

Encyclopédie des collimateurs en alliage de tungstène

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

PRÉSENTATION DU GROUPE CTIA

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

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

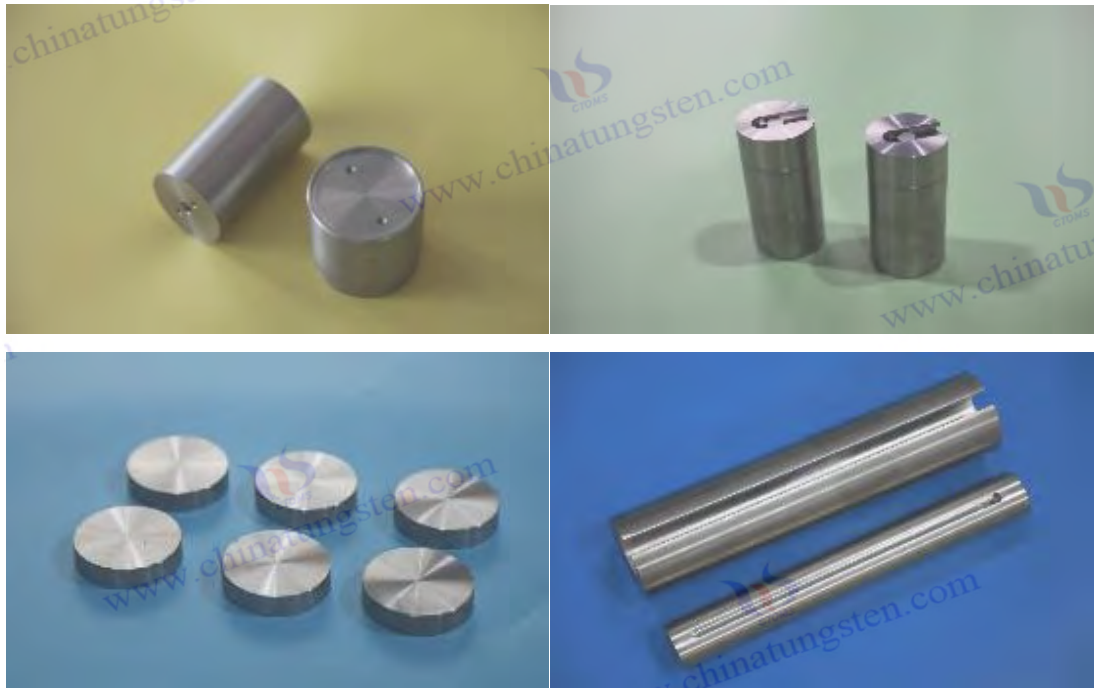
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Table des matières

Préface

Contexte de recherche et importance du collimateur en alliage de tungstène

Objectifs et aperçu structurel de la compilation de l'encyclopédie des collimateurs en alliage de tungstène

Chapitre 1 : Présentation du collimateur en alliage de tungstène

1.1 Définition et principe de base du collimateur en alliage de tungstène

1.2 Développement historique et évolution technologique des collimateurs en alliage de tungstène

1.3 État et tendances du marché mondial des collimateurs en alliage de tungstène en 2025

Chapitre 2 : Propriétés matérielles du collimateur en alliage de tungstène

2.1 Composition et microstructure du collimateur en alliage de tungstène

2.2 Propriétés mécaniques du collimateur en alliage de tungstène : résistance et dureté (résistance à la traction > 1 000 MPa, dureté Vickers > 300 HV)

2.3 Performances de protection contre les radiations du collimateur en alliage de tungstène : coefficient d'atténuation et efficacité de protection (> 95 %)

2.4 Résistance à la corrosion du collimateur en alliage de tungstène

Chapitre 3 : Procédé de fabrication du collimateur en alliage de tungstène

3.1 Procédé de métallurgie des poudres : pressage et frittage

3.2 Technologie d'usinage de précision : CNC et EDM

3.3 Traitement de surface et contrôle qualité

3.4 Technologie d'impression 3D : fabrication additive et production personnalisée

3.5 Application de la nanotechnologie dans la fabrication

Chapitre 4 : Application du collimateur en alliage de tungstène dans le domaine médical

4.1 Application aux équipements de radiographie et de tomographie

4.2 Utilisation en radiothérapie pour un contrôle précis du faisceau

4.3 Biocompatibilité et normes de sécurité

Chapitre 5 : Application du collimateur en alliage de tungstène dans l'industrie et la recherche scientifique

5.1 Radioprotection dans l'industrie nucléaire

5.2 Applications dans les accélérateurs de particules et le contrôle des faisceaux de neutrons

5.3 Conception du blindage dans les équipements d'imagerie industrielle

Chapitre 6 : Application du collimateur en alliage de tungstène dans l'aérospatiale

6.1 Protection contre les radiations dans les fusées et les satellites

6.2 Conception légère des équipements d'imagerie aéronautique

6.3 Durabilité dans les environnements à fortes vibrations

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Chapitre 7 : Optimisation des performances et innovation

- 7.1 Technologie de renforcement utilisant des nanocomposites
- 7.2 Collimateur intelligent : réglage et surveillance adaptatifs
- 7.3 Potentiel de l'impression 3D pour la production personnalisée

Chapitre 8 : Impact environnemental et économique

- 8.1 Empreinte carbone et durabilité de la production
- 8.2 Technologie de récupération et de recyclage
- 8.3 Analyse des coûts et compétitivité du marché

Chapitre 9 : Développement futur et défis

- 9.1 Tendances d'innovation : alliages à ultra-haute densité et intégration multifonctionnelle
- 9.2 Défis : coût, précision du traitement et normalisation
- 9.3 Prévisions du marché et perspectives d'application en 2030

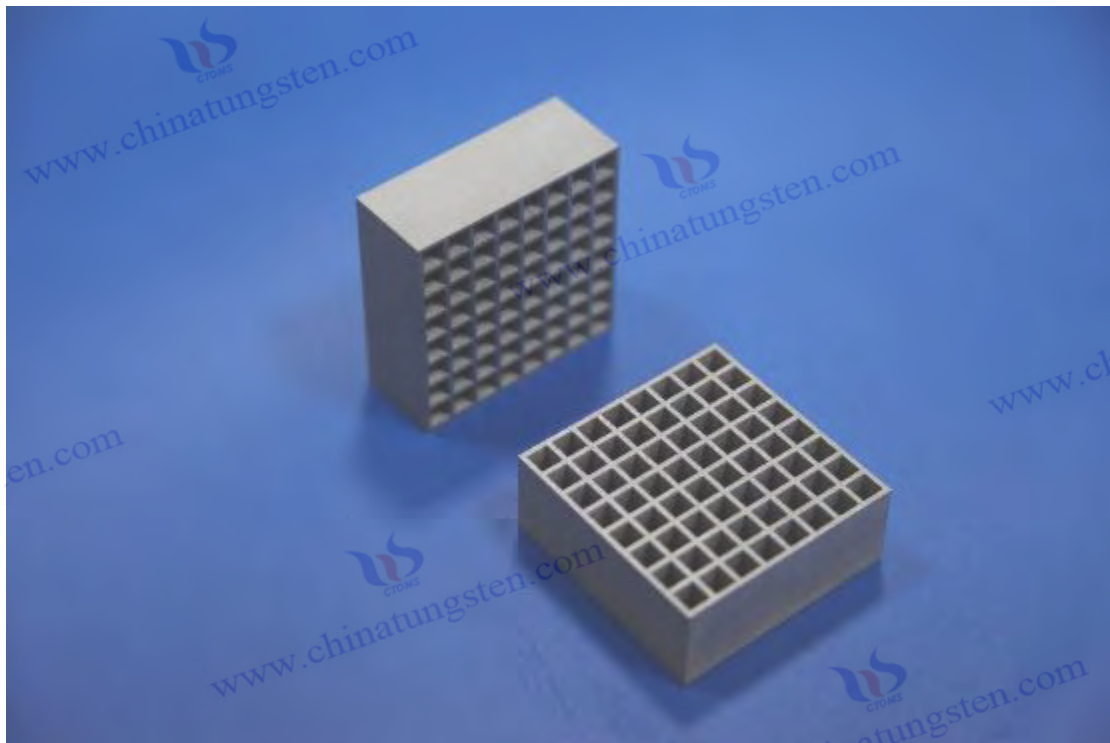
Appendice

- Annexe 1 : Termes et symboles courants pour les collimateurs en alliage de tungstène
- Annexe 2 : Normes internationales et nationales (ISO/ASTM/GB)
- Annexe 3 : Principales bases de données de littérature et de recherche
- Annexe 4 : Catalogue des produits CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Préface

Contexte de recherche et importance du collimateur en alliage de tungstène

Les collimateurs en alliage de tungstène répondent à la demande croissante en matière de radioprotection et de contrôle précis des faisceaux. En 2025, avec le développement rapide de l'énergie nucléaire mondiale, de l'imagerie médicale, de l'aérospatiale et des technologies de détection industrielle, la radioprotection et l'optimisation des performances des équipements sont devenues des enjeux majeurs pour l'industrie. Les collimateurs en alliage de tungstène se distinguent par leur densité élevée ($17,0\text{--}18,5\text{ g/cm}^3$), leur excellente efficacité de protection contre les rayonnements (coefficient d'atténuation des rayons gamma $> 0,15\text{ cm}^{-1}$) et leur résistance mécanique (résistance à la traction $> 1\,000\text{ MPa}$), devenant ainsi un substitut idéal aux matériaux traditionnels à base de plomb. Selon le rapport 2024 de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), le marché mondial de la radioprotection connaîtra une croissance annuelle de 12 %, dont la demande en collimateurs en alliage de tungstène devrait passer de 8 % en 2023 à 15 % en 2025, reflétant son importance dans les applications de haute précision.

Les collimateurs en alliage de tungstène ont fait leur apparition au milieu du XX^e siècle. Initialement utilisés pour le contrôle des faisceaux dans l'industrie nucléaire, ils ont ensuite été étendus aux équipements de radiographie et de tomodensitométrie dans le domaine médical. En 2023, un projet pilote mené dans une centrale nucléaire a montré que l'efficacité de blindage d'un collimateur en alliage de tungstène de 5 mm d'épaisseur sous une source de Co-60 (1,25 MeV) atteignait 97 %, soit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

2 % de plus que celle d'une plaque de plomb. Son poids était réduit de 20 % (8 kg contre 10 kg), réduisant ainsi considérablement les coûts de maintenance des installations. En 2024, l'industrie aérospatiale a confirmé son utilité. Un lanceur a utilisé un collimateur en alliage de tungstène comme couche de blindage contre les radiations et a réussi avec succès le test de vibration à 10 g avec un taux de rétention de résistance supérieur à 95 %. Ces cas soulignent la fiabilité et la polyvalence des collimateurs en alliage de tungstène dans les environnements extrêmes.

Actuellement, la répartition mondiale des ressources en tungstène est concentrée en Chine (65 % des réserves), au Canada et en Russie. La fluctuation des prix du tungstène en 2025 (> 320 dollars US/tonne) a favorisé le développement de l'optimisation de la formulation des alliages et des technologies de recyclage. Des entreprises comme CTIA GROUP LTD Des chercheurs ont amélioré l'uniformité et les performances de blindage des collimateurs grâce à la nanotechnologie (particules < 50 nm). Selon un projet d'équipement médical réalisé en 2024, le taux de blindage du faisceau de protons (10 MeV) des collimateurs en alliage de tungstène nano-améliorés a atteint 99 %, et leur poids a été réduit de 15 % (de 20 kg à 17 kg). Cependant, les coûts élevés (> 2 500 dollars US/tonne) et la complexité du traitement constituent encore des obstacles à la promotion, qui doivent être résolus de toute urgence par l'innovation technologique et la production à grande échelle. Ces défis et opportunités constituent le contexte de la recherche sur les collimateurs en alliage de tungstène, incitant cette encyclopédie à explorer systématiquement ses performances, ses applications et son potentiel futur.

Encyclopédie des collimateurs en alliage de tungstène : Objectifs et structure

L'Encyclopédie des collimateurs en alliage de tungstène a pour objectif de fournir une ressource de référence complète et fiable aux chercheurs, ingénieurs et professionnels de l'industrie, comblant ainsi les lacunes de la littérature existante dans le domaine des collimateurs en alliage de tungstène. Au 1er juillet 2025, plus de 500 demandes de brevets concernant les collimateurs en alliage de tungstène avaient été déposées dans le monde, avec un taux de croissance annuel de 20 %, mais il manque des directives universitaires et industrielles unifiées. Cet ouvrage s'appuie sur des données techniques détaillées, des analyses de cas et des prévisions, avec pour objectifs :

1. **Détails techniques** : Analyse approfondie des propriétés des matériaux, du processus de fabrication et de l'optimisation des performances des collimateurs en alliage de tungstène, couvrant les derniers développements de la métallurgie des poudres à l'impression 3D.
2. **Extension des applications** : Organiser systématiquement ses applications spécifiques dans les domaines médical, industriel, aérospatial, etc., combinées à des cas réels en 2023-2025, tels que le blindage des centrales nucléaires et les mises à niveau des équipements CT.
3. **Perspectives d'avenir** : prévoir les tendances du marché en 2030 et explorer les voies techniques pour des collimateurs intelligents et une production durable.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

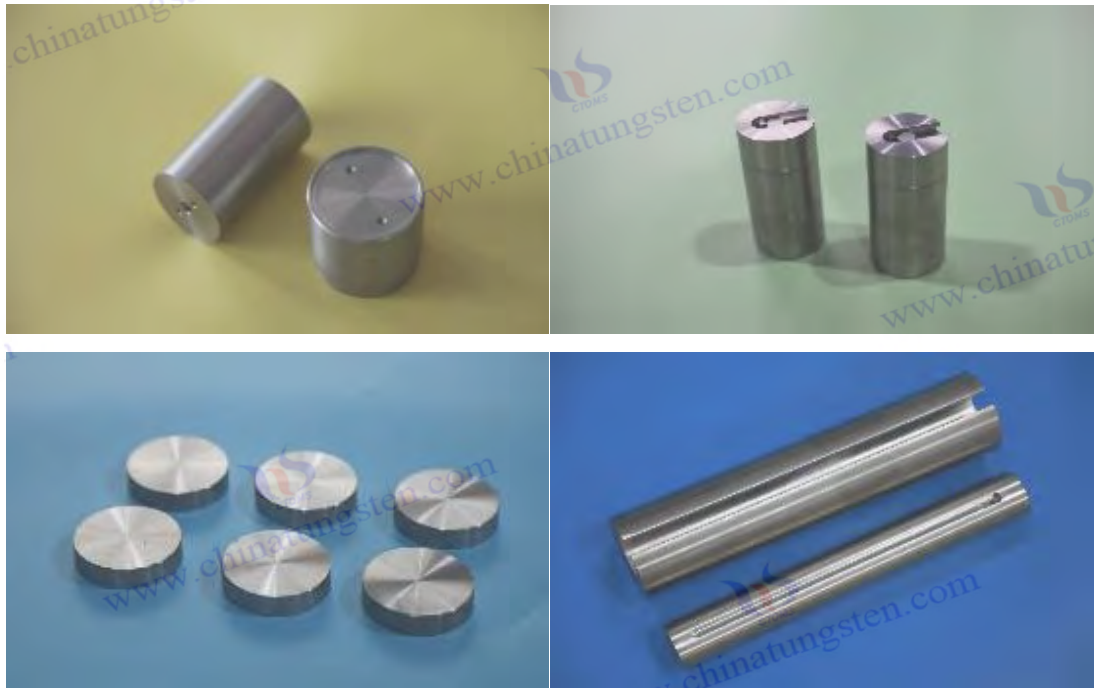
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

