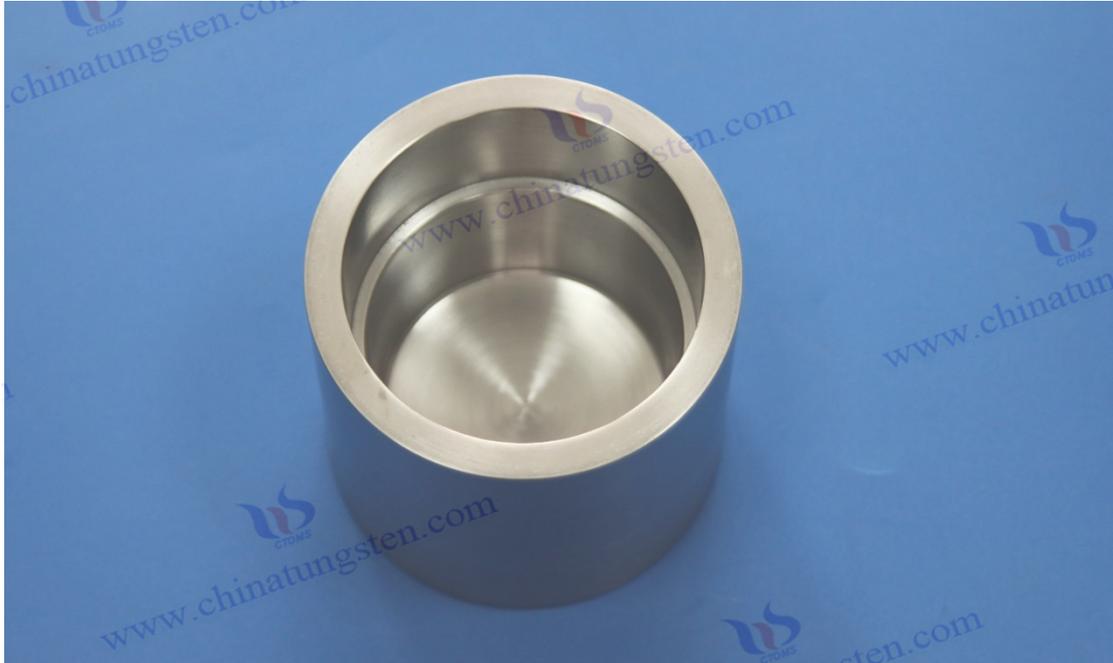
Technologie : Traitement assisté par robot, système de détection en temps réel.

#### 6.3.4 Fabrication intelligente et automatisée

Direction : Intégrez l'Internet des objets et l'IA, surveillez la température et la pression en temps réel, et l'erreur est de  $<1$  %.

Objectif : 30 % d'augmentation de l'efficacité de la production et 99,9 % > constance de la qualité.

Technologie : ligne de production en réseau 5G, système de prise de décision basé sur les données.



CTIA GROUP Ltd Creuset en tungstène

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés 电话/TEL :0086 592 512 9696  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版 CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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

CTIA GROUP LTD

Tungsten Crucible Introduction

1. Overview of Tungsten Crucibles

Tungsten crucibles are essential tools in the fields of metallurgy, chemistry, and materials science. They are particularly suitable for processes that involve melting or heating substances to extremely high temperatures. Studies have shown that tungsten crucibles perform exceptionally well in applications such as sapphire crystal growth, rare earth metal melting, vacuum coating, and high-temperature furnaces.

2. Features of Tungsten Crucibles

Ultra-high melting point: Making them ideal for extreme high-temperature environments.

High purity: purity of  $\geq 99.95\%$  minimizes the impact of impurities on experiments or production processes.

Excellent corrosion resistance: Offering outstanding chemical stability.

High density and low vapor pressure: Ensuring material stability.

High strength and wear resistance: Ensuring long service life.

Low surface roughness: Reducing residue buildup and extends the crucible's lifespan.

3. Applications of Tungsten Crucibles

**Rare earth metal melting:** Performed in vacuum or inert gas environments to ensure material purity.

**Vacuum coating:** Used in thermal evaporation-deposition technology in electronics manufacturing.

**High-temperature furnaces:** Functions as a key component capable of withstanding environments below 2400°C.

**Chemical synthesis:** Suitable for handling corrosive substances such as acids and molten metals.

**Metal smelting and refining:** Used for melting and refining high-purity metals.

**Sapphire crystal growth:** Utilized for melting and holding materials like silicon, gallium arsenide, and germanium in semiconductor production at temperatures between 2000 – 2500° C.

4. Specifications of Tungsten Crucibles

Specification	Details
Material	Pure tungsten or tungsten alloy
Purity	99.95%
Diameter	20–620 mm
Height	20–500 mm
Wall Thickness	3.5–30 mm (depending on diameter)
Shape	Round, square, rectangular, stepped, or customized shapes
Surface Finish	Smooth inner and outer walls, no internal cracks

5. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten.com.cn](http://www.tungsten.com.cn)

Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

## Chapitre 7 Précautions d' utilisation du creuset en tungstène

L'utilisation de creusets en tungstène doit suivre strictement les spécifications pour garantir la sécurité, l'efficacité et la longévité. Ce chapitre décrit les exigences en matière d'installation, d'environnement, de maintenance et de dépannage.

### 7.1 Spécifications d'installation et de fonctionnement du creuset en tungstène

#### 7.1.1 Inspection et préparation des creusets avant l'installation

Inspection : Pas de fissures et de rayures sur la surface visuelle, et la tolérance dimensionnelle  $\pm 0,01$  mm.

Nettoyage : Nettoyage par ultrasons (40 kHz) à l'éthanol de haute pureté avec un  $< 0,1$   $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ .

Préparation : Assurez-vous que le four est propre, que le vide est de  $< 10^{-5}$  Pa et que la pureté du gaz inerte est  $> 99,999$  %.

Installation : Avec une pince spéciale, le contrôle de la force  $< 500$  N pour éviter les dommages mécaniques.

#### 7.1.2 Procédures de sécurité en fonctionnement à haute température

Protection : Portez des gants et des lunettes résistants aux hautes températures et isolez la zone d'opération.

Contrôle de la température : vitesse de chauffage  $5-15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , maximum  $3000^{\circ}\text{C}$ , erreur  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Surveillance : Enregistrement en temps réel de la température et de la pression, réponse anormale à l'alarme  $< 1$  seconde.

Urgence : Équipé d'un système d'extinction d'incendie, refroidir  $> 2$  heures après la panne de courant avant d'ouvrir le four.

#### 7.1.3 Prévenir les contraintes thermiques et les dommages mécaniques

Stress thermique : Montée et descente de la température par étapes, temps d'hydratation de 2 à 12 heures, cycle de choc thermique  $< 500$  fois.

Dommages mécaniques : Éviter les chocs avec des objets durs, force de serrage  $< 300$  N.

Protection : L'utilisation d'un joint en céramique réduit la contrainte de contact et le taux de déformation  $< 0,1$  %.

### 7.2 Exigences environnementales pour l'utilisation de creusets en tungstène

#### 7.2.1 Contrôle de la température et de l'atmosphère

Température :  $1500-3000^{\circ}\text{C}$ , précision du contrôle de la température  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , uniformité du champ thermique  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Atmosphère : vide ( $10^{-6}$  Pa) ou argon de haute pureté (teneur en oxygène  $< 1$  ppm).

Surveillance : Thermomètre infrarouge (précision  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ), analyseur de gaz (précision  $\pm 0,01$  ppm).

#### 7.2.2 Éviter tout contact avec des matériaux incompatibles

Contre-indications : agents oxydants puissants (tels que l'acide nitrique), métaux alcalins fondus,

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

pour prévenir la corrosion.

Protection : Revêtement de surface (par ex. SiC, WC), taux de corrosion < 0,005 mm/an.

Isolation : Liner avec du graphite de haute pureté ou de la zircone avec des impuretés introduites < 1 ppb.

### 7.2.3 Prévenir la contamination et l'introduction d'impuretés

Propreté : Utilisé dans une salle blanche de classe ISO 4 avec un < de particules de 0,1 µm.

Nettoyage : Eau déminéralisée par ultrasons (conductivité < 1 µS/cm) avant chaque utilisation.

Stockage : Scellé sous vide, humidité < 30 %, empêche l'oxydation ou l'adsorption.

## 7.3 Entretien du creuset en tungstène pendant l'utilisation

### 7.3.1 Inspection et nettoyage réguliers

Inspection : Après 10 utilisations, vérifiez les fissures et les déformations avec une résolution de microscope de < 1 µm.

Nettoyage : Ultrasons (40-80 kHz) + détergent neutre avec < résidu de 0,05 µg/cm<sup>2</sup>.

Fréquence : Nettoyez après chaque utilisation et vérifiez soigneusement tous les mois.

### 7.3.2 Surveillance des dommages de surface et des fissures

Surveillance : Balayage laser (précision ± 0,01 mm), détection de fissures > 0,1 mm.

Journal : Profondeur des dégâts, localisation, période d'archivage > 5 ans.

Traitement : Meulage à dommages mineurs (Ra < 0,1 µm), rebut de fissures sévères.

### 7.3.3 Évaluation et optimisation de la durée de vie

Évaluation : Enregistrez le nombre d'utilisations, la température, l'atmosphère et < 5 % d'erreur de prédiction de la durée de vie.

Optimisation : Ajustez la vitesse de rampe (< 10°C/min) pour prolonger la durée de vie à 80 fois.

Remplacement : Remplacer lorsque la perte d'épaisseur de la paroi > de 10 % ou que la fissure > de 0,2 mm.

## 7.4 Dépannage du creuset en tungstène

### 7.4.1 Problèmes courants (fissures, déformation, contamination)

Fissure : En raison d'une contrainte thermique ou d'un impact mécanique, la longueur > 0,1 mm.

Déformation : L'écart d'épaisseur de paroi à haute température > 0,05 mm, ce qui affecte le champ thermique.

Contamination : Les résidus de surface > 0,1 µg/cm<sup>2</sup>, affectant la pureté du matériau.

### 7.4.2 Méthodes de diagnostic et de réparation des défauts

Diagnostic : Contrôle non destructif aux rayons X (résolution < 0,01mm) pour analyser la profondeur de la fissure.

Réparation : Meulage de fissures mineures + revêtement, recalibrage du creuset de déformation (tolérance ± 0,02 mm).

Traitement de la contamination : nettoyage en plusieurs étapes (ultrasons + décapage) avec <

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

résiduel de 0,01 µg/cm<sup>2</sup>.

#### 7.4.3 Procédures d'intervention d'urgence et d'arrêt

Urgence : Arrêtez immédiatement la fournaise si des fissures ou des fuites sont détectées et laissez refroidir pendant > 2 heures.

Arrêt : Mise hors tension, gaz argon (> 99,999 %), pression 0,1 MPa.

Enregistrements : temps de défaillance, causes et mesures de traitement, et durée d'archivage > 5 ans.