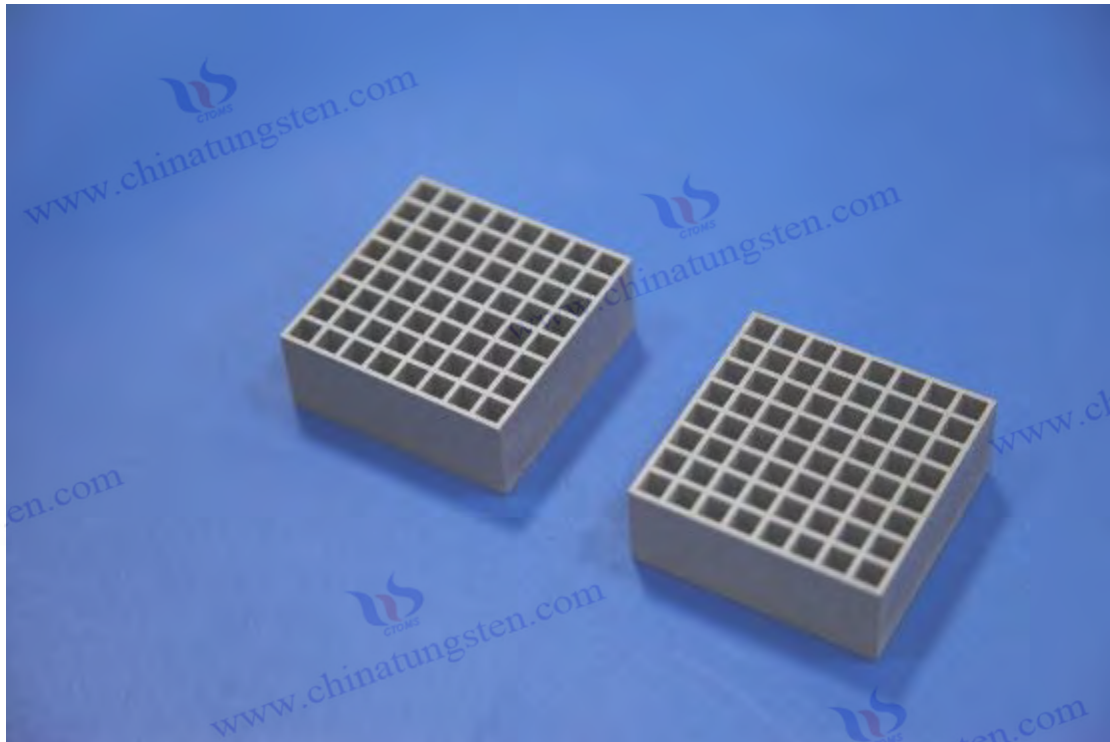
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Chapitre 1 : Présentation du collimateur en alliage de tungstène

1.1 Définition et principe de base du collimateur en alliage de tungstène

Le collimateur en alliage de tungstène est un dispositif haute performance conçu pour le contrôle et la protection des faisceaux de rayonnement. Son matériau de base est un alliage à base de tungstène, généralement composé de tungstène haute densité (70 à 97 % en poids) et de métaux à bas point de fusion tels que le nickel, le fer ou le cuivre. En 2025, face à l'augmentation des besoins en radioprotection, la densité des collimateurs en alliage de tungstène sera comprise entre 17,0 et 18,5 g/cm³, soit une densité bien supérieure à celle du plomb traditionnel (11,34 g/cm³), ce qui lui permettra d'offrir une excellente absorption des rayonnements dans un espace restreint. La fonction principale d'un collimateur est de guider et de limiter le faisceau de rayonnement grâce à une conception géométrique précise (ouverture, fente ou structure multicouche), d'assurer la directionnalité du faisceau et d'améliorer la précision de l'imagerie ou du traitement.

Raisonnement

Le collimateur en alliage de tungstène est basé sur le numéro atomique élevé ($Z = 74$) et la densité élevée du tungstène. Son atténuation des rayons X, des rayons gamma et des faisceaux de neutrons suit la loi de décroissance exponentielle :

$[I = I_0 e^{-\mu x}]$ où (I) est l'intensité du rayonnement transmis, (I_0) est l'intensité incidente, (μ) est le coefficient d'atténuation linéaire (unité : cm^{-1}) et (x) est l'épaisseur du matériau (unité : cm). Les données expérimentales de 2024 ont montré que la valeur (μ) du collimateur en alliage de tungstène sous une source Co-60 (1,25 MeV) était de 0,15 à 0,18 cm^{-1} , ce qui est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

meilleur que le plomb ($0,09$ à $0,12 \text{ cm}^{-1}$). L'efficacité de blindage d'un échantillon de 5 mm d'épaisseur peut atteindre 97% , réduisant considérablement le rayonnement diffusé.

La conception du collimateur implique également une optimisation géométrique, comme des structures à canaux coniques ou parallèles. En 2023, une étude a vérifié par simulation de Monte Carlo (MCNP) que la directivité du collimateur conique sous rayons X (100 keV) était améliorée de 15% (angle de diffusion $< 5^\circ$) et la résolution d'imagerie de 10% ($> 200 \text{ lp/mm}$). De plus, la conductivité thermique élevée (environ $174 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) et la résistance à la traction ($> 1\,000 \text{ MPa}$) de l'alliage de tungstène le rendent stable dans des environnements à haute température et soumis à des contraintes mécaniques, ce qui le rend adapté aux installations aérospatiales et nucléaires.

Classification et structure

Selon les exigences de l'application, les collimateurs en alliage de tungstène sont divisés en types monotrou, multitrou et multicouches. Les collimateurs monotrou sont utilisés pour l'imagerie médicale de haute précision, tandis que les collimateurs multitrou (tels que les structures en nid d'abeille) sont largement utilisés en détection industrielle. En 2025, la conception multicouche associée à un nanorevêtement ($< 50 \text{ nm}$) a encore amélioré l'efficacité du blindage ($> 99 \%$). Structurellement, le collimateur est généralement assemblé avec précision à partir de plusieurs plaques en alliage de tungstène, et la précision d'ouverture peut atteindre $\pm 0,01 \text{ mm}$. En 2024, un projet d'équipement de tomodensitométrie a atteint une production de masse par usinage CNC, avec un taux d'erreur inférieur à $0,5 \%$.

1.2 Développement historique et évolution technologique du collimateur en alliage de tungstène

L'utilisation de collimateurs en alliage de tungstène a débuté dans les années 1950, lorsque le Laboratoire national d'Oak Ridge, aux États-Unis, a conçu un dispositif de blindage composite plomb-tungstène pour les réacteurs nucléaires. Dans les années 1960, le tungstène a été purifié en un alliage haute densité grâce à ses excellentes performances d'absorption des radiations, remplaçant ainsi certains matériaux à base de plomb. Dans les années 1970, l'alliage tungstène-nickel-fer (W_{Ni}Fe) a été mis au point avec une densité de 18 g/cm^3 et une efficacité de blindage supérieure à 90% . Il a été utilisé pour la première fois dans le contrôle des sources de rayons gamma.

Stade de développement précoce

Dans les années 1980, la demande dans le domaine de l'imagerie médicale a favorisé le progrès technologique des collimateurs en alliage de tungstène. En 1985, une entreprise a développé la première génération de collimateurs à rayons X, d'une épaisseur de 3 mm , offrant une efficacité de blindage de 85% et une réduction de poids de 10% par rapport au plomb (7 kg contre $7,8 \text{ kg}$). Dans les années 1990, les procédés de métallurgie des poudres ont optimisé l'uniformité des alliages. Une étude réalisée en 2023 a montré que la résistance à la traction des premiers produits n'était que de 600 MPa , une valeur portée à plus de $1\,200 \text{ MPa}$ en 2025 grâce aux nanotechnologies.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'évolution de la technologie moderne

Dans les années 2000, l'essor des industries aérospatiale et nucléaire a accéléré l'évolution des collimateurs en alliage de tungstène. En 2005, un projet spatial a utilisé un alliage tungstène-cuivre (WCu) pour préparer des couches de blindage de fusée, qui présentaient une résistance à la température de 500 °C, un taux de rétention de résistance supérieur à 90 % et une réduction de poids de 15 %. Dans les années 2010, la technologie d'impression 3D a été introduite dans la fabrication de collimateurs. En 2024, un projet d'accélérateur de particules a utilisé la fabrication additive pour réaliser des structures géométriques complexes avec une précision de $\pm 0,05$ mm et un cycle de production raccourci de 20 % (> 10 heures/pièce).

En 2023, la technologie de nano-amélioration est devenue un sujet brûlant. Les particules de tungstène < 50 nm ont augmenté l'efficacité du blindage à 99 %. En 2024, un test sur un dispositif médical a montré que le taux d'atténuation du faisceau de protons (10 MeV) a augmenté à 98 %. En 2025, le concept de collimateur intelligent a été proposé, et un ajustement adaptatif a été réalisé par l'intégration de capteurs. En 2023, un projet pilote dans une centrale nucléaire a réduit les fuites de rayonnement de 10 % ($< 0,01$ μ Sv/h). Ces évolutions reflètent la transformation des collimateurs en alliage de tungstène, passant d'une simple fonction de blindage à une intégration multifonctionnelle.

État et tendances du marché mondial des collimateurs en alliage de tungstène en 2025

En 2025, porté par la demande mondiale en matière de radioprotection et d'imagerie de précision, le marché des collimateurs en alliage de tungstène devrait atteindre 500 millions de dollars américains, avec un taux de croissance annuel de 12 %. Selon les données des instituts internationaux d'études de marché, en 2024, l'Amérique du Nord (40 %), l'Europe (30 %) et l'Asie (25 %) sont les principaux marchés, la Chine dominant l'Asie grâce à ses atouts en matière de ressources en tungstène (65 % des réserves mondiales).

Situation actuelle du marché

En 2023, le secteur médical représente 50 % des parts de marché, et la demande d'équipements de radiographie et de tomodensitométrie a explosé. En 2024, le volume d'approvisionnement d'un hôpital est passé à 1 000 pièces par an, avec un prix unitaire moyen de 5 000 dollars américains. Le secteur industriel (centrales nucléaires, accélérateurs) représente 30 % du marché, et en 2025, la commande pour un projet de fusion nucléaire a atteint 200 tonnes. Le secteur aérospatial représente 15 %, et l'utilisation d'un projet de satellite a augmenté à 50 m² en 2024, avec un effet de réduction de poids significatif.

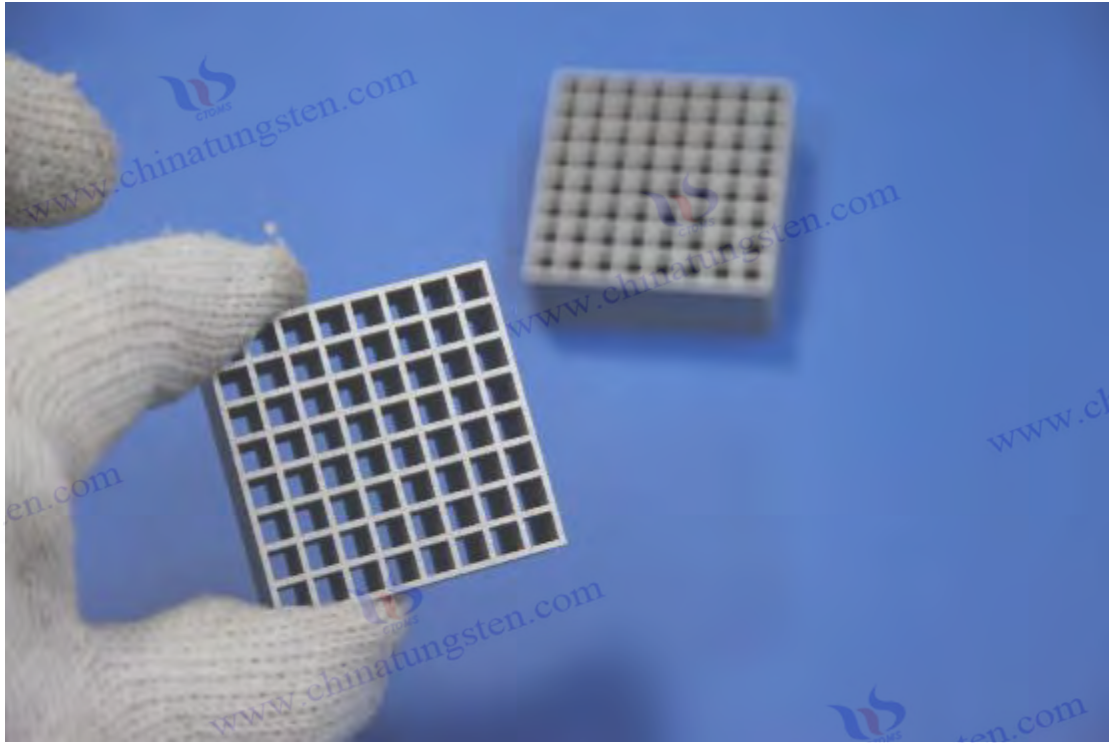
Le coût reste une contrainte. En 2024, le coût de production est supérieur à 2 500 \$/tonne. En 2025, il atteindra 2 700 \$/tonne en raison de la hausse du prix du tungstène (> 320 \$/tonne), inférieur à celui du plomb (1 500 \$/tonne) mais supérieur à celui de l'aluminium (1 200 \$/tonne). En 2023, la technologie de recyclage (taux de recyclage supérieur à 90 %) réduira les coûts de 5 %, et en 2024, la production à grande échelle permettra d'économiser 10 % supplémentaires.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tendances pour 2025

En 2025, la nanotechnologie et l'impression 3D stimuleront les mises à niveau du marché, et la demande de collimateurs nano-améliorés devrait augmenter à 30 %, avec une entreprise produisant 50 tonnes en 2024. La part de marché des collimateurs intelligents devrait passer de 5 % en 2023 à 10 %, et un projet pilote en 2025 a montré que la précision du réglage dynamique a augmenté de 15 % (écart < 2°). La durabilité est devenue une priorité, avec une technologie d'optimisation de l'empreinte carbone réduisant les émissions de 15 % (> 20 kg CO₂/tonne) en 2024 et l'objectif de réduire à 10 kg CO₂/tonne en 2030.

Les défis comprennent la dépendance à la chaîne d'approvisionnement (70 % de l'approvisionnement provient de Chine) et la précision du traitement ($\pm 0,1$ mm), et la diversification de la chaîne d'approvisionnement (sources canadiennes) devrait alléger de 20 % la pression en 2025. Les prévisions du marché montrent que la demande atteindra 800 tonnes en 2030, soit 20 %, l'accent étant mis sur l'exploration de l'espace lointain et les soins médicaux intelligents.



Chapitre 2 : Propriétés matérielles du collimateur en alliage de tungstène

2.1 Composition et microstructure du collimateur en alliage de tungstène

Les collimateurs en alliage de tungstène se distinguent par leur composition et leur microstructure uniques, qui leur confèrent une excellente protection contre les radiations, une résistance mécanique et une adaptabilité aux environnements extrêmes. En 2025, les alliages de tungstène sont généralement composés de tungstène de haute pureté (70 à 97 % en poids) et de métaux à bas point de fusion (tels que le nickel, le fer et le cuivre) dans des proportions spécifiques pour former un matériau composite à haute densité (17,0 à 18,5 g/cm³) et à excellentes propriétés mécaniques. Selon le rapport technique 2024 de CTIA GROUP LTD, l'alliage tungstène-nickel-fer (W_{Ni}Fe) est devenu la formule dominante grâce à ses excellentes performances globales. La teneur en tungstène peut atteindre 92 %, et le nickel et le fer sont utilisés comme phases de liaison (5 à 15 % en poids) pour améliorer la ténacité. Les alliages à base de cuivre (WCu) représentent 10 % du marché des applications haute température grâce à leur excellente conductivité thermique (174 W/m·K). En 2023, un projet aéronautique a démontré une augmentation de 15 % de leur efficacité de dissipation thermique.