CTIA GROUP Ltd Creuset en tungstène

### Chapitre 8 Transport et stockage des creusets en tungstène

En tant que conteneur métallique précieux et performant, les creusets en tungstène nécessitent des mesures de gestion spéciales pendant le transport et le stockage afin de s'assurer que les produits ne sont pas physiquement endommagés, corrodés ou d'autres problèmes de qualité avant et après la livraison. Ce chapitre présentera les spécifications de fonctionnement de base et les précautions à suivre dans le processus de circulation des creusets en tungstène.

#### 6.1 Exigences relatives au transport des creusets en tungstène

Le creuset en tungstène doit être évité autant que possible des vibrations sévères, des collisions et des compressions pendant le transport afin d'éviter la déformation, la rupture ou les rayures de surface. À cette fin, l'emballage de transport doit être fabriqué dans des matériaux solides, secs et résistants aux chocs, tels que des boîtes en bois, des coussinets en mousse, des coussinets souples, etc. Dans le même temps, des panneaux d'avertissement tels que « fragile » et « ne pas peser » doivent être clairement indiqués pour attirer l'attention du personnel de transport.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés 电话/TEL :0086 592 512 9696  
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版 CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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

S'il s'agit d'un transport longue distance ou d'un transbordement multiple, il est recommandé d'utiliser une boîte en bois spéciale ou une boîte métallique pour l'emballage, et de définir une couche tampon à l'intérieur du colis pour absorber les chocs externes. De plus, il doit être évité pendant le transport pour éviter de le mélanger avec des marchandises corrosives, humides ou volatiles afin d'éviter les dommages chimiques.

### **6.2 Conditions de stockage du creuset en tungstène**

Lors du stockage du creuset en tungstène, il doit être placé dans un environnement sec, ventilé et propre, et éviter la lumière directe du soleil et une humidité élevée pour éviter l'oxydation de surface ou la rouille due à l'humidité. Le lieu de stockage doit être éloigné des produits chimiques corrosifs tels que les acides forts, les alcalis forts et les sels pour éviter les réactions de contact.

Lorsqu'il est stocké dans l'entrepôt, le creuset en tungstène doit être placé dans son emballage d'origine ou enveloppé dans un matériau souple pour éviter les rayures sur la surface. Pour un stockage à long terme, il est conseillé d'inspecter régulièrement pour s'assurer que l'emballage est en bon état et que l'humidité ambiante est correctement contrôlée.

### **6.3 Précautions de manipulation des creusets en tungstène**

Lors de la manipulation de creusets en tungstène, ils doivent être manipulés avec précaution pour éviter toute manipulation brutale. Pour les creusets plus grands, des outils auxiliaires tels que des courroies de levage et des camions doivent être utilisés pour assurer la sécurité des personnes et des produits. Dans le même temps, la manipulation doit être effectuée par du personnel qui connaît les caractéristiques du produit afin d'éviter les dommages causés par un mauvais fonctionnement.

Lors du retrait du creuset en tungstène de l'emballage de transport, il faut d'abord s'assurer que la structure de l'emballage est stable pour éviter tout glissement accidentel ou tout dommage causé par un déballage accidentel.

### **6.4 Documentation et marquage du creuset en tungstène**

Afin de renforcer la gestion, chaque lot de creuset en tungstène doit être accompagné des registres de transport, des documents d'entreposage et des étiquettes de produit nécessaires, y compris le modèle, la quantité, le numéro de lot de production, la date d'arrivée et d'autres informations, afin de faciliter la traçabilité ultérieure et la gestion de la qualité. L'étiquette doit être fermement attachée et ne doit pas se détacher ou se brouiller.

### **6.5 Gestion des exceptions du creuset en tungstène**

Si l'emballage est endommagé, si la surface du produit est rayée, déformée, etc., il doit être suspendu immédiatement et le personnel de gestion concerné doit être informé de l'élimination pendant le transport ou le stockage. Si nécessaire, les dommages doivent être signalés ou testés à nouveau selon le processus afin de s'assurer que l'utilisation ultérieure du produit répond aux exigences de qualité de base.



CTIA GROUP Ltd Creuset en tungstène

## Chapitre 9 : Durabilité et recyclage des creusets en tungstène

En tant que composant industriel de grande valeur et résistant aux hautes températures, la durabilité et le recyclage des creusets en tungstène sont cruciaux pour la conservation des ressources, la protection de l'environnement et les avantages économiques. Ce chapitre traite en détail de la gestion du cycle de vie, du recyclage, de la conformité aux réglementations environnementales et des pratiques d'économie circulaire des creusets en tungstène, combiné à l'expérience des entreprises mondiales de produits en tungstène et aux informations sur l'industrie fournies par Chinatungsten Online, analyse les détails techniques, les défis de processus et les orientations de développement futures, et vise à promouvoir la transformation verte de l'industrie des creusets en tungstène.

### 9.1 Gestion du cycle de vie du creuset en tungstène

La gestion du cycle de vie couvre l'ensemble du processus du creuset en tungstène, de l'extraction des matières premières à la production, à l'utilisation et au recyclage, dans le but de réduire l'impact environnemental, d'optimiser l'utilisation des ressources et d'améliorer la durabilité.

#### 9.1.1 Évaluation du cycle complet, de la production à l'utilisation

##### Principe du processus

L'analyse du cycle de vie (ACV) identifie les maillons clés et optimise la conception en quantifiant la consommation de ressources, la consommation d'énergie et les émissions environnementales des creusets en tungstène à chaque étape. Le cycle de vie du creuset en tungstène comprend l'extraction des matières premières, le raffinage, la production, le transport, l'utilisation et le recyclage.

##### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Processus d'évaluation

Extraction de matières premières : extraction de minerai de tungstène (wolframite ou scheelite), pureté d'enrichissement > 99,5 %, consommation d'énergie d'environ 5000 kWh par tonne de concentré de tungstène.

Affinage et production : préparation de poudre de tungstène (pureté >99,999 %), frittage (température 1800-2500°C), consommation d'énergie d'environ 10-15 MWh/tonne de creuset.

Transport : aérien ou maritime, avec une émission moyenne de carbone de 0,5 à 2 kg de CO<sub>2</sub>/tonne · km.

Utilisation : Application à haute température (1500-3000°C), durée de vie 50-100 fois, consommation d'énergie de maintenance d'environ 0,1-0,5 MWh / temps.

Recyclage : Collecte des creusets, nettoyage, broyage et purification chimique, avec une consommation d'énergie d'environ 5 à 8 MWh/tonne.

### Paramètres techniques

Consommation de ressources : 1,5 à 2 tonnes de minerai de tungstène par tonne de creuset, et environ 10 à 15 tonnes de sous-produits (résidus).

Efficacité énergétique : 70 % de la consommation d'énergie dans la phase de production représente l'ensemble du cycle, et 50 % de la consommation d'énergie < la production dans la phase de récupération.

Émissions : Émissions d'environ 20 à 30 tonnes de CO<sub>2</sub> par tonne de production de creuset, et <5 tonnes d'émissions pendant la phase d'utilisation.

Durée du cycle de vie : environ 2 à 5 ans de la production à la mise au rebut, selon la fréquence d'utilisation.

### Avantages et défis

Avantages : L'ACV identifie les liaisons à forte consommation d'énergie (comme le frittage), qui peuvent réduire la consommation d'énergie de 20 % après optimisation ; Prolongez la durée de vie du creuset (> 80 cycles) et réduisez les besoins en ressources.

Défi : Impact environnemental élevé à l'étape de l'extraction et du raffinage, coût élevé du traitement des résidus ; La collecte des données ACV doit être coordonnée tout au long de la chaîne d'approvisionnement, qui est très complexe.

## 9.1.2 Analyse de l'impact environnemental et de l'empreinte carbone

### Principe du processus

L'analyse de l'empreinte carbone quantifie les émissions de gaz à effet de serre des creusets en tungstène tout au long du cycle, combinée à l'évaluation de l'impact environnemental (ressources en eau, sols, écologie) pour fournir une base à la conception verte. L'impact environnemental des creusets en tungstène provient principalement de la production énergivore et de l'extraction minière.

### Analyser le contenu

Empreinte carbone :

Exploitation minière : Le CO<sub>2</sub> est émis environ 5 à 8 tonnes par tonne de concentré de tungstène, et

la source d'énergie est principalement constituée de combustibles fossiles.

Production : Le frittage et le traitement émettent environ 15 à 20 tonnes de CO<sub>2</sub>, et l'électricité en représente >80 %.

Transport : 0,5-1 kg de CO<sub>2</sub>/tonne·km de transport aérien et 0,1-0,2 kg de CO<sub>2</sub>/tonne·km de mer.

Utilisation : Les émissions indirectes (électricité) dues au fonctionnement à haute température sont d'environ 0,05 à 0,2 tonne de CO<sub>2</sub>/temps.

Recyclage : L'épuration chimique émet environ 3 à 5 tonnes de CO<sub>2</sub>, ce qui représente 25 % des émissions de production.

Autres impacts environnementaux :

Ressources en eau : L'enrichissement consomme 50 à 100 m<sup>3</sup> par tonne de concentré de tungstène, et les eaux usées doivent être traitées à <50 mg/L de DCO.

Sol et écologie : En exploitant et en détruisant des terres d'environ 0,1 à 0,5 hm<sup>2</sup>/10 000 tonnes de mine, une restauration écologique est nécessaire.

Déchets solides : les résidus et les déchets de frittage représentent environ 10 à 20 tonnes/tonne de creuset, qui doivent être traités sans danger.

### Paramètres techniques

Empreinte carbone totale : émissions de CO<sub>2</sub> d'environ 25 à 35 tonnes par tonne de cycle du creuset, et l'étape de production représente 60 à 70 %.

Consommation d'eau : 100-200 m<sup>3</sup>/tonne de creuset sur l'ensemble du cycle, 10 m<sup>3</sup> < dans la phase de récupération.

Taux de récupération des déchets solides : Le taux de récupération des résidus est de >50 % et le taux de récupération des creusets de déchets est de >90 %.

Restauration écologique : Le taux de récupération des terres est de > 80 % et la période de restauration est de 3 à 5 ans.

### Avantages et défis

Avantages : L'analyse de l'empreinte carbone guide la production à faible émission de carbone (par exemple, l'utilisation d'énergies renouvelables), ce qui peut réduire les émissions de 15 à 20 % ; Le recyclage des eaux usées permet de réduire la consommation d'eau de 30 %.

Défi : Il est difficile de réduire considérablement la consommation d'énergie de la production de tungstène de haute pureté ; Les données sur les émissions de carbone de la chaîne d'approvisionnement mondiale ne sont pas uniformes et la précision de l'analyse est limitée.

## 9.1.3 Conception et fabrication durables

### Principe du processus

La conception durable réduit la consommation de ressources et l'impact environnemental, prolonge la durée de vie du creuset en tungstène et améliore la recyclabilité en optimisant la sélection des matériaux, les processus de fabrication et la combinaison de produits.

### Mesures de conception

Optimisation des matériaux : L'utilisation de poudre de tungstène de haute pureté (pureté > 99,999 %)

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

réduit les impuretés et améliore la durée de vie du creuset jusqu'à 100 fois.

Conception structurelle : l'uniformité de l'épaisseur de la paroi  $\pm 0,01$  mm, réduire les contraintes thermiques, réduire le taux de fissuration  $< 0,1$  %.

Procédé économe en énergie : frittage plasma (réduction de 20 % de la consommation d'énergie) ou récupération de chaleur résiduelle (augmentation de 15 % de l'efficacité).

Conception modulaire : le creuset est assemblé en sections, ce qui est pratique pour un remplacement partiel et réduit le taux de déchets de 50 %.

Énergie verte : plus de 70 % de l'électricité utilisée pour la production provient de l'énergie éolienne ou solaire, et les émissions de carbone sont réduites de 30 %.

### Technologie de fabrication

Impression 3D : contrôle précis de la forme du creuset, utilisation des matériaux  $> 95$  %, déchets  $< 5$  %.

Frittage automatique : l'IA optimise la courbe de température (erreur  $\pm 1^\circ\text{C}$ ), réduisant ainsi la consommation d'énergie de 10 %.

Traitement de surface : revêtement SiC ou WC (épaisseur 0,05-0,1 mm), améliore la résistance à la corrosion, prolonge la durée de vie de 30 %.

Contrôle qualité : contrôle non destructif par rayons X (résolution  $< 0,01$  mm), taux de défaut  $< 0,05$  %).

### Paramètres techniques

Utilisation des matériaux :  $> 90$  %, ferraille  $< 0,1$  tonne/t de creuset.

Consommation d'énergie : La consommation d'énergie de production  $<$  de 12 MWh/tonne, soit 15 % de moins que le procédé traditionnel.

Durée de vie : Moyenne de 80 à 120 cycles, taux de rebut  $< 5$  %.

Émissions de carbone : la fabrication écologique réduit les émissions de CO<sub>2</sub> à 15-20 tonnes/tonne de creusets.

### Avantages et défis

Avantages : La conception durable prolonge la durée de vie du creuset de 50 % et réduit les émissions de carbone de l'ensemble du cycle de 20 % ; Conception modulaire pour un recyclage facile.

Défi : Investissement élevé dans l'impression 3D et les équipements d'énergie verte, augmentant le coût initial de 20 % ; La stabilité du nouveau processus doit être vérifiée sur une longue période de temps.

## 9.2 Recyclage et réutilisation des creusets en tungstène

Le recyclage et la réutilisation sont au cœur de la durabilité des creusets en tungstène, et les creusets de déchets sont transformés en produits de grande valeur grâce à des processus de recyclage efficaces et à un contrôle de la qualité, réduisant ainsi le gaspillage de ressources.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### 9.2.1 Procédé de recyclage des creusets en tungstène

#### Principe du processus

La récupération des creusets en tungstène extrait le tungstène (pureté > 99,9 %) des creusets de déchets par broyage physique, purification chimique et retraitement pour préparer de nouveaux produits (tels que de la poudre de tungstène, des creusets ou des alliages).

#### Processus de recyclage

Collecte et tri : Les creusets à déchets sont triés par taille (20-500 mm), pureté (>99,9 %) et degré de contamination et transportés vers le centre de recyclage.

Nettoyage : Nettoyage par ultrasons (40-80 kHz), eau déminéralisée (conductivité <1 µS/cm), élimination des résidus < 0,01 µg/cm<sup>2</sup> de la surface.

Concassage : concasseur hydraulique (pression > 100 MPa), granulométrie 0,1-5 mm, efficacité de broyage > 95 %.

Purification chimique :

Lixiviation acide : du HNO<sub>3</sub> ou HCl (concentration 5-10 mol/L) a été utilisé pour dissoudre les impuretés, et le taux de récupération du tungstène était de >98 %.

Précipitations : Le NH<sub>4</sub>OH a été ajouté pour générer du paratungstate d'ammonium (APT) d'une pureté de > 99,95 %.

Calcination : 800-1000°C, WO<sub>3</sub> est généré, teneur en oxygène <0,1 ppm.

Réduction : atmosphère de H<sub>2</sub> (900-1100°C), poudre de tungstène (taille de particule 0,5-5 µm) préparée, pureté > 99,999 %.

Retraitement : frittage ou pressage pour former de nouveaux creusets ou d'autres produits en tungstène.

#### Paramètres techniques

Récupération : Récupération du tungstène >95 % et des impuretés < 10 ppm.

Consommation d'énergie : 5 à 8 MWh/tonne d'énergie de recyclage, représentant 50 % de la consommation d'énergie de production.

Traitement des déchets : Neutraliser les déchets acides à un pH de 6 à 8 avec une <50 mg/L de DCO.

Cycle de traitement : 15 à 30 jours pour la récupération d'un seul lot, avec une capacité de production de 0,5 à 2 tonnes/mois.

#### Avantages et défis

Avantages : Le processus de recyclage réduit les déchets de ressources à <5 % et réduit la demande de minerai brut de 30 % ; La poudre de tungstène de haute pureté peut être utilisée directement dans la production de nouveaux creusets.

Défi : La contamination des creusets de déchets (par exemple, les résidus de silicium, de gallium) augmente la difficulté de purification ; Les coûts de traitement des déchets liquides de purification chimique sont élevés.

### 9.2.2 État actuel et défis de la technologie de recyclage

#### statu quo

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Technologies courantes : hydrométallurgie (lixiviation acide + précipitation) et pyrométallurgie (grillage à haute température + réduction), taux de récupération 90 %-98 %.

Équipement : broyeur automatique (rendement > 95 %), four haute température (contrôle de la température  $\pm 1^\circ\text{C}$ ), système d'échange d'ions (pureté > 99,99 %).

Échelle : La capacité mondiale de recyclage est d'environ 5 000 à 10 000 tonnes / an, ce qui représente 20 % de la demande de produits en tungstène.

Application : Le tungstène recyclé est utilisé dans les creusets, les alliages, les outils durs, et la qualité est proche du tungstène vierge.

### Défis techniques

Séparation des impuretés : Le creuset des déchets contient des traces de silicium, de gallium et de platine, et le coût de séparation représente 30 % du coût de récupération.

Consommation d'énergie élevée : La consommation d'énergie de la purification chimique et de la réduction à haute température est de 5 à 8 MWh/tonne, et le processus doit être optimisé.

Petits creusets : les creusets d'un diamètre de <50 mm sont difficiles à écraser et l'efficacité de récupération est < 90 %.

Traitement des déchets liquides : 0,5 à 1 m<sup>3</sup> de déchets liquides sont générés par tonne de creuset de déchets, et une neutralisation en plusieurs étapes est nécessaire pour les traiter à une dose de DCO < 50 mg/L.

### Direction de l'amélioration

Nouvelles technologies : purification électrochimique (réduction de 20 % de la consommation d'énergie), torréfaction au plasma (augmentation de 15 % de l'efficacité).

Automatisation : l'IA contrôle les paramètres de purification (erreur < 0,1 %), et le taux de récupération est porté à >98 %.

Chimie verte : purification à faible concentration d'acide (<5 mol/L), réduction de 50 % de la quantité de déchets liquides.

Équipement à petite échelle : Développement d'un micro-concasseur, adapté aux creusets de petite taille, avec un rendement de >95 %.

### Paramètres techniques

Efficacité de recyclage : 90 %-98 % actuellement, 99 % >.

Objectif de consommation d'énergie : <5 MWh/tonne, soit 30 % de moins que la situation actuelle.

Rejet de matières résiduelles : <0,3 m<sup>3</sup> /tonne, DCO < 30 mg/L.

Teneur en impuretés : 5 ppm d'impuretés de poudre de tungstène < récupérées pour répondre aux applications de haute pureté.

### Avantages et défis

Avantages : La technologie de recyclage réduit l'extraction du minerai brut de 30 % et l'impact environnemental de 20 % ; La poudre de tungstène de haute pureté répond aux besoins des semi-conducteurs.

Défi : L'industrialisation des nouvelles technologies prend 3 à 5 ans à faire ses preuves ;

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

L'investissement dans les petits équipements de recyclage des creusets est élevé et il est difficile pour les petites et moyennes entreprises de les promouvoir.

### 9.2.3 Contrôle de la qualité des produits recyclés

#### Principe du processus

Le contrôle de la qualité des produits recyclés garantit que les produits en tungstène recyclé (par exemple, les creusets, les alliages) ont les mêmes propriétés (pureté, résistance, longévité) que les produits vierges pour répondre aux besoins des applications de haute technologie.

#### Mesures de contrôle de la qualité

Analyse chimique : l'ICP-MS détecte la pureté de la poudre de tungstène (>99,999 %), les impuretés <1 ppb (Si, Fe, C).

Test physique : analyse granulométrique laser (taille des particules 0,5-5  $\mu$  m), contrôle microscopique de l'uniformité des grains (écart <5 %).

Propriétés mécaniques : résistance à la traction > 800 MPa, dureté > HV 400, chocs thermiques > 500 cycles.

Qualité de surface : rugosité Ra <0,05  $\mu$  m, résidu de surface <0,01  $\mu$  g/cm<sup>2</sup>.

Contrôles non destructifs : TDM à rayons X (résolution <0,01 mm), taux de défauts <0,05 %.

#### Processus de vérification

Test par lot : 10 % à 20 % d'échantillonnage par lot, taux de réussite > 99,5 %.

Test de performance : utilisation simulée à haute température (1500-3000°C), test de durée de vie > 80 fois.

Certification : Conforme aux normes ISO 9001, ASTM B760 (norme pour les produits en tungstène), enregistrements > 5 ans.

Système de traçabilité : la RFID ou la blockchain enregistre le lot de récupération et les paramètres du processus, et le taux de traçabilité > de 99,9 %.

#### Paramètres techniques

Pureté : La pureté du creuset récupéré > de 99,999 %, ce qui est comparable à l'original.

Durée de vie : 80 à 100 fois, ce qui représente 90 % du creuset d'origine.

Taux de défauts : <0,1 %, fissure <0,1 mm.

Précision de détection : 0,1 ppb pour l'analyse chimique <, 0,01  $\mu$  m pour la mesure physique.

#### Avantages et défis

Avantages : Un contrôle de qualité strict garantit que les performances du creuset de recyclage atteignent plus de 90 % de l'original et que le coût est réduit de 30 % ; Les systèmes de traçabilité augmentent la confiance des clients.

Défi : Investissement élevé dans des équipements d'essai de haute précision, représentant 15 % du coût de récupération ; Les impuretés à l'état de traces peuvent affecter les applications de semi-conducteurs et nécessiter une optimisation supplémentaire.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### 9.3 Réglementation environnementale et conformité du creuset en tungstène

La production, le recyclage et l'élimination des déchets de creusets en tungstène sont soumis à des réglementations environnementales internationales et nationales afin de garantir des opérations respectueuses de l'environnement et conformes.