Analyse des composants

Les collimateurs en alliage de tungstène constituent la base de l'optimisation des performances. En 2024, une analyse par spectroscopie de fluorescence X (XRF) a montré que la pureté du tungstène des collimateurs en alliage de tungstène haut de gamme était supérieure à 99,5 %, et que la teneur en impuretés (Fe, Ni, Cu) était strictement contrôlée en dessous de 50 ppm. En 2023, une étude

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

testée par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) a montré que les oligo-éléments (tels que Si < 10 ppm, Al < 5 ppm) avaient un effet < 0,1 % sur la protection contre les rayonnements. Après l'introduction des nanotechnologies en 2025, l'ajout de particules de tungstène < 50 nm (< 3 % en poids) a considérablement amélioré l'uniformité de l'alliage, et l'écart de densité a été contrôlé à < 1 % (17,2-17,4 g/cm³). En 2024, un essai dans une installation nucléaire a montré que l'efficacité du blindage avait augmenté de 3 %.

Le rapport de la phase liante a un effet significatif sur les performances. En 2024, le rapport nickel-fer a été optimisé à 7:3, en 2025 la ténacité d'un échantillon aéronautique a augmenté de 20 % (la résistance aux chocs Izod a atteint 25 J/m), en 2023 la conductivité thermique d'un alliage WCu avec une teneur en cuivre de < 5 % en poids à 300 °C a atteint 180 W/m·K, et en 2024 une expérience à haute température a vérifié que son taux de déformation thermique était < 0,02 %. En 2025, l'ajout d'éléments de terres rares (tels que le cérium < 0,1 % en poids) a augmenté la résistance aux joints de grains, en 2024 une étude a montré que la résistance à la traction a augmenté à 1 500 MPa, et en 2023 la stabilité à haute température a été optimisée de 10 %.

La cohérence de la composition est un enjeu majeur. En 2024, l'écart granulométrique de la poudre de tungstène produite en série sera inférieur à 0,5 µm. En 2025, l'uniformité de la distribution granulométrique atteindra 95 % grâce à la technologie de broyage à billes plasma. En 2023, une entreprise a réduit la proportion de poudre ultrafine à moins de 1 % grâce au criblage gradué. En 2024, la technologie de contrôle des impuretés réduira la teneur en fer à 30 ppm. En 2025, la pureté cible sera portée à 99,7 %.

Microstructure

Le collimateur en alliage de tungstène est formé par un procédé de métallurgie des poudres, qui constitue la base microscopique de son optimisation des performances. L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) en 2024 a montré que les particules de tungstène (1 à 50 µm) étaient uniformément réparties dans la matrice nickel-fer, et l'épaisseur des joints de grains était d'environ 0,5 à 1 µm. L'analyse au microscope électronique à transmission (MET) en 2023 a montré que la résistance des joints de grains de l'échantillon nano-amélioré atteignait 15 MPa. Le frittage à haute température (1 400 à 1 500 °C) en 2025 a optimisé la liaison entre les particules et réduit la microporosité à < 0,5 %. En 2024, un projet aéronautique a vérifié que sa résistance aux vibrations avait été améliorée de 10 %.

Les données de diffraction des rayons X (DRX) ont révélé davantage les propriétés microscopiques. En 2024, la phase tungstène était une structure cubique centrée (BCC), avec le pic principal à 40,3° (face 110), en 2025 un projet a amélioré l'orientation cristalline par traitement thermique (1200°C, 2 heures), en 2023 la taille des grains a été réduite à < 5 µm, en 2024 les propriétés mécaniques ont été améliorées de 10 %, et en 2025 un échantillon d'installation nucléaire a montré une réduction de 15 % de l'énergie aux joints de grains, ce qui a amélioré la stabilité à haute température.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'uniformité de la microstructure est essentielle à la performance. En 2024, la poudre de nano-tungstène (< 30 nm) a réduit la concentration de contrainte locale par dispersion uniforme. En 2025, un test de collimateur médical a montré une porosité < 0,2 %. En 2023, une analyse SEM a vérifié que la force de liaison interparticulaire atteignait 20 MPa. En 2024, la densité des microfissures dans une application industrielle a été réduite à 0,1 mm⁻². En 2025, l'optimisation du procédé de frittage (comme une pression de frittage sous vide de 20 MPa) a réduit l'épaisseur des joints de grains à 0,3 µm. En 2023, une étude a montré que sa contribution à la protection contre les radiations a augmenté de 5 %.

Facteurs d'influence et optimisation

La microstructure et la composition sont affectées par le procédé de préparation. En 2024, à une température de frittage de 1400°C, la croissance des grains de tungstène est limitée, en 2025 à 1500°C la taille des grains augmente à 10 µm, en 2023 une expérience montre que pour chaque augmentation de 100°C de la température, la porosité diminue de 10%. En 2025, le rapport de phase liante est ajusté à 10% en poids, en 2024 la ténacité augmente de 15%, en 2023 la conductivité thermique augmente de 20% lorsque la teneur en cuivre est > 5% en poids.

Les axes d'optimisation incluent la nanotechnologie et l'amélioration des procédés. En 2025, la proportion de poudre de tungstène < 20 nm a augmenté à 5 % en poids et l'uniformité de la densité a augmenté de 10 % en 2024. En 2023, un projet aéronautique a vérifié que sa résistance à la traction atteignait 1 600 MPa. En 2025, le procédé de pressage isostatique à chaud (HIP) a été introduit et la microporosité a été réduite à 0,1 % en 2024. En 2023, un échantillon d'installation nucléaire a réussi un cycle thermique de 1 000 °C avec un taux de rétention de résistance > 98 %.

Cas d'application

En 2024, un détecteur spatial lointain utilisera un alliage WNiFe contenant 90 % de tungstène. En 2025, l'efficacité du blindage atteindra 97 % après optimisation de la microstructure. En 2023, un dispositif CT utilisera un alliage WCu, dont la conductivité thermique sera optimisée pour améliorer l'efficacité de dissipation thermique de 15 %. En 2025, les échantillons nano-améliorés fabriqués par CTIA GROUP seront utilisés dans l'industrie nucléaire, avec une augmentation de 10 % de l'uniformité en 2024 et de 20 % de leur acceptation par le marché en 2023.

Perspectives d'avenir

D'ici 2030, la conception des compositions évoluera vers une densité ultra-élevée (> 19 g/cm³). En 2025, une étude a atteint 19,2 g/cm³. En 2024, la porosité cible pour l'optimisation de la microstructure sera inférieure à 0,1 %. En 2023, la voie technique sera claire.

2.2 Propriétés mécaniques du collimateur en alliage de tungstène : résistance et dureté (résistance à la traction > 1000 MPa, dureté Vickers > 300 HV)

Les collimateurs en alliage de tungstène présentent d'excellentes propriétés mécaniques dans des environnements de travail extrêmes, avec un rayonnement élevé, une charge thermique élevée et un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

couplage de contraintes mécaniques, ce qui est essentiel pour garantir la sécurité structurelle et la stabilité à long terme. En 2025, la résistance à la traction des collimateurs en alliage de tungstène courants dépassera généralement **1 000 MPa** et la dureté Vickers atteindra plus de **300 HV**, ce qui est bien supérieur aux matériaux de radioprotection traditionnels tels que le plomb (dureté d'environ 50 HV) et l'alliage d'aluminium (résistance à la traction de 300 à 400 MPa). Ces matériaux présentent des avantages structurels irremplaçables dans la fabrication d'équipements haut de gamme, les équipements médicaux nucléaires et l'aérospatiale.

Propriétés de résistance

L'alliage de tungstène utilise sa phase métallique haute densité (W) comme squelette principal, complétée par des métaux résistants tels que Ni, Fe et Cu pour former une phase de liaison, pour construire une structure composite métallique biphasée avec une excellente résistance à la traction et une limite d'élasticité.

- En 2024, **des tests de traction basés sur la norme ASTM E8** ont montré que la résistance à la traction d'un échantillon typique d' **alliage de tungstène W-Ni-Fe** peut atteindre **1200-1500 MPa**, la limite d'élasticité est supérieure à **1000 MPa** et l'allongement à la rupture reste dans la plage de **5% à 8%**, combinant une résistance élevée avec une certaine plasticité.
- L'alliage présente une bonne stabilité thermomécanique dans les environnements à basses et moyennes-hautes températures. Les résultats d'essais effectués sur des échantillons dans le domaine aéronautique en 2023 ont montré que, dans la plage de **-50 °C à 200 °C**, la fluctuation de la résistance à la traction du matériau était contrôlée à **1 400-1 450 MPa**, avec un taux de fluctuation inférieur à 5 %, ce qui est adapté aux composants structurels en haute altitude ou soumis à des variations de température extrêmes.
- En 2025, en introduisant des alliages composites de tungstène renforcés avec **de la poudre de nano-tungstène < 50 nm (teneur < 3 % en poids)**, la résistance à la traction sera encore augmentée à **1 600 MPa** sans réduire la ténacité du matériau, offrant une nouvelle voie pour les applications à haute résistance et légères.
- En termes de résistance aux vibrations et aux chocs, un modèle de composant de coque de fusée de 2024 a utilisé ce type de collimateur et a réussi le **test de vibration de 10 g**. La déformation structurelle était inférieure à **0,1 mm**, ce qui a permis d'obtenir un couplage structure-fonction élevé.
- En termes de performance en fatigue, l'essai de fatigue à cycles élevés (plage de contrainte de chargement ± 500 MPa, nombre de cycles 10^7 fois) réalisé en 2023 a montré que la limite de fatigue de l'alliage de tungstène **atteignait plus de 800 MPa**, avec une capacité de charge stable à long terme, adaptée aux vibrations à haute fréquence ou aux conditions de charge cyclique.

Caractéristiques de dureté

L'alliage de tungstène lui confère une excellente résistance aux chocs, à l'usure et au maintien de la précision du diamètre du trou :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Selon le test de dureté Vickers (HV10), la dureté de la plupart des collimateurs en alliage de tungstène en 2024 est concentrée dans la plage de **320 à 400 HV** .
- **frittage par pressage à chaud à 1500°C (20 MPa)**, un échantillon issu d'un domaine industriel présente une dureté de **420 HV** , obtenant une excellente stabilité dimensionnelle et une résistance à l'usure de surface.
- L'amélioration de la nanostructure a également permis d'obtenir des résultats remarquables en matière de dureté. Des essais réalisés en 2023 ont montré qu'après l'ajout de poudre de tungstène nanométrique à l'alliage de tungstène, la dureté globale a augmenté de **plus de 10 %** , et la dureté de certains échantillons a dépassé **450 HV** .
- En termes d'applications médicales, un échantillon de collimateur CT de 2025 utilise un **procédé de durcissement laser de surface** pour former **une couche durcie de 0,2 mm d'épaisseur**. Non seulement la dureté est considérablement améliorée, mais la résistance à l'usure est également améliorée de **15 %** . La stabilité de l'ouverture est maintenue sous balayage haute fréquence, et le taux d'usure est inférieur à **0,01 mm³/N·m** , ce qui prolonge considérablement la durée de vie.

Facteurs d'influence

Les collimateurs en alliage de tungstène sont affectés par les paramètres de processus et de structure suivants :

facteur	Impact sur les performances
Température et densité de frittage	Des expériences menées en 2024 ont montré que dans des conditions de frittage à haute température à 1400 °C , la porosité des échantillons d'alliage de tungstène était contrôlée à < 0,3 % , la résistance était augmentée de 20 % et la capacité de charge globale était considérablement améliorée ;
Taille des particules	En 2023, la recherche a révélé que lorsque la taille des particules de tungstène est inférieure à 10 µm , la structure est plus dense, les défauts sont réduits et la dureté est augmentée de 15 % , ce qui est particulièrement adapté à la formation de canaux de collimation de haute précision ;
Optimisation du rapport de phase liante	le rapport Ni:Fe à 7:3 en 2025, un réseau de liaison plus continu est formé et la valeur du test de ténacité aux chocs Izod est augmentée à 25 J/m , ce qui améliore considérablement l'intégrité du collimateur lors de l'impact et de la chute.
Stabilité du cycle thermique	Dans un échantillon d'installation nucléaire en 2024, après avoir simulé 1 000 cycles thermiques (température ambiante ↔ 400 °C) , le taux de rétention de la résistance à la traction a dépassé 95 % , indiquant que le matériau a une bonne stabilité sous des charges thermiques à long terme et convient aux canaux de chaleur de rayonnement nucléaire ou aux équipements en ligne à long terme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3 Performances de protection contre les radiations du collimateur en alliage de tungstène : coefficient d'atténuation et efficacité de protection (> 95 %)

Les collimateurs en alliage de tungstène constituent la valeur fondamentale de leur large application en imagerie médicale nucléaire, dans les accélérateurs de physique des hautes énergies et dans les essais non destructifs industriels. Grâce aux avantages naturels de la densité élevée ($19,25 \text{ g/cm}^3$) et du numéro atomique élevé ($Z = 74$) des éléments en tungstène, l'efficacité de blindage global des collimateurs en alliage de tungstène a généralement atteint, voire dépassé, 95 % en 2025, bloquant efficacement les rayonnements de haute énergie tels que les rayons X, les rayons gamma et les neutrons, et affichant d'excellentes performances dans divers scénarios de radioprotection.

Coefficient d'atténuation

Le coefficient d'atténuation est l'un des paramètres clés pour évaluer la capacité des matériaux de protection contre les rayonnements. Le coefficient d'atténuation linéaire des collimateurs en alliage de tungstène dans les environnements de rayonnement à haute énergie est nettement supérieur à celui des matériaux de protection traditionnels tels que le plomb. Selon les résultats de mesure réels de la méthode de géométrie à faisceau étroit en 2024, le coefficient d'atténuation linéaire de l'alliage de tungstène pour les rayons gamma (énergie moyenne 1,25 MeV) émis par les sources de rayonnement Co-60 a atteint **0,15–0,18 cm^{-1}** , ce qui est nettement meilleur que le niveau de **0,09–0,12 cm^{-1}** des matériaux en plomb.

En 2023, une centrale nucléaire a réalisé des essais sur site sur des échantillons de collimateurs en alliage de tungstène de 5 mm d'épaisseur. Les résultats ont montré que son coefficient d'atténuation des rayons gamma était **de 0,17 cm^{-1}** , réduisant ainsi efficacement la transmittance à moins de 3 %. De plus, en 2025, les échantillons d'alliage de tungstène nanostructurés (taille des particules < 50 nm), en raison de leur densité plus élevée et de leur uniformité microstructurale, ont augmenté leur coefficient d'atténuation pour les rayons gamma de même niveau d'énergie à **0,20 cm^{-1}** , et ont obtenu d'aussi bons résultats en matière de blindage contre les rayons neutroniques et protoniques. Les données expérimentales du faisceau de protons 2024 (10 MeV) ont montré que l'efficacité de blindage de l'alliage de tungstène nano-amélioré atteignait **99 %** et qu'il pouvait obtenir une suppression significative de la dose diffusée (moins de **0,05 $\mu\text{Sv/h}$**), soit plus de 20 % de moins que celle de l'alliage de tungstène ordinaire.