#### 9.3.1 Règlements environnementaux nationaux et internationaux

##### Principe du processus

Les réglementations environnementales réglementent l'extraction des ressources, les émissions de production, le traitement des déchets et le recyclage dans l'industrie des creusets en tungstène, dans le but de réduire les dommages et la pollution écologiques et d'assurer un développement durable.

##### Réglementations internationales

REACH : Règlement de l'UE visant à limiter la production de produits chimiques dangereux (par exemple l'hexafluorure de soufre) avec des < volatils de 0,1 ppm.

RoHS : Limitation des substances toxiques dans les produits en tungstène dans les équipements électroniques, la teneur en plomb et en cadmium < de 0,01 %.

Convention de Bâle : Contrôle du transport transfrontalier de déchets de tungstène, licence d'exportation requise, taux de conformité > 99 %.

ISO 14001 : Système de management environnemental, émissions de carbone, eaux usées, déchets solides nécessitent un audit annuel.

##### Réglementation intérieure

Loi sur la protection de l'environnement de la République populaire de Chine : le taux de traitement des résidus est de > 80 % et la DCO des eaux usées est de < 50 mg/L.

« Loi sur la prévention et le contrôle de la pollution de l'environnement par les déchets solides » : Les creusets de déchets doivent être recyclés séparément et le taux de récupération est > 90 %.

« Loi de Promotion d'une Production Plus Propre » : la consommation d'énergie de production < de 15 MWh/tonne, et l'énergie verte représente >30 %.

« Conditions standard de l'industrie du tungstène » : le taux de récupération minière est de >85 % et le taux de récupération de valorisation est de >90 %.

##### Exigences de mise en œuvre

Processus de conformité : Soumettre une évaluation des incidences sur l'environnement (EIE) avec une période d'approbation de < 3 mois.

Surveillance : Surveillance en ligne des gaz résiduels ( $SO_2 < 200 \text{ mg/m}^3$ ) et des eaux usées (pH 6-9) avec une précision de  $\pm 0,01 \%$ .

Registres : Les données environnementales sont archivées pendant 5 ans > et la transparence > 95 %.

Amende : Une amende de 10 à 1 million de yuans pour décharge illégale sera imposée, et le permis sera révoqué dans les cas graves.

##### Paramètres techniques

Taux d'exécution : > 99,5 %, taux de réussite annuel à l'audit > 98 %.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Norme d'émission :  $\text{CO}_2 < 30$  tonnes/tonne creuset, eaux usées  $< 100 \text{ m}^3/\text{tonne}$ .

Taux de valorisation :  $> 90 \%$  des creusets de déchets,  $> 50 \%$  des résidus.

Fréquence de surveillance : quotidienne pour les gaz résiduels et les eaux usées, mensuelle pour les déchets solides.

#### Avantages et défis

Avantages : Un fonctionnement conforme réduit les risques juridiques et améliore la compétitivité du marché ; La réglementation stimule le développement des technologies vertes.

Défi : Les différences réglementaires entre plusieurs pays augmentent les coûts de conformité ; Les petites et moyennes entreprises ne peuvent pas se permettre le coût de la surveillance à haute fréquence.

### 9.3.2 Normes d'élimination et de déchargement des déchets

#### Principe du processus

Les déchets (résidus, déchets liquides, gaz résiduels) générés par la production et le recyclage des creusets en tungstène doivent être traités conformément aux normes afin de réduire la pollution de l'environnement et de répondre aux exigences en matière d'émissions.

#### Types de ferraille et élimination

Résidus miniers : des scories de déchets d'enrichissement, contenant  $< 0,5 \%$  de tungstène, une membrane imperméable (épaisseur  $> 1 \text{ mm}$ ) sont nécessaires pour le stockage, et le taux de récupération est de  $> 50 \%$ .

Déchets liquides : déchets liquides de décapsulation ( $\text{pH} < 2$ ), neutralisés à  $\text{pH} 6-9$ ,  $\text{DCO} < 50 \text{ mg/L}$ , métaux lourds  $< 0,1 \text{ mg/L}$ .

Gaz résiduels : gaz résiduels de frittage (contenant du  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ), rejetés après désulfuration et dénitrification,  $\text{SO}_2 < 200 \text{ mg/m}^3$ ,  $\text{NO}_x < 100 \text{ mg/m}^3$ .

Déchets solides : les creusets de déchets se fragmentent, le taux de valorisation est de  $> 90 \%$  et la partie non recyclable est mise en décharge sans danger.

#### Technologie de traitement

Résidus : flottation + séparation magnétique,  $50 \%$  du tungstène  $>$  récupéré, et le reste est utilisé pour les matériaux de construction (résistance  $> 10 \text{ MPa}$ ).

Déchets liquides : neutralisation en plusieurs étapes + échange d'ions, taux de recyclage des déchets liquides  $> 80 \%$ .

Gaz d'échappement : désulfuration par voie humide (rendement  $> 95 \%$ ), dénitrification SCR (rendement  $> 90 \%$ ).

Déchets solides : broyage + épuration chimique, taux de récupération du tungstène  $> 95 \%$ , solidification des résidus de déchets (lixiviation des métaux lourds  $< 0,01 \text{ mg/L}$ ).

#### Paramètres techniques

Taux d'élimination des résidus :  $> 80 \%$ , tungstène récupéré  $> 0,3 \%$ .

Rejets de matières résiduelles :  $\text{DCO} < 50 \text{ mg/L}$ , métaux lourds  $< 0,05 \text{ mg/L}$ , taux de

circulation >80 %.

Émissions de gaz résiduels :  $\text{SO}_2 < 150 \text{ mg/m}^3$ ,  $\text{NO}_x < 80 \text{ mg/m}^3$ , particules  $< 10 \text{ mg/m}^3$ .

Taux de valorisation des déchets solides : >90 %, taux d'enfouissement <5 %.

### Avantages et défis

Avantages : un traitement efficace des déchets réduit la pollution de l'environnement de 80 %, le recyclage économise les ressources de 30 % ; Se conformer aux lois et règlements pour améliorer l'image de l'entreprise.

Défi : Investissement élevé dans les équipements de traitement des liquides et des gaz résiduels, représentant 20 % des coûts d'exploitation ; La technologie de récupération des résidus doit être encore optimisée.

### 9.3.3 Certification et vérification de la conformité

#### Principe du processus

La certification et l'audit de conformité vérifient la conformité des entreprises de creusets en tungstène en termes de protection de l'environnement, de qualité et de sécurité, et garantissent la conformité aux réglementations et aux exigences des clients.

#### Type de certification

ISO 14001 : Système de Management Environnemental, couvrant la production, le recyclage, l'élimination des déchets, cycle de certification de 3 ans.

ISO 9001 : Système de gestion de la qualité, pureté du creuset, taux de réussite aux tests de performance > 99,5 %.

OHSAS 18001 : Santé et sécurité au travail, taux d'accidents < 0,1 %, couverture de la formation des employés 100 %.

Certification verte : telle que le label environnemental de la Chine, les émissions de carbone < 25 tonnes / tonne de creuset.

#### Processus d'audit

Audit interne : Inspection trimestrielle des données environnementales et des registres d'élimination des déchets, avec un taux de couverture de > 95 %.

Audit externe : organisme tiers (tel que SGS, TÜV), audit annuel, taux de conformité > 98 %.

Soumission des données : Gaz résiduels, eaux usées, données de rejet de déchets solides, téléchargement en temps réel vers le service de protection de l'environnement, erreur < 1 %.

Rectification : Si des éléments de non-conformité sont constatés, la période de rectification sera < de 30 jours et le taux de réussite de l'examen sera > de 99 %.

#### Paramètres techniques

Taux de réussite à la certification : >98 %, valable 3 à 5 ans.

Fréquence des audits : tous les 3 mois en interne, 1 fois par an en externe.

Précision des données : Surveillance des émissions  $< \pm 0,01 \%$ , archivée > pendant 5 ans.

Taux de rectification : Le taux de rectification des articles non conformes > de 99 %, et le délai de

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

réponse < de 7 jours.

### **Avantages et défis**

Avantages : La certification renforce la confiance du marché et attire les investissements verts ; Les audits permettent d'assurer la conformité et de réduire le risque d'amendes.

Défi : Des frais de certification et d'audit élevés, représentant 10 % des coûts de gestion ; La coordination multistandard augmente la charge administrative.

## **9.4 Pratique de l'économie circulaire du creuset en tungstène**

L'économie circulaire maximise la valeur des creusets en tungstène et réduit le gaspillage des ressources et l'impact environnemental grâce à la gestion en circuit fermé, à la récupération des ressources et à la coopération industrielle.

### **9.4.1 Gestion en boucle fermée des ressources en tungstène**

#### **Principe du processus**

La gestion en boucle fermée intègre la récupération, la réutilisation et la reproduction des creusets en tungstène pour former un système de recyclage des ressources, réduire la dépendance au minerai brut et améliorer l'efficacité des ressources.

#### **Mesures de gestion**

Réseau de recyclage : Mettre en place un point mondial de recyclage des creusets de déchets avec un taux de couverture de > 80 % et une efficacité de collecte de > 90 %.

Chaîne de réutilisation : La poudre de tungstène recyclée est utilisée directement dans de nouveaux creusets, alliages ou outils avec un taux de recyclage de > 70 %.

Plateforme de données : La blockchain enregistre le cycle de vie du creuset (production, recyclage, traitement), et le taux de traçabilité > de 99,9 %.

Chaîne d'approvisionnement verte : Privilégiez l'achat de tungstène recyclé, réduisez l'utilisation de minerai brut de 30 % et > taux de conformité des fournisseurs de 95 %.

#### **Paramètres techniques**

Taux de recyclage : Le taux de recyclage des ressources en tungstène > de 70 % et l'objectif > de 85 %.

Couverture du recyclage : 80 % > les grands marchés et 50 % > les petits et moyens marchés.

Intégrité des données : les données du cycle de vie sont archivées pendant > 5 ans, avec une erreur de < 0,1 %.

Dépendance au minerai brut : réduction de 30 % à 50 %, capacité d'extraction < 5000 tonnes/an.

### **Avantages et défis**

Avantages : La gestion en boucle fermée réduit la consommation de ressources de 30 % et les émissions de carbone de 20 % ; La plateforme de données améliore l'efficacité de la chaîne d'approvisionnement de 25 %.

Défi : Il faut 5 à 10 ans pour construire un réseau mondial de recyclage, avec un investissement

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

initial élevé ; La qualité inégale du creuset de récupération doit être normalisée.

#### 9.4.2 Analyse des retombées économiques du recyclage

##### Principe du processus

Les avantages économiques du recyclage permettent de développer durablement l'industrie des creusets en tungstène en réduisant le coût des matières premières, en réduisant les dépenses de traitement de l'environnement et en créant de nouvelles sources de revenus.