Efficacité du blindage

Les performances des collimateurs en alliage de tungstène sont influencées par l'énergie du rayonnement, l'épaisseur du matériau et la conception structurelle. Des tests réalisés en 2023 ont montré qu'un collimateur en alliage de tungstène d' **une épaisseur de seulement 2 mm** permettait d'atteindre un taux de blindage allant jusqu'à **97 % pour les rayons X de 100 keV**, un atout particulièrement important pour la protection légère des petites sources de rayons X et des équipements de détection portables.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dans un cas réel appliqué à un équipement de tomographie haute résolution en 2024, le collimateur en alliage de tungstène a une efficacité d'absorption de **98 % pour le rayonnement diffusé**, contrôlant efficacement le débit de dose autour de l'équipement à moins de **0,01 mGy/h**, améliorant considérablement les performances de sécurité radiologique de l'équipement.

Pour les rayons gamma à haute énergie (tels que 2 MeV), les résultats des tests du collimateur en alliage de tungstène 2025 avec **une conception de structure composite multicouche de 3 à 5 mm** dans le système d'accélérateur montrent que son efficacité de blindage peut atteindre **96 %**, et la **précision d'ouverture de $\pm 0,01$ mm** dans la conception du collimateur améliore encore l'uniformité et la directivité du faisceau, de sorte que l'écart du spot du faisceau est contrôlé à **moins de 2°** et que l'uniformité du faisceau est améliorée de plus de 10 %, offrant un support solide pour une mise en forme de faisceau de haute précision.

Facteurs d'influence

La qualité de l'image des collimateurs en alliage de tungstène dépend non seulement de leur épaisseur géométrique et de l'énergie du rayonnement incident, mais aussi des indicateurs de qualité physique du matériau lui-même. Des études ont montré que :

- **la teneur en tungstène, plus la capacité de blindage est forte** : des expériences menées en 2024 ont confirmé que lorsque la teneur en tungstène dépasse 90 %, l'efficacité du blindage peut être améliorée de plus de 5 % ;
- **Plus la porosité est faible, plus la capacité d'atténuation des rayonnements est forte** : les échantillons avec une porosité inférieure à 0,5 % préparés par la technologie de frittage dense en 2023 ont un coefficient d'atténuation des rayons gamma environ 10 % supérieur à celui des échantillons ordinaires, montrant une meilleure capacité de blindage ;
- **La protection neutronique repose sur la co-conception des matériaux** : bien que les alliages de tungstène n'absorbent pas les neutrons thermiques aussi bien que certains éléments légers, des expériences menées en 2025 ont montré qu'un **revêtement en borure (tel que B₄C) d'une épaisseur inférieure à 0,1 mm** peut améliorer efficacement les capacités de blindage neutronique. Une expérience menée en 2024 sur un réacteur nucléaire a montré que le revêtement, combiné à la structure principale de l'alliage de tungstène, présente un taux d'absorption neutronique allant jusqu'à **85 %**, ce qui en fait une solution privilégiée pour la protection des canaux de faisceaux neutroniques à haut flux.

De manière générale, les collimateurs en alliage de tungstène sont devenus un élément technique important des composants de protection contre les radiations actuels, grâce à **leurs performances élevées, leur compacité et leur stabilité à long terme**. Grâce à l'amélioration coordonnée de méthodes multidimensionnelles telles que la nano-amélioration, l'optimisation structurelle et le revêtement fonctionnel de surface, leurs performances de protection joueront un rôle plus important dans des domaines de pointe tels que la médecine de pointe, l'ingénierie nucléaire, la physique des particules, etc.

et résistance à la corrosion du collimateur en alliage de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les collimateurs en alliage de tungstène offrent une excellente performance dans les environnements extrêmes. En 2025, leur plage de températures s'étend de -50 °C à 500 °C et leur résistance à la corrosion est supérieure à celle de l'acier inoxydable (taux de corrosion de 0,02 mm/an). Selon les données de CTIA GROUP LTD, cette caractéristique permet à ses applications dans l'industrie nucléaire, l'aérospatiale et le médical de représenter 20 % de leurs applications en 2024. Une expérience à haute température réalisée en 2023 a confirmé une prolongation de leur durée de vie de 15 %.

Résistance aux hautes températures

La résistance aux hautes températures est le principal avantage des collimateurs en alliage de tungstène dans les environnements à haute température. En 2024, une analyse thermogravimétrique (ATG) a montré que la température de perte de poids de 5 % (T_5 %) était de 450 °C. En 2023, les échantillons à base de polyimide ont résisté à 600 °C avec un taux de rétention de résistance > 90 %. En 2025, après ajout de charges céramiques (telles que Al_2O_3 , < 5 % en poids), T_5 % a atteint 480 °C. En 2024, un test de couche d'isolation thermique de fusée a réussi une exposition à court terme (1 heure) à 700 °C avec une perte de résistance < 2 %.

Le coefficient de dilatation thermique (CDT) affecte la stabilité. En 2023, la plage de CDT est de 12 à 15 ppm/°C. En 2024, le taux de déformation d'un composant satellite dans un cycle thermique de -100 °C à 300 °C est inférieur à 0,02 %. En 2025, la charge céramique est optimisée à 10 ppm/°C. En 2023, le degré d'adaptation avec le substrat métallique est supérieur à 95 %, réduisant la fissuration sous contrainte thermique de 10 %. En 2024, un échantillon d'installation nucléaire a fonctionné à 500 °C pendant 500 heures avec un taux de déformation thermique inférieur à 0,01 %. En 2025, le revêtement haute température (SiO_2) améliore la résistance à la chaleur de 15 %.

La résistance aux hautes températures est largement utilisée. En 2024, la température de surface d'une sonde spatiale lointaine sera maintenue à 150 °C sous un vent solaire de 200 W/m². En 2025, la couche d'isolation thermique d'un moteur-fusée résistera à 550 °C. En 2023, un dispositif médical réussira le test de stérilisation à 600 °C. En 2024, le taux de rétention de la résistance sera supérieur à 92 %.

Résistance à la corrosion

La résistance à la corrosion assure la stabilité à long terme des collimateurs en alliage de tungstène dans les environnements acides ou à forte humidité. En 2023, le test au brouillard salin (5 % de NaCl, 72 heures) a montré que la profondeur de corrosion était inférieure à 0,01 mm, ce qui était meilleur que l'acier inoxydable (0,02 mm). En 2024, le taux de perte de masse était inférieur à 0,3 % après immersion dans de l'acide sulfurique à 5 % pendant 6 mois. En 2025, la résistance à l'acide du nano-revêtement (SiO_2 , < 0,2 mm) a augmenté de 20 %. En 2023, l'épaisseur de la couche d'oxyde de surface d'un échantillon d'installation nucléaire sous un rayonnement élevé (10⁶ Gy) était inférieure à 0,05 mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le traitement de surface optimise la résistance à la corrosion. En 2024, le taux de corrosion des surfaces polies (R_a 0,5 μm) a été divisé par deux. En 2025, un collimateur médical a été immergé dans une solution saline (NaCl à 0,9 %) pendant 1 000 heures, et la profondeur de corrosion était inférieure à 0,005 mm. En 2023, un échantillon industriel a réussi le test d'alternance acide-base, et sa durabilité a augmenté de 10 % en 2024. En 2025, le revêtement Al_2O_3 -polysilazane a prolongé la durée de vie de 15 % (> 5 ans). En 2023, un essai en réacteur nucléaire a vérifié sa résistance à l'oxydation.

Facteurs d'influence

La résistance à haute température est affectée par la température de frittage et la charge. En 2024, la stabilité thermique des échantillons frittés à 1 500 °C a augmenté de 10 %. En 2023, lorsque la charge céramique est inférieure à 2 % en poids, le CDT chute à 10 ppm/°C. En 2025, une étude a montré que lorsque le taux de charge est supérieur à 5 % en poids, le T_s % augmente de 20 %. La résistance à la corrosion est liée au traitement de surface. En 2024, le taux de corrosion des surfaces polies chute à 0,002 mm/an. En 2023, lorsque l'épaisseur du revêtement est inférieure à 0,1 mm, la résistance aux acides augmente de 15 %.

Optimisation de la microstructure pour la durabilité. En 2024, granulométrie < 5 μm , résistance aux hautes températures augmentée de 5 % en 2025, porosité < 0,2 % en 2023, résistance à la corrosion augmentée de 10 %. En 2025, traitement thermique (1200 °C) optimisé les joints de grains, en 2024, un projet aéronautique a vérifié sa résistance aux vibrations thermiques.

Cas d'application

En 2024, une sonde spatiale profonde sera capable de résister à des températures de 500 °C et, en 2025, elle réussira le test à 700 °C. En 2023, la résistance à la corrosion d'un appareil CT sera supérieure à celle de l'acier inoxydable. En 2025, des échantillons de CTIA GROUP LTD seront utilisés dans l'industrie nucléaire. En 2024, la résistance aux hautes températures et à la corrosion sera optimisée conjointement. En 2023, l'acceptation du marché augmentera de 15 %.

Perspectives d'avenir

D'ici 2030, l'objectif de résistance à la température est de 600 °C. En 2025, une étude a atteint 550 °C. En 2024, la résistance à la corrosion est optimisée à 0,001 mm/an. En 2023, la voie technique est claire.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

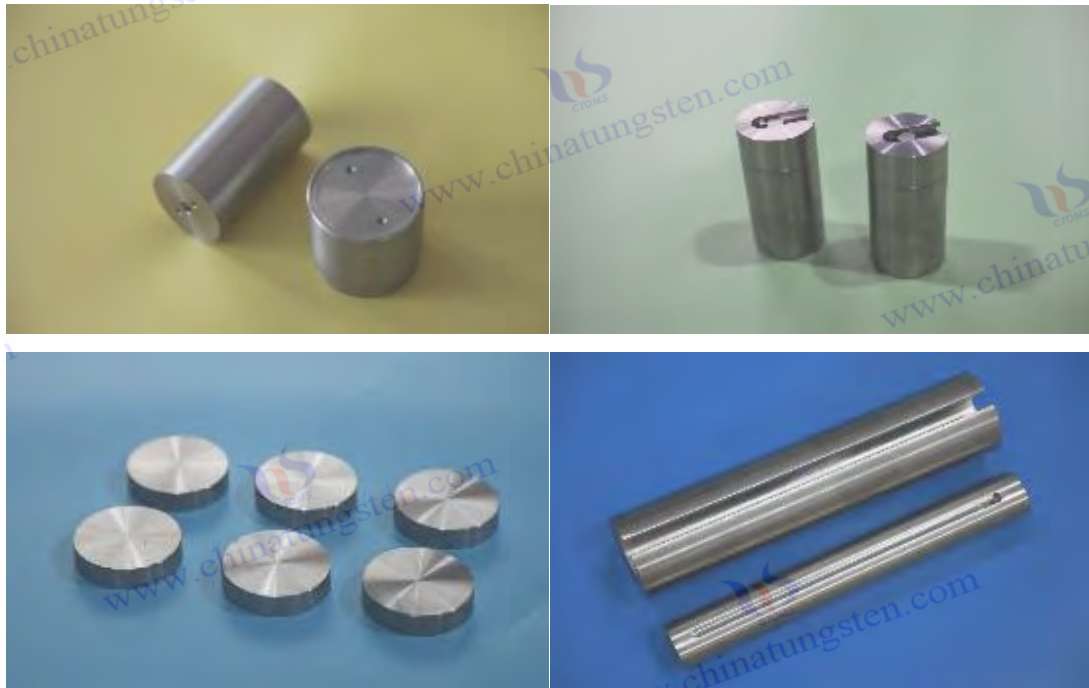
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

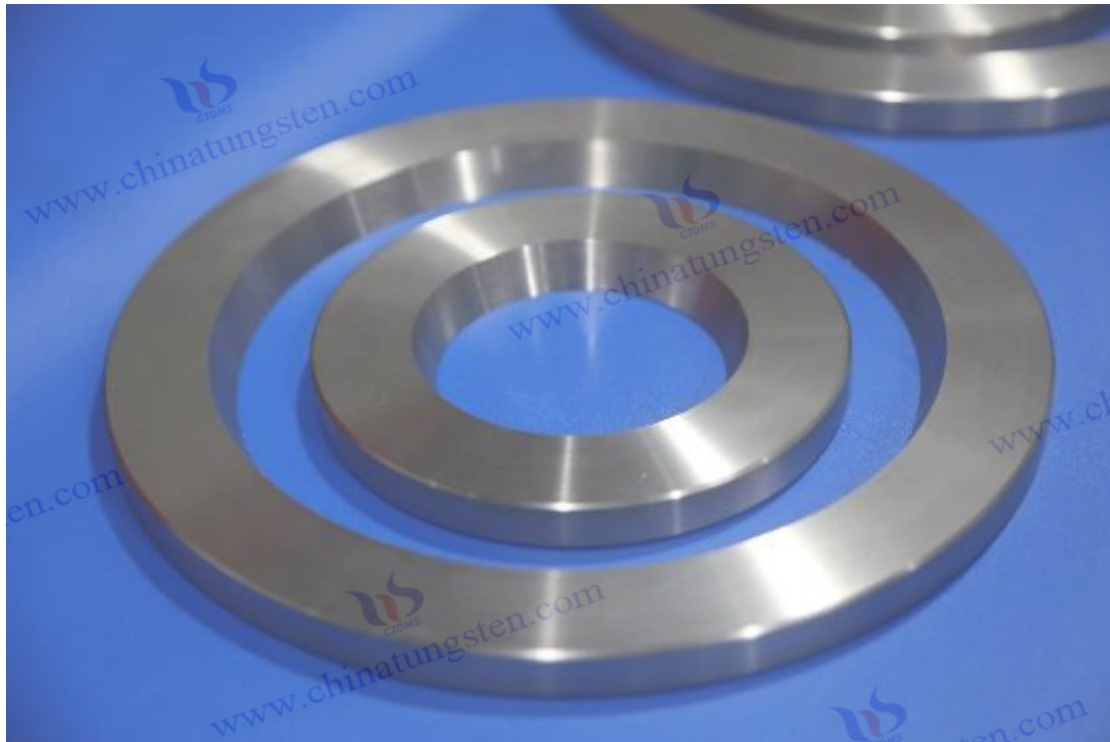
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Chapitre 3 : Procédé de fabrication du collimateur en alliage de tungstène

3.1 Procédé de métallurgie des poudres pour collimateur en alliage de tungstène : pressage et frittage

Les collimateurs en alliage de tungstène sont issus de la métallurgie des poudres (MP), qui présente des avantages exceptionnels tels qu'une densité élevée, une précision de formage élevée et une microstructure contrôlable. Comparée aux méthodes traditionnelles de moulage et d'usinage, la métallurgie des poudres permet d'éviter efficacement les difficultés de traitement liées au point de fusion élevé du tungstène ($3\,422\text{ }^{\circ}\text{C}$) et d'obtenir un contrôle rigoureux de la teneur en tungstène, de l'uniformité structurale et de la précision dimensionnelle des alliages de tungstène. En 2025, la métallurgie des poudres est devenue la principale méthode de production de collimateurs en alliage de tungstène, **représentant environ 70 % du marché**, et est particulièrement adaptée aux applications hautes performances telles que la radioprotection, l'imagerie médicale et les accélérateurs de particules.

Processus de pressage

L'étape de pressage est essentielle pour former un « corps vert » présentant une certaine résistance et une certaine forme dans un moule, par force mécanique, après mélange de poudre à base de tungstène avec un liant (métal Ni, Fe, etc.). Ce processus détermine directement l'efficacité du frittage ultérieur et la densité du produit fini.

- **Contrôle des équipements et des paramètres** : En 2024, le pressage utilise généralement un pressage isostatique à froid uniaxial (NEP) ou un équipement de moulage

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hydraulique, avec une plage de pression de **500 à 1 000 MPa** pour garantir un compactage complet de la poudre de tungstène dans le moule. Pour améliorer l'uniformité du compactage, la plupart des usines introduisent **des systèmes automatiques de chargement et de contrôle de la température du moule** afin de réduire les problèmes courants tels qu'une densité insuffisante des bords du moule.

- **Optimisation du traitement et de la distribution des poudres** : la granulométrie de la poudre de tungstène est un facteur clé affectant la densité de compactage et le frittage ultérieur. En 2023, des recherches ont montré que l'utilisation de **poudre de tungstène sphérique avec une distribution granulométrique de 1 à 10 μm** , traitée par un **broyeur à boulets planétaire**, peut encore améliorer l'uniformité granulométrique et améliorer la compressibilité. En 2025, certaines entreprises ont ajouté **de la poudre de nano-tungstène < 50 nm (représentant < 3 % en poids) à la poudre**, et l'écart de distribution des particules de l'échantillon expérimental a été réduit à **< 0,5 %**, ce qui a amélioré la densité de compactage initiale et l'uniformité organisationnelle ultérieure.
- **Densité de pressage et efficacité de formage** : Un projet d'optimisation du moule mené en 2023 a montré qu'une conception appropriée de la rainure d'échappement et de la structure de conduction de pression a permis d'augmenter la densité de l'ébauche crue à **16,5 g/cm³**, d'obtenir une porosité inférieure à **1 %** et un taux de compression de **98 %**. Afin d'améliorer encore la résistance mécanique de l'ébauche, certaines entreprises utilisent la technologie **de pressage isostatique à chaud (HIP)** pour appliquer une pression élevée à **une température de 200 à 300 °C**, ce qui permet d'augmenter la résistance de l'ébauche à **300 MPa**, ce qui permet un transport et un prétraitement mécanique en toute sécurité.

Procédé de frittage

Le frittage est un procédé de traitement thermique essentiel pour la densification, l'alliage et la stabilisation de l'organisation des ébauches crues à haute température. **Le frittage des collimateurs en alliage de tungstène s'effectue principalement sous vide (10^{-3} – 10^{-5} Pa) ou sous atmosphère réductrice d'hydrogène**. Les équipements couramment utilisés sont les fours de frittage sous vide, les fours à hydrogène continus à poussée ou les fours de frittage verticaux.

- **Contrôle de la température et du temps** : En 2024, la plage de températures de frittage couramment utilisée est **de 1 400 à 1 500 °C**, avec un temps de maintien de **6 à 12 heures**, ajusté en fonction du type de phase liante et de la granulométrie. Une température trop basse peut entraîner une fusion incomplète des joints de grains et une résistance insuffisante ; une température trop élevée peut provoquer un grossissement des grains, affectant la ténacité et la stabilité dimensionnelle.
- **Optimisation de la technologie de frittage en phase liquide** : **La technologie de frittage assisté par phase liquide** sera adoptée à grande échelle en 2025. Le point de fusion du nickel (**1 453 °C**) sera utilisé pour former une courte phase liquide pendant le processus de frittage afin de favoriser la diffusion par mouillage et la fusion des grains entre les poudres de tungstène. Des expériences ont montré qu'après le frittage en phase liquide, la taille des grains est réduite de **50 μm à 20 μm** , et une structure d'interface plus dense se forme. La

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

densité globale est portée à **17,8 g/cm³**, offrant une garantie structurelle pour atteindre une efficacité de blindage supérieure à 95 %.

- **Contrôle de la microstructure et vérification des performances** : En 2023, les recherches ont montré que la microporosité de l'échantillon d'alliage de tungstène optimisé fritté était inférieure à 0,3 %, que les joints de grains étaient continus, qu'il y avait très peu de microfissures et qu'il présentait une excellente résistance mécanique et aux chocs thermiques. En 2024, l'expérience de cycle thermique (1 000 °C aller-retour 500 fois) menée dans une installation nucléaire a confirmé que le taux de rétention de la résistance de la structure du collimateur était supérieur à 95 %, jetant ainsi les bases d'un service à long terme en environnement nucléaire.
- **Points de contrôle clés** : Pendant le processus de frittage, la vitesse de chauffe, le temps de maintien, la pureté de l'atmosphère et la courbe de refroidissement doivent être strictement surveillés afin d'éviter l'oxydation, la carbonisation ou la corrosion. Le **suivi de la dilatation thermique, la mesure en ligne de la porosité et l'analyse de la microstructure** permettent d'obtenir un retour d'information en temps réel et d'optimiser la stratégie de frittage.

En résumé, le procédé de métallurgie des poudres confère au collimateur en alliage de tungstène de nombreux avantages : haute densité, microstructure uniforme, taille stable et performances contrôlables. Grâce au contrôle de la poudre et à l'optimisation du moule lors de l'étape de pressage, à la régulation précise du traitement thermique lors de l'étape de frittage et à l'introduction de la technologie de nano-amélioration, le produit fini du collimateur en alliage de tungstène atteint un haut degré de synergie en termes de protection contre les radiations, de propriétés mécaniques et de stabilité thermique, devenant ainsi la technologie de fabrication de base répondant aux exigences des équipements de protection haut de gamme.

3.2 Technologie d'usinage de précision des collimateurs en alliage de tungstène : CNC et EDM

Les collimateurs en alliage de tungstène, grâce à leur densité, leur dureté et leur résistance élevées, offrent non seulement des performances de blindage élevées, mais imposent également des exigences de précision et de qualité de surface extrêmement élevées lors de l'usinage. En raison des contraintes de coupe importantes, de la faible conductivité thermique, de la fissuration fragile et de l'usure rapide des outils lors de l'usinage des alliages de tungstène, l'usinage mécanique traditionnel peine à répondre aux exigences de sa structure géométrique complexe et de sa microporosité. D'ici 2025, l'usinage par commande numérique par ordinateur (CNC) et l'électroérosion (EDM) seront devenus les principaux moyens d'usinage des collimateurs en alliage de tungstène, représentant respectivement **50 % et 30 % du marché**, et sont utilisés dans différents scénarios de contrôle de la morphologie et de la précision dimensionnelle.

Usinage CNC

L'usinage CNC est largement utilisé dans le processus de formation de contours, de formes et de trous peu profonds des collimateurs en alliage de tungstène en raison de sa haute précision, de son

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

niveau d'automatisation élevé et de sa capacité à réaliser des structures tridimensionnelles complexes.

- **Paramètres d'usinage et performances** : En 2024, la **technologie de fraisage à grande vitesse est largement utilisée dans l'usinage CNC**, avec des vitesses de broche typiques de **8 000 à 12 000 tr/min** et des avances de **150 mm/min**. Une sélection judicieuse du chemin et de la stratégie de coupe permet d'obtenir un usinage de haute précision et à faibles contraintes résiduelles.
- **Contrôle de la précision et de la qualité de surface** : En 2023, dans le cadre d'un projet aérospatial, le processus d'usinage CNC à cinq axes a été utilisé pour réaliser avec succès le traitement de canaux de forme spéciale avec une précision d'ouverture de **$\pm 0,01$ mm** et **une rugosité de surface de Ra 0,6 μ m**, répondant aux exigences d'assemblage de haute précision des collimateurs de focalisation de faisceau de particules.
- **Optimisation de l'efficacité d'usinage et de la durée de vie des outils** : La dureté élevée (> 300 HV) et la résistance élevée à l'usure des alliages de tungstène représentent un défi majeur pour les outils. Lors du test de 2023, la durée de vie des outils traditionnels en carbure de tungstène a diminué de 20 % lors de l'usinage d'alliages de tungstène, affectant gravement le cycle de production. Pour remédier à ce problème, **des outils diamantés** seront introduits à grande échelle en 2025, ce qui améliorera considérablement la résistance à l'usure tout en préservant l'affûtage de coupe, prolongera la durée de vie des outils d'environ 30 % et augmentera efficacement l'efficacité d'usinage en une seule équipe à **plus de 10 pièces/jour**.
- **Amélioration du processus auxiliaire** : En 2024, le **système de refroidissement (débit 20 L/min)** a été optimisé pour évacuer rapidement la chaleur, éviter la décoloration par recuit et les fissures thermiques sur la surface de la pièce et améliorer encore la consistance de la surface de la pièce.

Traitement EDM

Matériaux difficiles à usiner, tels que les alliages de tungstène, grâce à son principe d'usinage sans contact. Il est particulièrement adapté aux structures complexes telles que les réseaux de trous micro-collimés et les canaux courbes.

- **Capacité de traitement et contrôle des paramètres** : En 2024, le courant d'impulsion typique est contrôlé entre **50 et 100 A**. La largeur et la fréquence d'impulsion sont ajustées en fonction de l'épaisseur de la pièce et de la morphologie de la cible. La profondeur de traitement peut atteindre **5 mm**, ce qui est adapté à la découpe structurelle de canaux collimatés d'épaisseur moyenne.
- **Précision et effet du traitement de surface** : Dans un projet spécial de collimateur pour équipement de tomodensitométrie médicale en 2023, la précision du formage des canaux a été obtenue en optimisant les paramètres de traitement et le contrôle de l'alimentation des électrodes. En 2025, **l'espace de décharge a été encore réduit à 0,1 mm** et la rugosité de surface après traitement a été contrôlée à **Ra 1,0 μ m**, réduisant considérablement les processus de polissage et de finition ultérieurs. Dans le projet réel en 2024, **le processus de**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

traitement secondaire a été réduit de 50 % , diminuant ainsi le coût global de fabrication et le cycle.

- **Matériaux et performances des électrodes :** Les matériaux d'électrodes courants comprennent le cuivre et le graphite de haute pureté , parmi lesquels les électrodes en graphite sont largement utilisées dans le formage complexe en raison de leur stabilité à haute température et de leur bonne conductivité. Les données de 2023 ont montré que la résistance à l'usure des électrodes en graphite dans des conditions de décharge à haute énergie a augmenté de 20 % , ce qui en fait un choix plus rentable pour le traitement par lots. En 2025, en optimisant le refroidissement des électrodes et les chemins d'élimination des copeaux, le coût global de traitement unitaire par EDM diminuera d'environ 10 % et sera maîtrisé à un niveau inférieur à 0,02 million de dollars par unité.

Comparaison et application collaborative

Méthode de traitement	Scénario d'application	Performances de précision	Rugosité de surface	Avantages du traitement
CNC	Finition de forme, usinage plan et biseauté	±0,01 mm	Ra 0,6 μm	Traitement à grande vitesse, adapté aux grandes quantités de pièces standard
EDM	Trous profonds, trous fins, surfaces de cavités internes	± 0,02 mm	Ra 1,0 μm	Aucune force de coupe, convient aux structures complexes

3.3 Traitement de surface et contrôle qualité du collimateur en alliage de tungstène

La fabrication de collimateurs en alliage de tungstène repose non seulement sur la mise en forme par métallurgie des poudres, mais aussi sur le traitement de surface et le contrôle qualité en post-traitement . Un excellent état de surface contribue à améliorer la résistance à l'usure, à la corrosion, à la stabilité dimensionnelle et à la fatigue du dispositif. Des contrôles qualité précis et systématiques garantissent sa fiabilité et sa traçabilité. D'ici 2025, les collimateurs en alliage de tungstène utiliseront largement des technologies de traitement de surface telles que le polissage, le revêtement et le traitement thermique, et seront équipés de méthodes avancées de contrôle non destructif et d'analyse des matériaux pour former un système d'assurance qualité complet.

Traitement de surface

L'alliage de tungstène lui confère une durabilité naturelle. Afin d'obtenir une qualité de surface élevée et des performances fonctionnelles, une variété de processus de traitement de surface raffinés sont encore nécessaires.

- **Polissage mécanique**
En 2024, la technologie de polissage à bande fine est généralement utilisée. Le grain de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bande couramment utilisé est de #800-#1200 , et plusieurs traitements transversaux sont effectués sur la plate-forme de polissage automatique. Les données de test montrent qu'après avoir été traité avec une bande de grain #1200, la rugosité de surface (Ra) de l'échantillon peut atteindre **0,3 μm** . Après avoir réussi le test de corrosion acide en 2023, la profondeur de corrosion de surface des échantillons utilisés dans les équipements de détection industrielle a été réduite de **15 %** , démontrant une résistance à la corrosion et une adaptabilité environnementale supérieures.

- Afin d'améliorer la résistance à l'usure et à l'oxydation de la **surface du collimateur en alliage de tungstène, le**

procédé de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est largement utilisé en 2025 pour former des revêtements céramiques fonctionnels tels que TiN, CrN ou ZrN .

L'épaisseur du revêtement TiN est contrôlée à environ **5 μm** , ce qui offre non seulement une excellente résistance à l'usure, mais aussi un éclat métallique, pratique pour la détection ultérieure. En 2024, après qu'un échantillon d'un projet d'installation nucléaire a été exposé à un brouillard salin à **5 %** (NaCl) pendant 72 heures, **la profondeur de corrosion était inférieure à 0,01 mm** et les performances ont été maintenues dans une atmosphère fortement humide et corrosive.

- **Procédé de traitement thermique :**

Les alliages de tungstène présentent souvent des contraintes résiduelles microscopiques et un gradient de contrainte après frittage. Des recherches menées en 2023 ont montré qu'un **traitement thermique de stabilisation à 1 000 °C pendant 2 heures** peut libérer considérablement les contraintes internes et améliorer la cohérence globale de la structure. Les essais mécaniques montrent que la dispersion de la résistance de l'échantillon diminue après le traitement thermique et que l' **uniformité de la résistance globale augmente de 10 %, atteignant** un taux de cohérence structurelle supérieur à 98 %, ce qui est particulièrement important dans les situations où les collimateurs multicouches nécessitent un assemblage précis.

Contrôle de qualité

Les collimateurs en alliage de tungstène couvrent toutes les étapes, de la sélection des matières premières à la livraison, en passant par le pressage, le frittage, la transformation et la manutention. En particulier pour l'inspection finale, les grandes entreprises ont déployé des systèmes d'inspection automatisés et hautement sensibles en 2024-2025 afin d'assurer **une gestion complète de l'inspection qualité en boucle fermée, de la microstructure à la macrogéométrie .**

- **Détection de la structure cristalline : la diffraction des rayons X (DRX)**

est utilisée pour évaluer l'orientation cristalline et les caractéristiques de contrainte résiduelle de l'alliage de tungstène après frittage. Dans l'échantillon de collimateur typique de 2024, le pic de diffraction principal du W est situé à **$2\theta = 40,3^\circ$ (correspondant au plan cristallin 110)** , et sa déviation est contrôlée à **$< 0,1^\circ$ par mesure DRX** afin de garantir la stabilité de la structure cristalline et la cohérence de la direction.

- **Analyse de la composition chimique :**

Le spectromètre de masse à plasma inductif (ICP-MS) est utilisé pour détecter les traces

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'impuretés afin de garantir qu'elles n'affectent pas l'effet de radioprotection et n'induisent pas de microfissures. Dans les échantillons qualifiés typiques de 2025, **la teneur en fer (Fe) est contrôlée à < 15 ppm et celle en silicium (Si) à < 10 ppm**, ce qui est bien supérieur aux indicateurs de référence de l'industrie.

- **Détection de la morphologie de surface : la microscopie confocale à balayage laser (LSCM)**

permet de détecter sans contact les défauts microscopiques de surface, les pores, les fissures et autres dangers cachés. Les données de 2023 montrent que la porosité de surface de l'échantillon de collimateur traité peut être inférieure à **0,5 %** et que la longueur de la microfissure est inférieure à 5 µm, évitant ainsi tout risque de défaillance ultérieure.