##### Analyse des avantages

Économie de coûts : Le coût du tungstène recyclé est d'environ 50 % à 60 % du tungstène vierge, ce qui permet d'économiser 0,5 à 10 000 yuans par tonne.

Coûts environnementaux : réduire le traitement des résidus et des déchets liquides, économiser 20 % à 30 % des coûts de protection de l'environnement, environ 0,1-030000 yuans / tonne.

Nouveaux revenus : ventes de poudre de tungstène recyclée, marge bénéficiaire de 10 à 15 %, revenus annuels allant jusqu'à 50 millions de yuans (entreprises de taille moyenne).

Retour sur investissement : La période d'amortissement de l'équipement de recyclage est de 3 à 5 ans et la valeur actuelle nette (VAN) est de >0.

##### Paramètres techniques

Réduction des coûts : le coût du recyclage des creusets < de 80 000 yuans/tonne et le coût d'origine > de 150 000 yuans/tonne.

Marge bénéficiaire : La marge bénéficiaire sur la vente de produits recyclés > de 10 % et la marge bénéficiaire globale >8 %.

Échelle d'investissement : Investissement dans une ligne de recyclage de taille moyenne de 0,5 à 100 millions de yuans, capacité de production de 500 à 1000 tonnes / an.

Période de récupération : 3 à 5 ans, taux de rendement interne (TRI) >15 %.

##### Avantages et défis

Avantages : le recyclage permet de réduire les coûts de production de 30 % et d'améliorer la compétitivité des entreprises ; De nouvelles sources de revenus, des modèles de profit diversifiés.

Défi : L'investissement initial dans les équipements de recyclage est élevé et la pression financière des petites et moyennes entreprises est élevée ; L'acceptation des produits recyclés par le marché doit être améliorée.

CTIA GROUP LTD

Tungsten Crucible Introduction

1. Overview of Tungsten Crucibles

Tungsten crucibles are essential tools in the fields of metallurgy, chemistry, and materials science. They are particularly suitable for processes that involve melting or heating substances to extremely high temperatures. Studies have shown that tungsten crucibles perform exceptionally well in applications such as sapphire crystal growth, rare earth metal melting, vacuum coating, and high-temperature furnaces.

2. Features of Tungsten Crucibles

Ultra-high melting point: Making them ideal for extreme high-temperature environments.

High purity: purity of  $\geq 99.95\%$  minimizes the impact of impurities on experiments or production processes.

Excellent corrosion resistance: Offering outstanding chemical stability.

High density and low vapor pressure: Ensuring material stability.

High strength and wear resistance: Ensuring long service life.

Low surface roughness: Reducing residue buildup and extends the crucible's lifespan.

3. Applications of Tungsten Crucibles

**Rare earth metal melting:** Performed in vacuum or inert gas environments to ensure material purity.

**Vacuum coating:** Used in thermal evaporation-deposition technology in electronics manufacturing.

**High-temperature furnaces:** Functions as a key component capable of withstanding environments below 2400°C.

**Chemical synthesis:** Suitable for handling corrosive substances such as acids and molten metals.

**Metal smelting and refining:** Used for melting and refining high-purity metals.

**Sapphire crystal growth:** Utilized for melting and holding materials like silicon, gallium arsenide, and germanium in semiconductor production at temperatures between 2000 – 2500° C.

4. Specifications of Tungsten Crucibles

Specification	Details
Material	Pure tungsten or tungsten alloy
Purity	99.95%
Diameter	20–620 mm
Height	20–500 mm
Wall Thickness	3.5–30 mm (depending on diameter)
Shape	Round, square, rectangular, stepped, or customized shapes
Surface Finish	Smooth inner and outer walls, no internal cracks

5. Purchasing Information

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com); Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: [www.tungsten.com.cn](http://www.tungsten.com.cn)

Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### 9.4.3 Coopération industrielle et modèles d'économie circulaire

#### Principe du processus

La coopération industrielle construit un écosystème d'économie circulaire en intégrant les entreprises en amont et en aval, les gouvernements et les institutions de recherche scientifique pour promouvoir la production et le recyclage durables des creusets en tungstène.

#### Modèle de coopération

Coopération entre l'industrie, l'université et la recherche : développer des technologies de récupération à haut rendement (telles que la purification électrochimique) avec des universités et des instituts de recherche, et augmenter le taux de récupération à >99 %.

Alliance de la chaîne d'approvisionnement : Coopérer avec les mineurs, les producteurs et les recycleurs pour établir une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée, avec un taux d'utilisation des ressources de > 80 %.

Soutien politique : coopérer avec le gouvernement pour obtenir des subventions au recyclage (0,1 à 05 000 yuans/tonne), une réduction des taxes > 10 %.

Norme industrielle : Formuler des spécifications de récupération du creuset en tungstène (telles que la pureté > 99,99 %, les impuretés < 5 ppm) et le taux de promotion > 90 %.

#### Paramètres techniques

Couverture de la coopération : 70 % des membres de l'alliance sectorielle > et 50 % des petites et moyennes entreprises >.

Taux de récupération : 85 % > projets pilotes, et 70 % > moyenne de l'industrie.

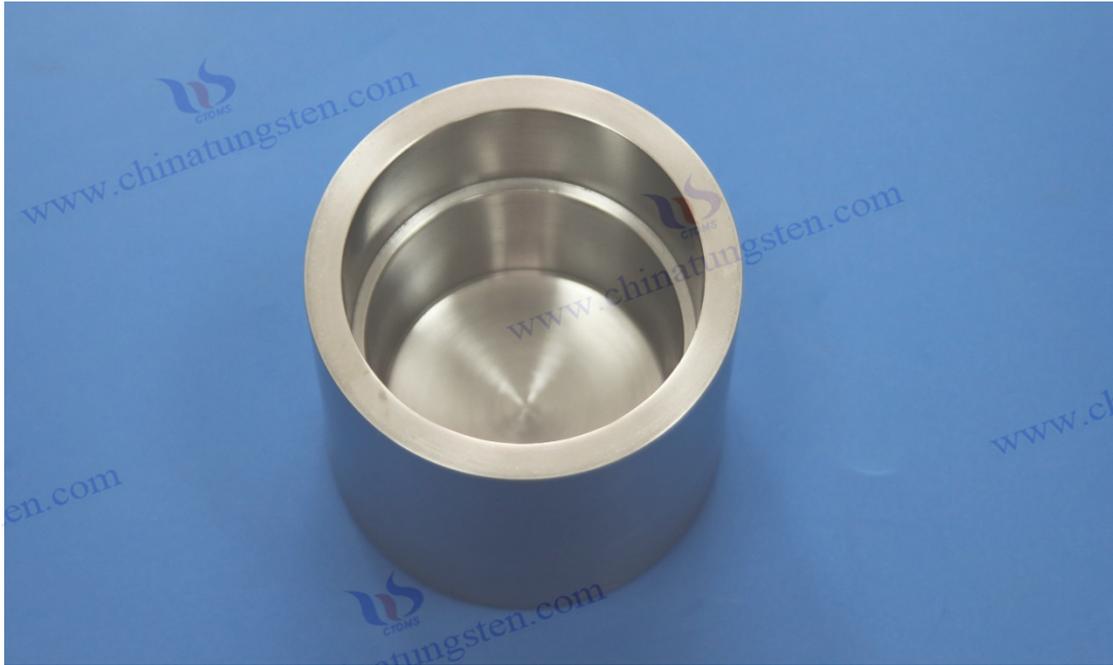
Taux de promotion technologique : 60 % de l'application des nouvelles technologies de recyclage >, et le cycle de promotion < 3 ans.

Sensibilisation du public : La publicité sur l'économie circulaire couvre 80 % de > clientèle cible, et le taux de sensibilisation > 90 %.

#### Avantages et défis

Avantages : La coopération industrielle réduit les coûts de R&D de 20 % et accélère la promotion de la technologie ; La politique soutient une augmentation de 30 % du taux de recyclage.

Défis : La répartition des bénéfices en amont et en aval doit être coordonnée et les coûts de gestion de l'alliance sont élevés ; Les petites et moyennes entreprises (PME) ont une faible participation et ont besoin d'incitations.



CTIA GROUP Ltd Creuset en tungstène

## Chapitre 10 Normes et règlements sur les creusets en tungstène

En tant que composants industriels haute performance, les creusets en tungstène sont fabriqués, testés et appliqués selon des normes et réglementations strictes pour garantir la qualité, les performances et la sécurité. Cette section traite en détail des exigences des normes nationales chinoises (GB), de l'Organisation internationale de normalisation (ISO), des normes américaines (ASTM) et d'autres normes internationales pour les creusets en tungstène, combinée à l'expérience pratique des entreprises mondiales de produits en tungstène et aux informations sur l'industrie fournies par Chinatungsten Online, analyse les détails techniques, les méthodes d'essai et les exigences de conformité des normes, et fournit des conseils normalisés aux fabricants et aux utilisateurs.

### 10.1 Norme nationale chinoise (GB)

La norme nationale chinoise (GB) fournit des spécifications techniques détaillées pour la production, l'inspection et l'application des creusets en tungstène, couvrant les propriétés des matériaux, les processus de fabrication et le contrôle de la qualité afin de s'assurer que les besoins du marché national et international sont satisfaits.

#### 10.1.1 GB/T 3875-2017 : Conditions techniques générales pour les produits en tungstène

##### Vue d'ensemble de la norme

GB/T 3875-2017 stipule la composition chimique, les propriétés physiques, le processus de fabrication et les méthodes d'essai des produits en tungstène (y compris les creusets en tungstène, les plaques de tungstène, les tiges de tungstène, etc.), qui conviennent aux applications industrielles à haute température (telles que les semi-conducteurs, l'aérospatiale).

##### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

#### Exigences techniques

Composition chimique : Pureté du tungstène >99,95 %, teneur en impuretés (Fe, Ni, C, etc.) <100 ppm, éléments gazeux (O, N) <50 ppm.

#### Propriétés physiques :

Densité : > 19,1 g/cm<sup>3</sup> (fritté), > 19,25 g/cm<sup>3</sup> (forgé).

Résistance à la traction : > 600 MPa (température ambiante), > 300 MPa (1000°C).

Dureté : > HV 350 (température ambiante).

Qualité de surface : rugosité Ra < 0,2 µm, pas de fissures, de porosité ou d'inclusions (diamètre > 0,1 mm).

Tolérances dimensionnelles : diamètre ± 0,05 mm, épaisseur de paroi ± 0,02 mm, adapté aux diamètres de creuset de 20 à 500 mm.

Procédé de fabrication : métallurgie des poudres (température de frittage 1800-2500°C), sous vide ou sous atmosphère inerte (teneur en oxygène < 10 ppm).