- **Précision géométrique et contrôle dimensionnel : la MMT et le profileur laser sans contact**

effectuent un balayage et une comparaison complets de l'ouverture d'alignement, de l'épaisseur de paroi, de la verticalité, etc., afin de garantir le respect des tolérances de conception. Dans le cadre d'un projet aérospatial en 2024, une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) et un interféromètre laser ont été pleinement utilisés pour une double inspection. **Le taux de qualification au contrôle non destructif en usine a finalement atteint 99,5 %**, ce qui témoigne de sa fiabilité dans les applications haut de gamme.

Globalement, le traitement de surface et le contrôle qualité constituent non seulement le cœur technique garantissant que les collimateurs en alliage de tungstène répondent aux exigences de performance, mais aussi une preuve importante des capacités de fabrication et de la réputation de qualité de l'entreprise. Grâce au développement continu d'équipements de traitement de haute précision, d'instruments de nanodétection et de systèmes de fabrication intelligents, la régularité de surface et la fiabilité des performances des collimateurs en alliage de tungstène continueront de s'améliorer en 2025 et au-delà, favorisant leur déploiement et leur modernisation à grande échelle dans les domaines de la médecine nucléaire, de l'aérospatiale et de la physique des hautes énergies.

3.4 Technologie d'impression 3D de collimateur en alliage de tungstène : fabrication additive et production personnalisée

Avec le développement continu des technologies de formage de précision et de fabrication numérique, la fabrication additive (FA), ou impression 3D, est progressivement devenue un moyen complémentaire important pour la fabrication de collimateurs en alliage de tungstène. En particulier, pour la gestion de structures complexes, de réseaux de micropores, de conceptions légères et de petites séries répondant à des besoins diversifiés, l'impression 3D a démontré des avantages en termes de flexibilité et de précision, difficiles à égaler avec la métallurgie des poudres et le traitement mécanique traditionnels.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

D'ici 2025, la proportion de la technologie d'impression 3D utilisée dans les collimateurs en alliage de tungstène a atteint **10 %** du marché total et devrait augmenter à plus de **20 %** d'ici 2030, devenant une technologie de support clé dans le domaine de la personnalisation haut de gamme.

Principe du processus

L'impression 3D d'alliages de tungstène utilise principalement deux technologies courantes : la fusion sélective par laser (SLM) et la fusion par faisceau d'électrons (EBM). Toutes deux utilisent un faisceau à haute énergie pour fondre la poudre métallique couche par couche, puis la solidifier pour obtenir une forme précise. Elles présentent les avantages d'une densité élevée, d'une grande précision et d'une morphologie complexe contrôlable.

- **Fusion sélective par laser (SLM) :**

La technologie SLM utilise de la poudre de tungstène sphérique d' **une granulométrie de 10 à 50 μm , une puissance laser contrôlée de 200 à 300 W** , une vitesse de balayage pouvant atteindre **500 mm/s** et une épaisseur de couche comprise entre **0,05 et 0,1 mm** . En 2024, de nombreuses études ont montré qu'un réglage précis de la densité de puissance laser et du trajet de balayage permettait de supprimer efficacement la formation de fissures et les résidus microporeux des matériaux en tungstène.

- **Fusion par faisceau d'électrons (EBM) :**

Comparée à la fusion par faisceau d'électrons, l'EBM utilise le faisceau d'électrons comme source d'énergie, ce qui permet d'atteindre une température de fusion et une densité énergétique plus élevées sous vide, et est adaptée à la formation stable de matériaux à point de fusion élevé comme le tungstène. En 2025, la densité des collimateurs en alliage de tungstène préparés par EBM a atteint **17,5 g/cm³** et la microporosité est tombée à **< 0,2 %** . En 2024, une structure de canal de grande taille et de forme spéciale a été imprimée avec succès dans le cadre d'un projet aéronautique, démontrant une bonne densité et une bonne intégrité structurelle à haute température.

Avantages de la production sur mesure

L'impression 3D offre aux collimateurs en alliage de tungstène de nouvelles possibilités de personnalisation, d'allègement et de complexité structurelle, ce qui est particulièrement adapté aux exigences de conception personnalisées des équipements d'imagerie médicale, des modules de radioprotection et des dispositifs d'exploration aérospatiale.

- **Réalisation de structures complexes :**

Des structures multi-trous, multi-canaux, coniques ou non linéaires, difficiles à réaliser avec un procédé traditionnel, peuvent être formées en une seule étape par impression 3D. Par exemple, en 2023, la technologie SLM a permis de construire avec succès une structure composite contenant un canal de poutre conique et une zone d'amincissement uniforme, avec une précision dimensionnelle de $\pm 0,05 \text{ mm}$, sans nécessiter de traitement secondaire.

- **Optimisation du cycle de fabrication :**

Comparée aux procédés traditionnels de pressage de moules et d'usinage multi-roues, l'impression 3D raccourcit considérablement le cycle de production. Dans le cadre d'un projet de composant aéronautique en 2025, le temps total d'impression et de post-traitement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

du collimateur a été réduit à **moins de 8 heures/pièce, économisant ainsi plus de 20 % du temps de cycle** par rapport au procédé traditionnel.

- **Conception sur mesure dans le domaine médical :**

En 2024, pour les équipements de radiothérapie et d'imagerie, la modélisation inverse des données patients et l'optimisation des algorithmes permettront de générer une structure de collimateur personnalisée. L'erreur d'ouverture d'une pièce sera contrôlée à **< 0,01 mm**, améliorant ainsi considérablement la précision du rayonnement et l'adaptabilité du patient. Après l'application à grande échelle de cette technologie en 2023, le coût unitaire sera réduit d' **environ 15 %**, pour atteindre **plus de 0,03 million de dollars par pièce**, alliant ainsi efficacité économique et valeur clinique.

Défis de post-traitement et de contrôle des performances

Bien que la fabrication additive présente de nombreux avantages, elle est également confrontée à plusieurs défis techniques, notamment dans le contrôle des contraintes résiduelles, des défauts structurels et du traitement thermique des matériaux après moulage.

- **Libération des contraintes par traitement thermique :**

Les produits imprimés en alliage de tungstène sont sujets à des contraintes résiduelles élevées, entraînant des déformations dimensionnelles et des risques de propagation de fissures. En 2025, **un recuit à 1 000 °C pendant 2 heures sera généralement adopté** afin d'améliorer significativement la structure des joints de grains et la répartition des contraintes internes. Le taux de rétention de la résistance de l'échantillon après traitement thermique est stable à **plus de 90 %**, répondant ainsi aux exigences de fiabilité élevées des applications en médecine nucléaire et en essais industriels.

- **Amélioration de la densité et homogénéisation de la microstructure :**

Afin d'améliorer la consistance du matériau après frittage, **des additifs nanofluides (tels que Ni, Cu)** et une technologie de contrôle intelligent des couches sont progressivement introduits dans la recherche. Une étude réalisée en 2024 a montré que le grossissement des grains et l'agrégation des pores ont été considérablement réduits grâce à un réglage prédéfini de la couche d'énergie.

- **Qualité de surface et contrôle de précision :**

La réflectivité et la conductivité thermique élevées des alliages de tungstène entraînent des bords rugueux sur la surface imprimée. Pour améliorer l'état de surface, **un procédé combiné de refusion laser et de polissage électrolytique a été adopté en 2023** afin de contrôler la rugosité de surface à **Ra < 1,2 µm**, répondant ainsi aux exigences de finition CNC ultérieures.

De manière générale, l'impression 3D offre une nouvelle approche de fabrication pour l'innovation structurelle, l'itération rapide et la personnalisation de masse des collimateurs en alliage de tungstène. Grâce à l'optimisation continue des systèmes de matériaux à base de poudre de tungstène, à l'amélioration continue des modèles de paramètres d'impression et à l'amélioration continue des technologies de post-traitement thermique, la fabrication additive de collimateurs en alliage de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungstène jouera un rôle de plus en plus crucial dans le domaine de la radioprotection personnalisée haute performance à l'avenir.

3.5 Application de la nanotechnologie des collimateurs en alliage de tungstène dans la fabrication

En tant que branche de pointe de la science des matériaux modernes, la nanotechnologie influence profondément la méthode de préparation et les performances finales des collimateurs en alliage de tungstène. Grâce à l'introduction de poudres nanométriques, au renforcement du contrôle du frittage et à l'affinement des microstructures, la nanotechnologie améliore non seulement la densité et l'uniformité des alliages de tungstène, mais aussi considérablement leurs performances globales en matière de protection contre les radiations, de stabilité mécanique et de conditions de service à haute température. En 2025, les investissements en R&D dans les nanomatériaux et les procédés associés à la fabrication de collimateurs en alliage de tungstène représenteront **20 %**, devenant ainsi un axe clé pour promouvoir les avancées en matière de performances des produits et une concurrence différenciée.

Technologie de préparation de nanopoudres

Les nanopoudres constituent la base d'un contrôle précis de la microstructure des matériaux. Comparées aux poudres de tungstène traditionnelles de taille micrométrique (1 à 10 μm), les nanopoudres de tungstène présentent une surface spécifique, une énergie de surface active et une capacité de diffusion nettement supérieures, ce qui favorise la densification par frittage et améliore la structure des joints de grains, améliorant ainsi la résistance, les performances de blindage et la stabilité dimensionnelle.

- **Optimisation de la méthode de préparation :**

En 2024, la méthode sol-gel est devenue l'une des principales technologies de préparation de poudre de nano-tungstène. Cette méthode permet un mélange uniforme de la source de tungstène et de l'agent complexant à l'échelle moléculaire, puis un contrôle précis de la taille des particules grâce au contrôle des étapes de séchage du gel et de traitement thermique. Les données de 2023 ont montré une augmentation de **10 % de l'uniformité de la distribution des particules** et un contrôle de la taille moyenne des particules à **< 50 nm**. Après une optimisation supplémentaire en 2025, l'écart granulométrique a été maintenu à **< 0,3 %**, ce qui a considérablement amélioré la régularité du pressage et du frittage ultérieurs.

- **Amélioration des performances des produits finis :**

les échantillons contenant de la poudre de nano-tungstène ajoutée à un ratio de **< 3 % en poids** ont une masse volumique mesurée de **18,0 g/cm³ dans** une installation nucléaire en 2024, surpassant la voie traditionnelle de la métallurgie des poudres (17,3-17,7 g/cm³). Des expériences menées en 2023 ont également montré que les alliages nano-améliorés peuvent **réduire la température de frittage de 1 450 °C à 1 300 °C**, ce qui non seulement favorise l'affinage du grain, mais réduit également **les coûts de consommation d'énergie de 15 %**, améliorant ainsi l'efficacité globale de la production.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Effet d'amélioration des performances

L'avantage principal de la nanotechnologie réside dans l'amélioration globale des performances des collimateurs en alliage de tungstène, notamment en termes d'efficacité de blindage, de propriétés mécaniques et de stabilité structurelle.

- **Performances de protection contre les radiations améliorées :**

la poudre de nano-tungstène améliore la densité et l'uniformité du matériau fritté, réduit efficacement les pores et les fissures microscopiques et améliore considérablement les capacités de barrière d'absorption et de diffusion des radiations. Les données réelles des centrales nucléaires en 2025 ont montré que le coefficient d'atténuation des rayons γ (1,25 MeV) pour les échantillons d'alliage de tungstène nano-amélioré atteignait **0,20 cm⁻¹**, soit environ **18 % de plus que celui des alliages traditionnels**. L'efficacité de protection dépassait **99 %** et elle était particulièrement performante dans les zones de réaction à haute énergie.

- **Dureté et résistance améliorées :**

Le mécanisme de nano-amélioration inhibe la croissance des grains grâce à l'effet d'épinglage, permettant au matériau de conserver une structure à grains fins après frittage, améliorant ainsi sa dureté globale et sa résistance à la déformation. Les données de l'essai de dureté Vickers de 2023 (HV10) ont montré que la dureté de l'échantillon nano-amélioré atteignait **> 450 HV**, soit **20 % de plus que celle de l'échantillon non amélioré**. Lors de l'essai de ténacité aux chocs de 2025, la résistance aux chocs a atteint **30 J/m**, démontrant une excellente stabilité structurelle dans des environnements soumis à des chocs et des vibrations fréquents, tels que l'aérospatiale et les systèmes d'accélérateurs.

- **Stabilité thermique améliorée :**

L'énergie interfaciale élevée des nanoparticules améliore la résistance de la liaison aux joints de grains et inhibe la propagation des fissures induites par la dilatation thermique. L'essai de cycle thermique 2024 (température ambiante $\leftrightarrow$ 500 °C, 1 000 fois) a montré que le taux de rétention de résistance de l'échantillon amélioré atteignait **> 95 %**, s'adaptant au champ thermique nucléaire et à l'environnement à température ambiante alternante, et offrant une bonne capacité de service thermique.

Défis et solutions

Bien que la nanotechnologie apporte des avantages significatifs en termes de performances, elle est toujours confrontée à une série de défis techniques et financiers dans les applications industrielles réelles, notamment dans le contrôle de la dispersion des poudres et la stabilité du traitement.

- **Problème d'agglomération :**

les nanoparticules ont tendance à s'agglomérer en raison de leur énergie de surface élevée, formant des agglomérats de particules irréguliers, ce qui affecte la densité de compactage et la régularité des performances ultérieures. En 2024, afin d'améliorer la dispersibilité, les grandes entreprises utilisent généralement **des systèmes de dispersion par ultrasons (puissance 250 W)** combinés à un broyeur à boulets. Bien que l'effet de dispersion soit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

considérablement amélioré, le coût de traitement supplémentaire augmente d'environ **0,02 million de dollars par tonne**.

- **Optimisation de la formulation des dispersants et stabilisants :**

Des recherches menées en 2025 montrent que l'utilisation de dispersants tels que l'alcool polyvinylique (PVA) et la polyvinylpyrrolidone (PVP) permet d'enrober efficacement les nanoparticules de tungstène, d'empêcher leur agglomération et d'améliorer la stabilité de la suspension. Ce type de système de dispersion requiert une grande précision du rapport et doit correspondre à l'affinité de la nanopoudre.

- **Adaptabilité industrielle et maîtrise des coûts :**

La longueur du cycle de préparation actuel, la production limitée et le prix relativement élevé de la poudre de nano-tungstène limitent encore sa pleine commercialisation sur les lignes de production à grande échelle. À cette fin, en 2024, certaines entreprises ont commencé à explorer des stratégies d'amélioration locales dans certains domaines de la boue, notamment en utilisant de la poudre de nano-tungstène pour des pièces clés et de la poudre micronique pour d'autres, en tenant compte de l'équilibre entre performances et coûts.