#### Méthode d'essai :

Analyse chimique : ICP-MS (précision ± 0,1 ppm) pour détecter les impuretés, analyseur de gaz (précision ± 0,01 ppm) pour mesurer les teneurs en O et N.

Essai physique : machine d'essai universelle pour mesurer la résistance à la traction (erreur ± 1 %), duromètre Vickers pour mesurer la dureté (erreur ± 5 HV).

Inspection de surface : microscope optique (résolution < 1 µm) pour vérifier les défauts, rugomètre de surface (précision ± 0,01 µm).

Mesures dimensionnelles : télémètre laser (précision ± 0,01 mm) avec tolérances selon ISO 2768.

#### Exigences de conformité

Rapport d'inspection : Chaque lot fournit la composition chimique, les propriétés physiques et le rapport d'essai de taille, qui est archivé >pendant 5 ans.

Certification qualité : conforme à la norme ISO 9001, taux de réussite des lots > 99,5 %.

Applications : Il convient à la croissance du silicium monocristallin, à la fusion des métaux de terres rares, etc., et répond aux besoins de haute pureté (>99,999 %).

#### Avantages et défis

Avantages : La norme couvre entièrement les performances des produits en tungstène et la méthode de détection est précise pour assurer la fiabilité du creuset ; Soutenir la compétitivité à l'exportation de l'industrie chinoise du tungstène.

Défi : Les exigences de pureté élevées augmentent les coûts de production ; Il est difficile pour les petites entreprises de s'équiper d'un équipement d'inspection de haute précision.

### 10.1.2 GB/T 3459-2022 : Exigences techniques pour les creusets en tungstène

#### Vue d'ensemble de la norme

GB/T 3459-2022 est formulé spécifiquement pour les creusets en tungstène et spécifie leurs exigences de conception, de fabrication, d'inspection et d'emballage pour les applications à haute

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

température dans les industries des semi-conducteurs, photovoltaïque et métallurgique.

### Exigences techniques

Matériau : Pureté du tungstène >99,99 %, impuretés (Si, Fe, Mo) <50 ppm, éléments gazeux <20 ppm.

Performance:

Résistance à la température : > 3000° C, choc thermique > 500 fois, pas de fissures (>0,1 mm).

Conductivité thermique : > 100 W/m • K (1000° C), assurant un champ thermique uniforme  $\pm 5^\circ$  C.

Finition de surface : Ra<0,1  $\mu$  m, pour éviter l'adhérence du matériau.

Dimensions et construction :

Diamètre : 20-500 mm, épaisseur de paroi 1-10 mm, tolérance  $\pm 0,02$  mm.

Forme : ronde ou personnalisée, écart d'épaisseur du fond < 0,05 mm.

Procédé de fabrication : pressage isostatique (pression > 200 MPa), frittage sous vide (température > 2200°C, teneur en oxygène <5 ppm).

Emballage : Scellé sous vide (<10 Pa), mousse antichoc (épaisseur > 10 mm), conformément à la norme GB/T 191.

### Méthode d'essai :

Test de performance : four haute température simulé fonctionnement à 3000°C, test de choc thermique (taux d'élévation et de descente de température 10°C/min), détection de fissures (rayons X, résolution < 0,01 mm).

Analyse de surface : Microscopie à force atomique (AFM, précision  $\pm 0,001 \mu$ m) pour mesurer la rugosité, microscopie électronique à balayage (MEB) pour vérifier les défauts microscopiques.

Contrôle dimensionnel : Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT, précision  $\pm 0,005$  mm) avec des tolérances selon la norme ISO 1101.

Détection chimique : GD-MS (spectrométrie de masse à décharge lumineuse, précision  $\pm 0,05$  ppm) pour les impuretés.

### Exigences de conformité

Inspection des lots : 5 % à 10 % d'échantillonnage par lot, taux de réussite > 99,8 %.

Certification : Il doit réussir des tests par des tiers (tels que SGS) et signaler qu'il répond aux exigences du CNAS.

Application : Il est utilisé pour la croissance du silicium monocristallin par la méthode Czochralski et la production de cristaux de saphir, avec une pureté de > 99,999 %.

### Avantages et défis

Avantages : Standard optimisé pour les applications à haute température dans les creusets pour assurer des performances stables ; La méthode de détection est avancée et prend en charge la fabrication de haute précision.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Défi : Des exigences strictes en matière de surface et de pureté rendent le processus plus difficile ; L'investissement dans l'équipement d'essai est élevé et le coût de mise en œuvre des petites et moyennes entreprises est élevé.

### 10.1.3 YB/T 5174-2020 : Norme industrielle pour creuset en tungstène

#### Vue d'ensemble de la norme

YB/T 5174-2020 est la norme industrielle pour les creusets en tungstène, complétant GB/T 3459-2022, se concentrant sur la normalisation du processus de production, le contrôle de la qualité et les exigences de protection de l'environnement, et s'applique aux entreprises de l'industrie chinoise du tungstène.

#### Exigences techniques

Matières premières : granulométrie de poudre de tungstène 0,5-5  $\mu\text{m}$ , pureté > 99,99 %, teneur en O < 10 ppm.

Performance:

Résistance à la corrosion : résistant à la corrosion du silicium fondu et du gallium, avec un taux de corrosion de < 0,01 mm/an.

Résistance mécanique : résistance à la traction > 700 MPa (température ambiante), > 200 MPa (2000° C).

Stabilité thermique : taux de déformation < 0,1 % à 3000°C, coefficient de dilatation thermique <  $4,5 \times 10^{-6}/\text{K}$ .

Fabrication : Revêtement CVD (SiC, épaisseur 0,05-0,1 mm) pour une meilleure résistance à la corrosion, pureté de l'atmosphère de frittage > 99,999 %.

Protection de l'environnement : production des eaux usées DCO < 50 mg/L, gaz résiduels  $\text{SO}_2$  < 200 mg/m<sup>3</sup>, taux de récupération des résidus > 50 %.

#### Méthode d'essai :

Test de corrosion : immersion dans du silicium fondu (1600°C, 24 heures), mesure de la profondeur de corrosion (précision  $\pm 0,001$  mm).

Essai mécanique : essai de traction à haute température (2000°C, erreur  $\pm 1$  %), essai de dureté (erreur  $\pm 5$  HV).

Tests de protection de l'environnement : surveillance en ligne des eaux usées (pH 6-9, précision  $\pm 0,01$ ), des gaz d'échappement (particules < 10 mg/m<sup>3</sup>).

Contrôle qualité : contrôle complet de la taille de chaque lot (tolérance  $\pm 0,01$  mm), des performances d'échantillonnage (taux de réussite > 99,5 %).

#### Exigences de conformité

Records : Production, essais, archivage des données de protection de l'environnement > 5 ans, taux de traçabilité > 99,9 %.

Certification : conforme à la norme ISO 14001, élimination des déchets soumise à l'approbation locale de protection de l'environnement.

Application : Il convient à la production de plaquettes de silicium photovoltaïque et à la préparation

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

de semi-conducteurs composés (tels que le GaN).

### **Avantages et défis**

Avantages : des normes combinées à des exigences de protection de l'environnement pour promouvoir une production verte ; Fort, orienté vers l'industrie et adapté au marché chinois.

Défi : Fréquence élevée des tests de protection de l'environnement, augmentation des coûts d'exploitation ; Il est difficile pour les petites entreprises de satisfaire à toutes les exigences en matière d'inspection.

## **10.2 Normes de l'Organisation internationale de normalisation (ISO)**

La norme ISO fournit une spécification uniforme mondiale pour la gestion de la qualité, la gestion de l'environnement et les essais de performance à haute température des creusets en tungstène, garantissant ainsi la cohérence et la fiabilité des produits sur le marché international.

### **10.2.1 ISO 9001:2015 : Système de management de la qualité**

#### **Vue d'ensemble de la norme**

L'ISO 9001:2015 spécifie les exigences d'un système de management de la qualité (SMQ) applicable à la production, à l'inspection et à la gestion de la chaîne d'approvisionnement des creusets en tungstène afin d'assurer l'uniformité des produits et la satisfaction des clients.

#### **Exigences techniques**

Contrôle du processus : de l'approvisionnement en matières premières à la livraison des produits finis, le processus est documenté et l'écart est de  $<1\%$ .

Objectifs qualité : taux de réussite des lots  $> 99,5\%$ , taux de réclamation client  $< 0,1\%$ .

Test : La composition chimique (pureté  $> 99,99\%$ ), les dimensions (tolérance  $\pm 0,02\text{ mm}$ ), les performances (choc thermique  $> 500$  fois) sont entièrement enregistrées.

Amélioration continue : audit qualité annuel, taux de mise en œuvre des mesures d'amélioration  $> 95\%$ .

#### **Comment faire**

Gestion documentaire : dossiers qualité dématérialisés, archivage  $> 5$  ans, taux de traçabilité  $> 99,9\%$ .

Formation : Le  $>$  annuel de formation des employés est de 20 heures, le taux de couverture est de  $100\%$  et le taux de réussite  $>$  de  $95\%$ .

Audit : Audit interne tous les 6 mois, audit externe tous les ans, certification valable 3 ans.

Avis clients : Réponse aux réclamations  $< 24$  heures, taux de résolution  $> 98\%$ .

#### **Exigences de conformité**

Certification : Une certification tierce partie (telle que TÜV, SGS) est requise et le taux de réussite est de  $> 98\%$ .

Application : Couvrant la production de creusets en tungstène, les tests, l'emballage, adapté aux

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

semi-conducteurs, l'aérospatiale.

Enregistrements : Les données de qualité et les rapports d'audit sont archivés pendant > 5 ans, et la transparence > 90 %.

### Avantages et défis

Avantages : améliorer la constance de la qualité des produits et renforcer la compétitivité du marché ; Grande reconnaissance mondiale, bonne pour les exportations.

Défis : Coût élevé de la certification et de l'audit, mise en œuvre difficile pour les petites et moyennes entreprises ; La gestion des documents doit être prise en charge par le numérique.

## 10.2.2 ISO 14001:2015 : Système de management environnemental

### Vue d'ensemble de la norme

L'ISO 14001:2015 spécifie les exigences relatives à un système de management environnemental (SGE) pour guider le management environnemental dans la production et le recyclage des creusets en tungstène afin de réduire les émissions de carbone et la pollution par les déchets.

### Exigences techniques

Objectifs environnementaux : émissions carbone < 30 tonnes/tonne de creuset, DCO < 50 mg/L des eaux usées, taux de récupération des résidus > 50 %.

Gestion des ressources : 90 % > utilisation des matières premières et 15 % d'amélioration de l'efficacité énergétique.

Traitement des déchets : gaz résiduels  $SO_2$  < 200 mg/m<sup>3</sup>, déchets liquides < métaux lourds 0,1 mg/L, taux de valorisation des déchets solides > 90 %.

Suivi : Suivi environnemental en ligne (précision  $\pm 0,01$  %), archivage des données > 5 ans.

### Comment faire

Évaluation environnementale : Évaluation annuelle de l'impact sur l'environnement (EIE), couverture à 100 %.

Formation : Formation des employés à la protection de l'environnement > 10 heures/an, avec un taux de couverture de > 95 %.

Audit : Trimestriel en interne, annuel en externe, avec un taux de rectification de > 99 %.

Technologies vertes : récupération de la chaleur résiduelle (rendement > 15 %), énergie renouvelable (> 30 %).

### Exigences de conformité

Certification : La certification ISO 14001 est requise, le cycle est de 3 ans et le taux de réussite est de > 98 %.

Application : Couvrant la production, le recyclage, l'élimination des déchets, REACH, la conformité RoHS.

Rapport : Les données environnementales sont ouvertes, la transparence > 95 % et l'archivage > 5 ans.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Avantages et défis

Avantages : réduire l'impact environnemental de 20 % et améliorer l'image verte de l'entreprise ; La conformité réglementaire réduit le risque d'amendes.

Défi : Investissement élevé dans l'équipement de surveillance de l'environnement, représentant 10 % à 15 % des coûts d'exploitation ; Les petites et moyennes entreprises ont du mal à répondre aux exigences d'audit à haute fréquence.

## 10.2 Normes de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) (suite)

### 10.2.3 ISO 15730:2000 : Essais des propriétés à haute température des matériaux métalliques

#### Vue d'ensemble de la norme

L'ISO 15730:2000 spécifie une méthode d'essai pour les performances des matériaux métalliques dans des environnements à haute température, qui convient à l'évaluation de la stabilité thermique, de la résistance mécanique et de la résistance à la corrosion des creusets en tungstène afin de garantir leur fiabilité dans des conditions extrêmes.

#### Exigences techniques

Température d'essai : 1000°C à 3000°C, précision du contrôle de la température  $\pm 2^\circ\text{C}$ .

Indicateurs de performance :

Résistance à la traction :  $> 200 \text{ MPa}$  (2000°C), erreur  $\pm 1 \%$ .

Performance de choc thermique :  $> 500$  cycles (taux d'élévation et de descente de température  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ ), pas de fissures ( $> 0,1 \text{ mm}$ ).

Résistance à la corrosion : Résistant au silicium fondu et au gallium, le taux de corrosion  $<$  de  $0,01 \text{ mm}/\text{an}$ .

Environnement d'essai : vide ( $< 10^{-5} \text{ Pa}$ ) ou atmosphère inerte (teneur en oxygène  $< 1 \text{ ppm}$ ).

Exigences de l'échantillon : sections de creuset (épaisseur 1-5 mm), rugosité de surface  $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ .

#### Méthode d'essai :

Traction à haute température : machine d'essai universelle à haute température (précision de charge  $\pm 0,5 \%$ ), testez la résistance à 2000°C.

Essai de choc thermique : rampe rapide et four à température (cadence  $10\text{-}20^\circ\text{C}/\text{min}$ ), détection des fissures par rayons X (résolution  $< 0,01 \text{ mm}$ ).

Essai de corrosion : essai d'immersion ( $1600\text{-}2000^\circ\text{C}$ , 24 heures), analyse MEB de la profondeur de corrosion (précision  $\pm 0,001 \text{ mm}$ ).

Enregistrement des données : archivage électronique des paramètres et des résultats d'essai pendant une période de  $> 5$  ans.

#### Exigences de conformité

Rapports : Des rapports de performance à haute température sont fournis pour chaque lot, conformément aux normes de laboratoire ISO 17025.

Certification : L'équipement de test doit être étalonné (erreur  $< 0,5 \%$ ) et les résultats peuvent être tracés.

Application : Utilisé dans les réacteurs nucléaires, la vérification des composants aérospatiaux à

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

haute température.

### Avantages et défis

Avantages : Les méthodes d'essai standard garantissent des performances constantes à haute température des creusets pour répondre aux besoins des applications extrêmes ; Une grande reconnaissance internationale.

Défi : L'équipement de test à haute température est coûteux, le coût d'un seul test est d'environ 0,5 à 10 000 yuans et la simulation d'environnement complexe nécessite des compétences professionnelles.

### 10.3 Normes américaines (ASTM)

Les normes ASTM fournissent des conseils détaillés sur les spécifications des matériaux, les essais de performance et l'analyse chimique des creusets en tungstène, qui sont largement utilisés sur les marchés nord-américains et mondiaux.

#### 10.3.1 ASTM B760-07 (2019) : Spécification standard pour les feuilles, les feuilles et les feuilles de tungstène

Vue d'ensemble de la norme

La norme ASTM B760-07 (2019) spécifie la composition chimique, les propriétés mécaniques et les exigences de fabrication des plaques, des feuilles et des feuilles de tungstène, et s'applique à la production de matières premières ou de composants de creusets en tungstène.

#### Exigences techniques

Composition chimique : Pureté du tungstène >99,95 %, impuretés (Fe, Ni, C) <100 ppm, O <20 ppm.

Propriétés mécaniques :

Résistance à la traction : > 550 MPa (température ambiante), > 150 MPa (1000°C).

Allongement : >2 % (température ambiante), >5 % (1000°C).

Dureté : > HV 300.

Qualité de surface : pas de fissures, porosité (>0,1 mm), rugosité Ra <0,3 µm.

Tolérances dimensionnelles : épaisseur ± 0,01 mm, largeur ± 0,05 mm, adapté à une épaisseur de paroi de creuset de 1 à 10 mm.

Procédé de fabrication : frittage par presse à chaud (2000-2500°C), sous vide ou sous atmosphère d'hydrogène (teneur en oxygène <5 ppm).

#### Méthode d'essai :

Analyse chimique : ICP-OES (précision ± 0,1 ppm) pour détecter les impuretés, analyseur LECO pour détecter O, N (précision ± 0,01 ppm).

Essais mécaniques : Essai de traction (ASTM E8, erreur ±1 %), essai de dureté (ASTM E18, erreur ±5 HV).

Inspection de surface : détection de défauts par ultrasons (résolution < 0,1 mm), rugosimètre

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

(précision  $\pm 0,01 \mu\text{m}$ ).

Contrôle dimensionnel : mesure laser (précision  $\pm 0,005 \text{ mm}$ ) conformément à la norme ANSI B46.1.

### Exigences de conformité

Inspection : Un certificat de matériau (CoA) est fourni pour chaque lot, y compris la composition chimique, les données de performance.

Certification : Conforme à la norme AS9100 (Aerospace Quality System), avec un taux de réussite de  $> 99,5 \%$ .

Application : Utilisé comme matière première pour les buses aérospatiales et les creusets à semi-conducteurs.

### Avantages et défis

Avantages : La norme réglemente en détail les performances des matières premières pour assurer la cohérence de la fabrication des creusets ; La méthode d'essai est mature et peut être utilisée dans le monde entier.

Défi : Les exigences de pureté élevées augmentent les coûts de raffinage. Les feuilles ultra-fines ( $< 0,1 \text{ mm}$ ) sont difficiles à inspecter.

## 10.3.2 ASTM E696-07 (2018) : Spécification standard pour les produits en tungstène

### Vue d'ensemble de la norme

La norme ASTM E696-07 (2018) traite des exigences de performance, de fabrication et d'acceptation des produits en tungstène, y compris les creusets, et convient à l'industrie à haute température et à la recherche scientifique.

### Exigences techniques

Matériau : Pureté du tungstène  $> 99,99 \%$ , impuretés (Si, Mo, Fe)  $< 50 \text{ ppm}$ , éléments gazeux  $< 10 \text{ ppm}$ .

Performance:

Résistance à la température :  $> 3000^\circ \text{C}$ , cycle de choc thermique  $> 500$  fois, taux de déformation  $< 0,1 \%$ .

Résistance à la corrosion : Résistant aux métaux en fusion (silicium, gallium), taux de corrosion  $< 0,01 \text{ mm/an}$ .

Conductivité thermique :  $> 100 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  ( $1000^\circ\text{C}$ ).

Fabrication : métallurgie des poudres ou pulvérisation plasma, température de frittage  $> 2200^\circ\text{C}$ , pureté de l'atmosphère  $> 99,999 \%$ .

Dimensions : diamètre 20-500 mm, tolérance d'épaisseur de paroi  $\pm 0,02 \text{ mm}$ , planéité du fond  $< 0,05 \text{ mm}$ .

### Méthode d'essai :

Test de performance : four haute température ( $3000^\circ\text{C}$ , contrôle de la température  $\pm 2^\circ\text{C}$ ) utilisation simulée, essai de choc thermique (ASTM E1461).

Test de corrosion : immersion dans le silicium fondu ( $1600^\circ\text{C}$ , 48 heures), mesure de la perte de masse (précision  $\pm 0,001 \text{ g}$ ).

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Contrôle dimensionnel : CMM (précision  $\pm 0,005$  mm), analyse de surface (MEB, précision  $\pm 0,001$   $\mu\text{m}$ ).

Analyse chimique : GD-MS (précision  $\pm 0,05$  ppm) pour détecter les impuretés.

### Exigences de conformité

Rapports : Les performances, la taille, les rapports d'analyse chimique sont fournis pour chaque lot, et l'archivage > 5 ans.

Certification : Conforme à la norme MIL-STD-810 (Military Environmental Testing) avec un taux de réussite de > 99,8 %.

Application : utilisé dans la fusion nucléaire, la production de plaquettes de silicium photovoltaïque.

### Avantages et défis

Avantages : La norme couvre les performances à haute température et convient aux applications dans des environnements extrêmes ; La méthode de test est précise et les données sont crédibles.

Défi : Le coût des tests à haute température est élevé, environ 0,5 à 10 000 yuans pour une seule fois, et les exigences de tolérance strictes augmentent la difficulté de fabrication.

### 10.3.3 ASTM E1447-09 (2016) : Méthode d'analyse chimique des matériaux en tungstène

#### Vue d'ensemble de la norme

La norme ASTM E1447-09 (2016) spécifie une méthode d'analyse chimique pour les matériaux en tungstène afin de détecter la pureté et la teneur en impuretés des creusets en tungstène afin de garantir que les applications de haute pureté sont respectées.

#### Exigences techniques

Eléments de détection : Fe, Ni, Si, Mo, C, O, N, etc., limite de détection <0,1 ppm.

Pureté : Tungstène >99,99 %, impuretés totales <50 ppm, éléments gazeux <10 ppm.

Préparation des échantillons : sections de creuset (0,5-1 g), lavage de surface (résidu < 0,01  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ).

Précision : erreur relative <1 %, répétabilité > 99,5 %.

#### Méthode d'essai :

ICP-MS : Détection des impuretés métalliques (Fe, Ni, Si), précision  $\pm 0,1$  ppm, limite de détection 0,01 ppm.

Analyse LECO : La teneur en C, O, N a été mesurée, la précision était  $\pm 0,01$  ppm et la limite de détection était de 0,005 ppm.