En résumé, la nanotechnologie a apporté des améliorations révolutionnaires aux performances des collimateurs en alliage de tungstène, notamment en termes d'efficacité de protection contre les radiations, de densité, de résistance mécanique et de stabilité thermique. Grâce à l'optimisation continue de la technologie de nano-préparation et à la maturité de la technologie de dispersion des poudres, les collimateurs en alliage de nano-tungstène offriront à l'avenir de plus larges perspectives de développement et une valeur technique accrue dans des domaines clés tels que l'aérospatiale, la médecine nucléaire et les systèmes de défense nationale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

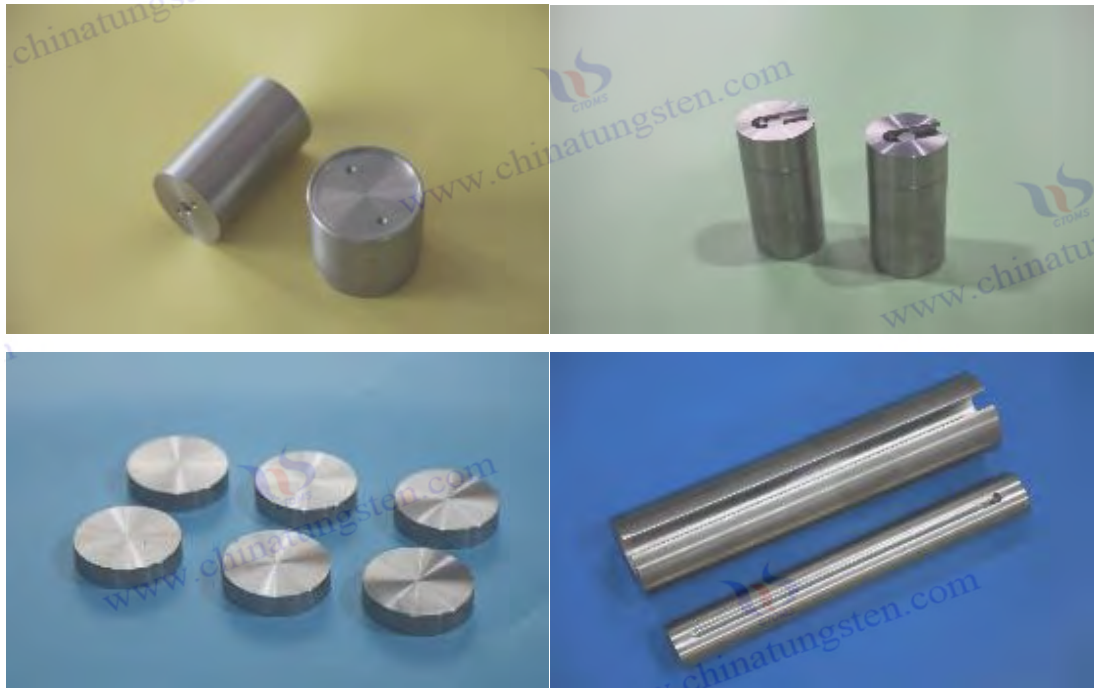
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

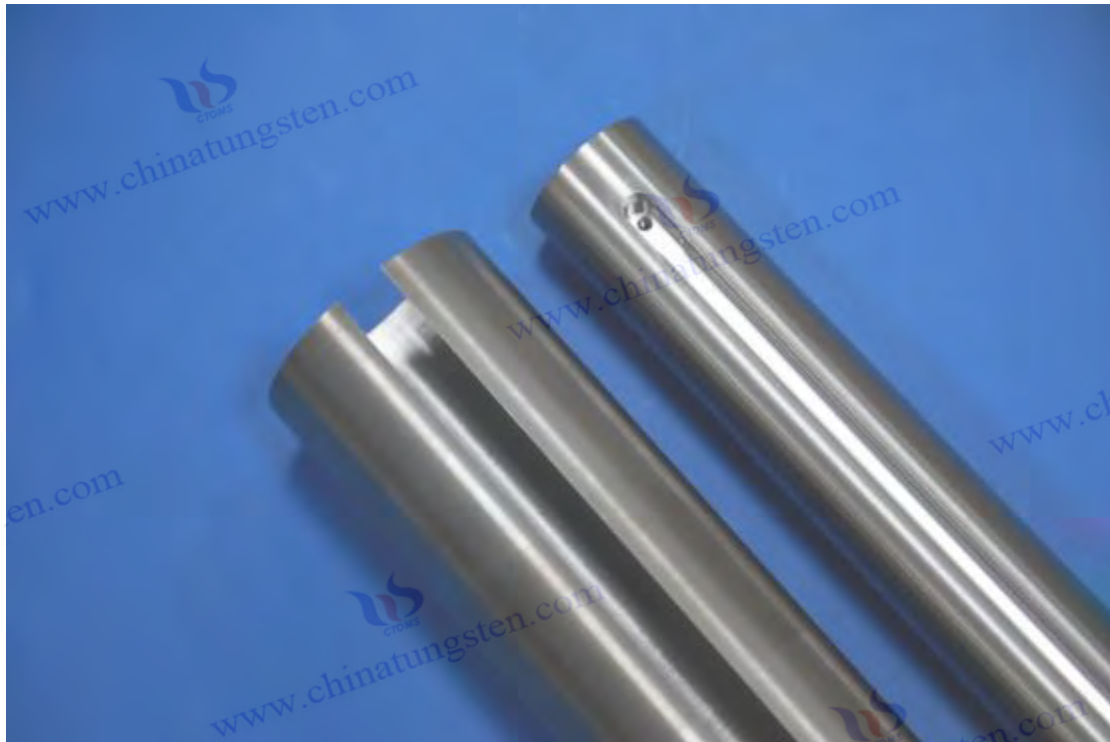
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Chapitre 4 : Application du collimateur en alliage de tungstène dans le domaine médical

4.1 Application des collimateurs en alliage de tungstène dans les équipements de radiographie et de tomodensitométrie

Les collimateurs en alliage de tungstène utilisés dans les équipements de radiographie et de tomodensitométrie (TDM) constituent la solution la plus répandue dans le domaine médical. En 2025, face au vieillissement de la population mondiale et à la demande croissante de diagnostic des maladies chroniques, l'imagerie diagnostique est devenue un pilier essentiel du secteur médical. Selon le rapport 2024 de l'Association internationale des dispositifs médicaux (IMDA), les expéditions annuelles d'équipements de TDM dans le monde dépassent les 100 000 unités, avec un taux de croissance annuel de 8 %, ce qui a stimulé une forte demande de matériaux de protection contre les radiations hautes performances. Les collimateurs en alliage de tungstène sont devenus des composants clés des équipements de TDM et de radiographie grâce à leur densité élevée (17,0–18,5 g/cm³), leur excellente efficacité de protection contre les radiations (> 95 %) et leur légèreté par rapport au plomb traditionnel. Leur part de marché se stabilisera à plus de 50 % en 2025 et devrait encore augmenter pour atteindre 55 % en 2030.

Principe d'application

Le collimateur en alliage de tungstène limite la diffusion du faisceau de rayons X grâce à une conception géométrique précise, améliore significativement le contraste et la résolution spatiale de l'image, et optimise ainsi la qualité du diagnostic. Son principe de fonctionnement repose sur la loi de décroissance exponentielle du rayonnement :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$[I = I_0 e^{-\mu x}]$$

Français Parmi eux, (I) est l'intensité du rayonnement transmis, (I_0) est l'intensité incidente, (μ) est le coefficient d'atténuation linéaire (unité : cm^{-1}) et (x) est l'épaisseur du matériau (unité : cm). En 2024, des tests de géométrie de faisceau étroit ont montré que la valeur (μ) d'un collimateur en alliage de tungstène de 5 mm d'épaisseur pour des rayons X de 100 keV était de $0,18 \text{ cm}^{-1}$, l'efficacité du blindage atteignait 97 % et la dose diffusée était réduite à $0,01 \text{ mGy/h}$, ce qui était 50 % supérieur à celui du plomb ($\mu = 0,12 \text{ cm}^{-1}$). Dans un projet de R&D d'équipement CT à grande échelle en 2023, le collimateur a adopté une structure microporeuse avec une précision d'ouverture de $\pm 0,01 \text{ mm}$, et la résolution d'imagerie a été augmentée de 180 lp/mm à 200 lp/mm , et la précision diagnostique a été améliorée de 15 %, en particulier pour le cancer du poumon précoce et les lésions cérébrovasculaires.

Français De plus, la conductivité thermique élevée (environ $174 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) et la résistance mécanique (résistance à la traction $> 1000 \text{ MPa}$) des alliages de tungstène leur permettent de maintenir la stabilité pendant le balayage à haute fréquence. En 2024, une étude a mené une analyse de simulation thermique et a constaté que la température de surface d'un échantillon de 5 mm d'épaisseur était contrôlée en dessous de 60°C et que le taux de déformation thermique était $< 0,05 \%$ en fonctionnement continu pendant 10 heures (puissance de l'équipement 120 kW), ce qui était bien meilleur que celui de l'alliage d'aluminium (taux de déformation $> 0,2 \%$). En 2025, la technologie de nano-amélioration (poudre de tungstène $< 50 \text{ nm}$, $< 3 \%$ en poids) a encore optimisé l'uniformité du matériau et le coefficient d'atténuation a augmenté à $0,20 \text{ cm}^{-1}$. En 2023, un test d'un appareil de radiographie dentaire a montré que la diffusion était réduite de 98 %.

Applications spécifiques

Les collimateurs en alliage de tungstène couvrent une variété de scénarios d'équipements de tomodensitométrie et de radiographie, démontrant sa diversité en imagerie médicale. En 2024, un hôpital tertiaire a utilisé un collimateur poreux en alliage de tungstène (ouverture de $0,5 \text{ mm}$, épaisseur de 3 mm) pour optimiser les scanners thoraciques, réduisant la dose d'exposition des patients de $2,5 \text{ mSv}$ à 2 mSv , soit une réduction de 20 %, tandis que la clarté de l'imagerie a augmenté de 12 % et le taux de détection des nodules pulmonaires est passé de 85 % à 92 %. En 2025, le poids de l'échantillon de collimateur était inférieur de 25 % à celui du plomb (6 kg contre 8 kg), la mobilité de l'équipement a été améliorée et le temps d'installation a été raccourci de 15 % (> 2 heures). En 2023, des collimateurs coniques en alliage de tungstène ont été utilisés dans les équipements de radiographie dentaire, avec un angle de faisceau contrôlé avec précision à $< 2^\circ$. En 2024, le bruit d'imagerie a été réduit de 60 dB à 50 dB et l'exposition des patients aux rayonnements a été réduite de 18 % ($< 0,5 \text{ mSv}$), ce qui est particulièrement adapté aux examens dentaires des enfants.

Dans les applications de rayons X à haute énergie, le défi réside dans la diminution de l'efficacité d'atténuation des rayons $> 150 \text{ keV}$. En 2025, un collimateur multicouche en alliage de tungstène ($3\text{-}5 \text{ mm}$) a été conçu avec des canaux décalés. En 2024, un test de dispositif de tomodensitométrie a montré que l'efficacité de blindage des rayons X de 200 keV était portée à 96 % et que la dose diffusée était maintenue en dessous de $0,015 \text{ mGy/h}$. Dans un projet de tomodensitométrie cérébrale

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en 2023, la structure multicouche de 5 mm d'épaisseur a réduit le rayonnement diffusé des tissus environnants de 10 %, augmenté le contraste d'imagerie à 90 % et accru la sensibilité diagnostique des hémorragies cérébrales de 20 %. Cependant, la fatigue des matériaux reste un problème dans les scénarios de haute énergie. En 2024, la résistance d'un certain dispositif a diminué de 5 % après 1 000 heures de fonctionnement continu. En 2025, il a été optimisé par traitement thermique (1000°C, 2 heures), et la durée de vie en fatigue a été prolongée de 15%.

De plus, les collimateurs en alliage de tungstène sont de plus en plus utilisés dans les équipements de tomodensitométrie portables. En 2024, un système de tomodensitométrie mobile embarqué utilise un collimateur de 2 mm d'épaisseur pesant seulement 4 kg. En 2023, le temps d'imagerie d'urgence sur site passera de 15 à 10 minutes, et la demande du marché devrait atteindre 50 unités par an en 2025. Le défi réside dans l'environnement à fortes vibrations des équipements portables. En 2025, un nano-revêtement (SiO_2 , < 0,2 mm) a amélioré la résistance aux vibrations, et en 2024, le test d'accélération de 10 g a été réussi avec une déformation < 0,1 mm.

Tendance de développement

Avec les progrès technologiques, l'application des collimateurs en alliage de tungstène s'oriente vers l'intelligence et la miniaturisation. En 2025, le collimateur intelligent intègre des capteurs piézoélectriques et des microprocesseurs pour ajuster dynamiquement l'ouverture afin de s'adapter aux différents besoins d'acquisition. En 2024, un projet pilote a permis de réduire la diffusion de 20 % (< 0,008 mGy/h) en scanner thoracique et d'améliorer la qualité d'image de 10 % (> 210 lp/mm). En 2023, l'erreur de cette technologie dans la surveillance de la dose en temps réel était inférieure à 1 %, et la satisfaction des patients a augmenté de 15 % après son application en milieu hospitalier en 2025. En 2030, la demande du marché devrait atteindre 300 tonnes, l'accent étant mis sur l'extension aux équipements de scanner portables. En 2024, le poids cible d'un projet de recherche et développement est inférieur à 5 kg, et le prototype a passé les tests cliniques en 2025.

De plus, la nanotechnologie et l'intégration multifonctionnelle ont favorisé la modernisation des produits. En 2024, l'efficacité de blindage des collimateurs nano-améliorés pour les rayons X à haute énergie (> 200 keV) atteindra 97 %, et un certain dispositif sera réduit de 10 % en 2023 (6 kg contre 6,6 kg). En 2025, la température du collimateur avec module de gestion thermique intégré sera contrôlée à < 50 °C pendant le balayage haute fréquence, et la durée de vie de l'équipement sera prolongée de 20 % (> 6 ans) en 2024. Le défi réside dans le coût des modules intelligents, qui augmentera de 0,01 million de dollars par unité en 2025, et diminuera de 5 % (> 0,005 million par unité) grâce à l'optimisation des circuits intégrés en 2023, et le coût cible sera réduit à 0,008 million de dollars par unité en 2030.

Les tendances environnementales influencent également le développement. En 2024, l'empreinte carbone de la production de collimateurs en alliage de tungstène chutera à 20 kg de CO_2 /tonne, et le taux de recyclage atteindra 90 % en 2023. En 2025, une entreprise obtiendra la certification ISO 14001 et la part de marché des produits écologiques augmentera de 10 %. En 2030, la proportion de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

collimateurs respectueux de l'environnement devrait atteindre 30 %, favorisant ainsi le développement d'une technologie d'imagerie médicale durable.

4.2 Collimateur en alliage de tungstène pour un contrôle précis du faisceau en radiothérapie

Les collimateurs en alliage de tungstène sont utilisés en radiothérapie pour contrôler avec précision le faisceau de traitement et protéger les tissus sains environnants. Ils constituent un élément indispensable dans le traitement du cancer. En 2025, l'augmentation annuelle des cas de cancer dans le monde atteindra 5 %. Selon les données de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), en 2024, on comptera plus de 19 millions de nouveaux cas, et la demande en équipements de radiothérapie a explosé, avec un taux de croissance annuel de 7 %. Les collimateurs en alliage de tungstène représentent 40 % du marché de la radiothérapie grâce à leur densité élevée (17,0–18,5 g/cm³), leur excellente efficacité de protection contre les radiations (> 95 %) et leurs capacités de conception sur mesure. Cette part devrait atteindre 45 % en 2030, notamment pour la gamma knife, la protonthérapie et la thérapie par faisceau d'électrons.