GD-MS : Analyse du tungstène de haute pureté avec une limite de détection de < 0,05 ppm couvrant > 20 éléments.

Traitement des échantillons : solubilisation acide ( $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ , concentration 5 mol/L), nettoyage par ultrasons (40 kHz).

#### Exigences de conformité

Laboratoire : accréditation ISO 17025 requise, intervalle d'étalonnage de l'équipement < 6 mois.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

Rapport : Résultats d'analyses, méthodes, erreurs, archivés >depuis 5 ans, > taux de traçabilité de 99,9 %.

Application : Utilisé pour la vérification des creusets de tungstène de haute pureté des semi-conducteurs et photovoltaïques.

#### Avantages et défis

Avantages : L'analyse de haute précision garantit que la pureté du creuset est > 99,999 %, ce qui répond aux besoins des semi-conducteurs ; Standardisation méthodologique, reconnaissance mondiale.

Défi : Le coût de l'équipement GD-MS est élevé et le > d'un seul appareil est de 10 millions de yuans ; La préparation des échantillons nécessite un environnement ultra-propre, ce qui augmente les coûts.

#### 10.4 Autres normes internationales

D'autres normes internationales (par exemple, Japan JIS, Germany DIN, European EN) fournissent des spécifications supplémentaires pour la fabrication, l'inspection et l'analyse de creusets en tungstène pour des marchés et des applications spécifiques.

##### 10.4.1 JIS H 4701:2015 : Produits en tungstène et en alliage de tungstène

###### Vue d'ensemble de la norme

La norme JIS H 4701:2015 spécifie la composition chimique, les propriétés et les exigences de fabrication du tungstène et des produits en alliage de tungstène, y compris les creusets, pour l'industrie à haute température sur le marché japonais.

###### Exigences techniques

Composition chimique : Pureté du tungstène >99,95 %, impuretés (Fe, Ni, C)<100 ppm, O<20 ppm.

Performance:

Résistance à la traction : > 600 MPa (température ambiante), > 200 MPa (1000° C).

Dureté : > HV 350, choc thermique > 500 cycles.

Rugosité de surface : Ra<0,2 μm, pas de fissures (>0,1 mm).

Fabrication : Pressage isostatique à chaud (HIP, pression> 150 MPa), température de frittage 2000-2500° C.

Dimensions : diamètre 20-300 mm, tolérance ± 0,05 mm, épaisseur de paroi 1-8 mm.

###### Méthode d'essai :

Analyse chimique : ICP-OES (précision ± 0,1 ppm), analyse des gaz (précision ± 0,01 ppm).

Essais mécaniques : essai de traction (JIS Z 2241, erreur ±1 %), essai de dureté (JIS Z 2245).

Inspection de surface : microscopie optique (résolution < 1 μm), détection de défauts par ultrasons (résolution < 0,1 mm).

Inspection dimensionnelle : mesure laser (précision ± 0,01 mm) conformément à la norme JIS B 0405.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Exigences de conformité

Rapports : Un certificat de matériau est fourni pour chaque lot, conformément à la norme JIS Z 9001.

Certification : La vérification JQA (Japan Quality Assurance Association) est requise et le taux de réussite est > 99,5 %.

Application : utilisé dans la préparation de semi-conducteurs composés (GaAs, GaN), instruments de précision.

### Avantages et défis

Avantages : La norme est adaptée au marché asiatique et la méthode de détection est simple et efficace ; Prend en charge la production de petits creusets (<50 mm).

Défis : Coûts de certification élevés sur le marché japonais et barrières à l'entrée élevées pour les petites et moyennes entreprises ; Le cycle de mise à jour standard est long (5 à 10 ans).

## 10.4.2 DIN EN 10204:2004 : Documents d'inspection pour les produits métalliques

### Vue d'ensemble de la norme

La norme DIN EN 10204:2004 spécifie le type et le contenu des documents d'inspection pour les produits métalliques, y compris les creusets en tungstène, garantissant ainsi la qualité, la traçabilité et l'adéquation au marché européen.

### Exigences techniques

Type de fichier :

2.1 : Déclaration de conformité, confirmant que le produit répond aux exigences de la commande.

2.2 : Rapport d'essai, fournissant la composition chimique et les données de performance.

3.1 : Certificat d'inspection, délivré par le personnel autorisé du fabricant, avec résultats d'essai détaillés.

3.2 : Certificat d'inspection par un tiers (p. ex. TÜV) attestant de l'indépendance.

Contenu de l'application : Composition chimique (> 99,99 %), dimensions ( $\pm 0,02$  mm), performances (choc thermique > 500 cycles).

Registres : données d'inspection, numéro de lot, date de l'essai, archivé > 5 ans.

### Comment faire

Enregistrement des données : fichier électronique, format PDF ou XML, taux de traçabilité > 99,9 %.

Vérification : audit du fabricant ou d'un tiers (tel que SGS), le taux de réussite > 99,5 %.

Langue : anglais ou allemand, police > 12 pt, lisible.

Distribution : Une version papier ou électronique est fournie avec la marchandise, et le délai de livraison < de 7 jours.

### Exigences de conformité

Certification : Conforme à la norme EN ISO/IEC 17050 et le document est valable > 3 ans.

Application : Utilisé dans l'aérospatiale, creuset en tungstène semi-conducteur exporté vers l'Europe.

Audit : Revue annuelle des documents, taux d'erreur < 0,1 %, taux de rectification > 99 %.

#### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

### Avantages et défis

Avantages : la documentation standard augmente la confiance des clients et simplifie l'accès au marché de l'UE ; La numérisation réduit les coûts de gestion.

Défi : Le certificat de type 3.2 doit être vérifié par un tiers, et le coût est d'environ 0,5 à 10 000 yuans/lot ; Le multilinguisme nécessite une augmentation des coûts de traduction.

### 10.4.3 EN 10276-1:2000 : Analyse chimique des matériaux à haute température

#### Vue d'ensemble de la norme

L'EN 10276-1:2000 spécifie des méthodes pour l'analyse chimique des matériaux à haute température, tels que le tungstène, afin de s'assurer que la pureté et la teneur en impuretés répondent aux exigences des applications à haute température.

#### Exigences techniques

Eléments de détection : Fe, Ni, Si, Mo, C, O, N, limite de détection <0,1 ppm.

Pureté : Tungstène >99,99 %, impuretés totales <50 ppm, éléments gazeux <10 ppm.

Echantillon : sections de creuset (0,5-2 g) avec < résiduel de 0,01  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ .

Précision : erreur relative <1 %, répétabilité > 99,5 %.

#### Méthode d'essai :

ICP-MS : Détection des impuretés métalliques avec une précision de  $\pm 0,1$  ppm et une limite de détection de 0,01 ppm.

TGA-MS : Mesure des teneurs en O et N, précision  $\pm 0,01$  ppm, limite de détection 0,005 ppm.

XRF : Analyse rapide ( $\pm 0,5$  ppm) pour le dépistage initial.

Traitement des échantillons : soluble dans l'acide ( $\text{HNO}_3$ , 5 mol/L), nettoyage par ultrasons (40 kHz).

#### Exigences de conformité

Laboratoire : accréditation EN ISO/IEC 17025 requise, intervalle d'étalonnage de l'équipement < 6 mois.

Rapport : Résultats d'analyses, méthodes, erreurs, archivés pendant 5 ans, taux de traçabilité > > 99,9 %.

Application : Utilisé pour le réacteur nucléaire, la vérification du creuset de tungstène aérospatial.

### Avantages et défis

Avantages : Analyse de haute précision pour les applications de haute pureté (> 99,999 %) ; La méthode est compatible ASTM et peut être utilisée dans le monde entier.

Défi : L'équipement TGA-MS est coûteux, avec une seule > de 5 millions de yuans ; La préparation des échantillons nécessite une salle blanche, ce qui est coûteux.



CTIA GROUP Ltd Creusets en tungstène

## Appendice

### A. Glossaire

**Creuset en tungstène** : un récipient en tungstène de haute pureté comme matériau principal pour la fusion à haute température ou la manutention des matériaux.

**Métallurgie des poudres** : la technologie de fabrication de produits métalliques par pressage de poudre, frittage et autres processus.

**Pressage isostatique** : Le processus d'application d'une pression uniforme dans un milieu liquide ou gazeux pour former une poudre.

**Méthode Czochralski** : un procédé utilisé pour la croissance de monocristaux, couramment utilisé dans la préparation de matériaux semi-conducteurs.

**Résistance aux chocs thermiques** : La capacité d'un matériau à résister à la fissuration sous des changements rapides de température.

**Frittage** : Le processus de chauffage d'un matériau en poudre en dessous de son point de fusion pour former un solide.

**Contrôles non destructifs** : ultrasons, rayons X et autres méthodes pour détecter les défauts internes des matériaux sans endommager l'échantillon.

**Pressage isostatique à chaud (HIP)** : Une technologie de post-traitement pour améliorer la densité des matériaux à des températures et des pressions élevées.

**Taille des grains** : La taille moyenne des cristaux dans la microstructure d'un matériau, ce qui affecte les propriétés mécaniques.

**Fluage à haute température** : Déformation lente d'un matériau soumis à des contraintes à long terme à des températures élevées.

**Coefficient de dilatation thermique** : Le taux de variation du volume ou de la longueur d'un matériau sous un changement de température.

### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale

**Rugosité de surface** : Une mesure des caractéristiques microgéométriques d'une surface, généralement exprimée en Ra ou Rz.

## B. Références

- [1] Document standard national de la République populaire de Chine
- [2] Plateforme nationale normalisée de service public pour l'information (www.sac.gov.cn).
- [3] Base de données sur les normes internationales de l'ASTM
- [4] Catalogue des normes ISO
- [5] Chinatungsten Online, Examen de la technologie de frittage de creusets de tungstène, 2023
- [6] Compte officiel WeChat en ligne de Chinatungsten, Application du frittage d'hydrogène dans la production de creusets en tungstène, 2024
- [7] Chinatungsten Online, Analyse d'amélioration des performances pour l'optimisation de la température de frittage, 2023
- [8] Manuel technique de métallurgie des poudres, Metallurgical Industry Press, 2020
- [9] Propriétés physiques et chimiques du tungstène, Chemical Industry Press, 2019
- [10] Chinatungsten Online, Application de la technologie de frittage par gradient dans un creuset en tungstène, 2023
- [11] Chinatungsten Online, Progrès de la technologie de contrôle de la taille des creusets en tungstène, 2022

## C. Liste des outils et équipements couramment utilisés

Four de frittage à haute température (vide, protection de l'atmosphère)  
Presse isostatique (pressage isostatique à froid et à chaud)  
Centres d'usinage CNC (tournage, fraisage, rectification)  
Microscopie électronique à balayage (MEB)  
Spectroscopie de fluorescence X (XRF)  
Détecteur à ultrasons  
Équipement d'essai de performance à haute température

### Avis de droit d'auteur et de responsabilité légale