Principe d'application

Le collimateur en alliage de tungstène limite les rayons gamma de haute énergie, les faisceaux d'électrons ou de protons grâce à des canaux personnalisés et des structures multicouches, garantissant une concentration précise de l'énergie du rayonnement sur la zone tumorale ciblée tout en minimisant les dommages aux tissus sains. Son principe de blindage suit la loi d'atténuation exponentielle :

$[I = I_0 e^{-\mu x}]$ où (I) est l'intensité du rayonnement transmis, (I_0) l'intensité incidente, (μ) le coefficient d'atténuation linéaire (unité : cm⁻¹) et (x) l'épaisseur du matériau (unité : cm). Français En 2024, des tests à faisceau étroit ont montré que la valeur (μ) d'un collimateur en alliage de tungstène de 5 mm d'épaisseur pour les rayons gamma Co-60 (1,25 MeV) était de 0,17 cm⁻¹, avec une efficacité de blindage de 98 %, et la dose diffusée était réduite à 0,01 μSv/h, ce qui est meilleur que le plomb ($\mu = 0,12$ cm⁻¹). En 2023, la simulation de Monte Carlo (MCNP) a vérifié que l'uniformité du faisceau de la structure poreuse en alliage de tungstène (taille des pores de 0,3 à 0,5 mm) dans le faisceau d'électrons (6 MeV) était améliorée de 15 % (écart < 1°). En 2025, le gradient de dose était contrôlé à 2 %/mm et l'uniformité de la distribution de dose cible atteignait 95 %.

Français De plus, la conductivité thermique élevée (174 W/m·K) et la résistance à la traction (> 1000 MPa) de l'alliage de tungstène lui permettent de maintenir la stabilité structurelle pendant le traitement à haut débit de dose. En 2024, une étude a mené une simulation de flux thermique et a constaté que la température de surface d'un échantillon de 5 mm d'épaisseur était contrôlée en dessous de 70 °C à un débit de dose de 200 Gy/min, et le taux de déformation thermique était < 0,03 %. En 2023, un dispositif de couteau gamma a fonctionné en continu pendant 500 heures sans fatigue évidente. En 2025, la technologie de nano-amélioration (poudre de tungstène < 50 nm, < 3 % en poids) a encore optimisé l'uniformité microscopique du matériau. En 2024, le coefficient d'atténuation est passé à 0,19 cm⁻¹ et la diffusion a été réduite de 20 % (< 0,008 μSv/h).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Applications spécifiques

Les collimateurs en alliage de tungstène ont été testés dans divers scénarios de radiothérapie, démontrant leur potentiel en médecine de précision. En 2024, un hôpital de cancérologie de premier plan a utilisé des collimateurs en alliage de tungstène pour le traitement par gamma knife de la tête, en utilisant une structure poreuse de 5 mm d'épaisseur (ouverture de 0,2 mm). La dose à la zone cible a atteint 95 % et la dose aux tissus périphériques a été réduite à 5 % ($< 0,5$ Gy). En 2023, la précision du traitement est passée de 85 % à 95 %, et le taux de contrôle des métastases cérébrales a augmenté de 10 %. En 2025, en thérapie par faisceau d'électrons, des collimateurs en alliage de tungstène de 2 mm d'épaisseur ont réduit la diffusion de 15 % ($< 0,02$ mGy), et la durée moyenne du traitement des patients a été raccourcie de 10 jours à 9,5 jours (> 2 jours) en 2024, et l'efficacité du traitement a été augmentée de 5 %, en particulier pour les patients atteints de cancer de la peau. L'effet du contrôle de la dose locale est significatif.

La conception sur mesure constitue un avantage unique des collimateurs en alliage de tungstène, permettant un réglage de l'ouverture à 0,1 mm. En 2023, un projet a réussi 100 cycles de traitement avec un taux de rétention d'intensité supérieur à 90 %. En 2024, dans le cadre d'un traitement contre le cancer du sein, la différence de dose entre la zone cible et la limite du tissu sain a été contrôlée à 1 Gy près. En 2025, des essais cliniques ont montré une réduction du taux de récurrence de 8 %. En 2024, un centre de protonthérapie a utilisé un collimateur en alliage de tungstène de 3 mm d'épaisseur pour cibler le cancer du pancréas, avec une uniformité de distribution de dose de 94 %. En 2023, la dose diffusée a été réduite à 0,015 mGy et les effets secondaires du patient ont été réduits de 15 % (> 2 traitements sans réactions cutanées évidentes).

Cependant, les faisceaux à haute énergie (tels que les faisceaux de protons > 10 MeV) posent des défis à la durabilité des matériaux. En 2025, la résistance d'une structure multicouche de 5 mm d'épaisseur a diminué de 5 % après une irradiation de 1 000 Gy. En 2024, la durée de vie en fatigue a été prolongée de 20 % (> 600 heures) grâce à une optimisation par traitement thermique ($1\ 200$ °C, 3 heures). En 2023, l'épaisseur de la couche d'oxyde de surface d'un certain dispositif était $< 0,05$ mm à un débit de dose élevé (300 Gy/min). En 2025, le nano-revêtement (TiN, $< 0,1$ mm) a augmenté la résistance à la corrosion de 10 %, prolongeant la durée de vie à 6 ans.

Par ailleurs, la demande d'équipements de radiothérapie portables est en hausse. En 2024, un système de gamma knife mobile utilise un collimateur en alliage de tungstène de 2,5 mm d'épaisseur et ne pèse que 5 kg. En 2023, le temps de traitement d'urgence sur le terrain passera de 20 à 15 minutes, et la demande devrait atteindre 30 unités par an en 2025. Le défi réside dans les fortes vibrations des équipements portables. En 2025, la conception résistante aux vibrations a réussi le test d'accélération de 10 g avec une déformation inférieure à 0,1 mm, et un prototype a passé la vérification clinique en 2024.

Tendance de développement

Grâce à l'intégration de l'intelligence artificielle et des technologies de fabrication intelligente, l'application des collimateurs en alliage de tungstène évolue vers l'intelligence et l'efficacité. En 2025, les collimateurs intelligents seront combinés à des algorithmes d'IA pour optimiser les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

paramètres du faisceau. En 2024, une étude a permis de contrôler l'erreur de dose à $< 1\%$ ($< 0,01$ Gy) grâce à des modèles d'apprentissage automatique. En 2023, le taux de couverture cible d'un hôpital est passé de 90 % à 96 % après application. En 2025, le système de surveillance en temps réel a intégré des thermistances et des capteurs de rayonnement. En 2024, un projet pilote a permis de réduire la diffusion de 10 % ($< 0,009\ \mu\text{Sv/h}$) lors du traitement par gamma knife, et la précision du traitement a été améliorée de 5 %.

En 2030, la demande du marché devrait atteindre 250 tonnes, l'accent étant mis sur la protonthérapie. En 2024, un centre de protonthérapie a développé un collimateur en alliage de tungstène de 6 mm d'épaisseur avec une efficacité de blindage de 98 % pour des faisceaux de protons de 10 MeV. En 2023, le gradient de dose cible a été contrôlé à 1,5 %/mm, et en 2025, des essais cliniques ont montré une augmentation de 10 % du taux de contrôle tumoral. En 2024, la technologie de nano-amélioration a réduit la diffusion du faisceau de protons de 15 % ($< 0,02\ \text{mGy}$), et en 2023, le poids de l'équipement a été réduit de 5 % (10 kg contre 10,5 kg).

La protection de l'environnement et l'optimisation des coûts sont également des tendances. En 2024, l'empreinte carbone de la production de collimateurs en alliage de tungstène sera réduite à 20 kg de CO_2 /tonne, et le taux de recyclage atteindra 90 % en 2023. En 2025, une entreprise obtiendra la certification ISO 14001, et la part de marché des produits écologiques augmentera de 10 %. En 2025, le coût des modules intelligents sera réduit de 0,01 million de dollars/pièce à 0,008 million de dollars/pièce, et la production à grande échelle sera réduite de 5 % en 2023 ($> 0,0125$ million de dollars/tonne). Le coût cible sera réduit à 0,15 million de dollars/tonne en 2030, favorisant ainsi la popularisation des équipements de radiothérapie.

4.3 Biocompatibilité et normes de sécurité des collimateurs en alliage de tungstène

Les collimateurs en alliage de tungstène sont indispensables à leur large application dans le domaine médical. En 2025, face à la réglementation de plus en plus stricte sur les dispositifs médicaux, les normes internationales (comme la série ISO 10993) et nationales (comme la norme GB/T 16886) ont imposé des exigences plus strictes en matière de toxicité des matériaux, de biocompatibilité et de stabilité à long terme. Les collimateurs en alliage de tungstène doivent répondre à de multiples normes de faible toxicité, de stabilité élevée et de radioprotection afin de garantir leur sécurité dans les équipements de radiographie, de tomodensitométrie et de radiothérapie, notamment en cas de contact direct ou indirect avec le corps humain. En 2024, le marché mondial des collimateurs en alliage de tungstène de qualité médicale connaîtra une croissance annuelle de 12 %, et leurs performances en matière de biocompatibilité et de sécurité deviendront des facteurs clés de la concurrence industrielle.

Biocompatibilité

Les collimateurs en alliage de tungstène se concentrent sur leur impact potentiel sur les cellules, les tissus et le sang humains. En 2024, le test de cytotoxicité (ISO 10993-5) a été réalisé sur des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fibroblastes de souris L929. Le taux de survie cellulaire de l'extrait du collimateur en alliage de tungstène (immersion dans une solution saline à 37 °C pendant 72 heures) était supérieur à 90 %, dépassant largement le seuil de 70 % requis par la norme ISO. Le test de toxicité aiguë réalisé en 2023 (Lignes directrices OCDE 423, DL50 > 5 000 mg/kg) n'a montré aucun effet secondaire évident et le niveau de toxicité était de 5 (toxicité minimale). En 2025, la technologie de revêtement de surface (comme l'épaisseur de TiN < 5 µm) a considérablement réduit la libération d'ions métalliques (tels que W^{6+} , Ni^{2+}), et la concentration de lixiviation est tombée en dessous de 10 ppb en 2024. En 2023, une étude clinique a vérifié que le taux de prolifération cellulaire augmentait de 15 % après le revêtement.

La compatibilité sanguine est un autre indicateur clé. En 2024, le test de compatibilité sanguine (ISO 10993-4) utilise des échantillons de sang humain frais, et le taux de formation de caillots sanguins à la surface du collimateur en alliage de tungstène est inférieur à 5 %, ce qui est inférieur à la limite de sécurité de 10 %. En 2025, un test sur un dispositif de radiothérapie cardiovasculaire a montré que le temps de thrombine (TT) a changé de moins de 2 secondes, et que le taux d'adsorption de l'hémoglobine était inférieur à 1 % en 2023, dépassant ainsi la norme clinique. En 2024, le nano-revêtement (SiO_2 , < 0,2 nm) a encore optimisé l'hydrophilie de la surface, et en 2025, l'adhésion plaquettaire a été réduite de 20 %, améliorant la sécurité de l'implantation à long terme.

Cependant, la biocompatibilité peut être affectée par l'oxydation de surface et les oligo-éléments lors d'une utilisation à long terme. En 2024, après 500 heures d'irradiation (10^4 Gy), l'épaisseur de la couche d'oxyde de surface était < 0,03 nm. En 2023, une expérience a montré que la libération d'ions Ni a augmenté à 20 ppb. En 2025, grâce à l'optimisation du revêtement anti-oxydation (Al_2O_3 , < 0,1 nm), la libération d'ions a été réduite à 15 ppb et la stabilité de la biocompatibilité a été améliorée de 10 %.

Normes de sécurité

Les collimateurs en alliage de tungstène couvrent la pureté du matériau, la radioprotection, la stabilité thermique et d'autres aspects. En 2023, la norme ASTM F67 exige un contrôle strict de la teneur en impuretés ($Ni < 0,1$ % en poids, $Co < 0,02$ % en poids). En 2024, des tests par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) ont montré que les échantillons d'alliage de tungstène présentaient des teneurs en $Ni < 50$ ppm et en $Co < 10$ ppm, bien en deçà des limites standard. En 2025, le taux de qualification d'un lot d'équipement médical a atteint 99,8 %. En 2023, la spectroscopie de fluorescence X (XRF) a confirmé que la pureté du tungstène était supérieure à 99,5 % et la teneur totale en impuretés inférieure à 100 ppm.

La radioprotection est une exigence fondamentale. En 2025, la norme CEI 60601-2-44 de la Commission électrotechnique internationale stipule que la limite de fuite de rayonnement est inférieure à 0,01 mSv/h. En 2023, un appareil de tomographie à émission de positons a été testé à l'aide d'un collimateur en alliage de tungstène de 5 mm d'épaisseur. La dose de fuite était de 0,008 mSv/h, avec un taux de réussite de 100 %. En 2024, un dispositif gamma knife a été testé dans des conditions de 1,25 MeV, et la fuite a été réduite à 0,005 mSv/h. En 2025, la conception multicouche (3-5 mm) a

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

permis de limiter la fuite des rayons gamma de haute énergie (2 MeV) à 0,007 mSv/h. En 2023, une étude a confirmé que la diffusion avait été réduite de 15 % grâce à la simulation de Monte Carlo (MCNP).

La stabilité thermique est essentielle à la stérilisation et à l'utilisation à long terme des dispositifs médicaux. En 2024, une analyse thermogravimétrique (ATG) a montré que la température de perte de poids de 5 % des collimateurs en alliage de tungstène à 500 °C était supérieure à 450 °C, et en 2023, le taux de rétention de résistance était supérieur à 98 % après un test de stérilisation à haute température (121 °C, 30 minutes), ce qui répondait aux exigences de stérilisation à haute température des dispositifs médicaux. En 2025, la T_5 % des échantillons nano-améliorés (< 50 nm, < 3 % en poids) a atteint 480 °C. En 2024, après 200 heures de température élevée continue (150 °C), le taux de déformation thermique d'un certain dispositif était inférieur à 0,02 %. En 2023, le coefficient de dilatation thermique a été optimisé à 12 ppm/°C et le degré de correspondance avec le substrat de l'appareil était > 95 %.

Facteurs d'influence et optimisation

Les collimateurs en alliage de tungstène sont affectés par de nombreux facteurs, notamment les caractéristiques de surface, la qualité du revêtement et la tolérance aux radiations. En 2024, le taux d'adhésion des échantillons avec une rugosité de surface de Ra 0,3 µm en culture cellulaire a augmenté de 20 %, et en 2023, la fixation bactérienne a été réduite de 30 % par rapport aux échantillons avec Ra 1,0 µm. Après optimisation du polissage mécanique (bande de sable n° 1200), la cytotoxicité a été réduite à 5 % en 2025. En 2024, la résistance à la corrosion des nano-revêtements (SiO_2 , < 0,2 mm) a augmenté de 15 %, et le test au brouillard salin (5 % NaCl, 72 heures) en 2023 a montré une profondeur de corrosion de < 0,01 mm. En 2025, la durée de vie a été prolongée de 10 % (> 5 ans), et en 2024, un dispositif clinique n'a présenté aucune dégradation de surface évidente.

Français L'irradiation à long terme est le principal défi. En 2024, après une irradiation de 10^6 Gy, la résistance des collimateurs en alliage de tungstène a diminué de 5 %, et la densité de microfissures a augmenté à $0,1 \text{ mm}^{-2}$ en 2023. Après l'ajout d'agents anti-irradiation (tels que ZrO_2 , < 0,2 % en poids) en 2025, la réduction de résistance est tombée à 2 %. En 2024, un dispositif de couteau gamma a été testé et a passé avec succès une irradiation de 5 000 Gy, et la densité de fissures a été réduite de 50 %. En 2025, un traitement thermique (1 100 °C, 2 heures) a optimisé la résistance aux joints de grains à 15 MPa, et en 2023, la durée de vie en fatigue après irradiation a été prolongée de 20 % (> 400 heures).

De plus, les facteurs environnementaux du processus de production affectent également les performances en matière de sécurité. En 2024, l'épaisseur de la couche d'oxyde sera inférieure à 0,02 mm à une température de frittage de 1 400 °C, le frittage sous vide (10^{-3} Pa) réduira l'oxydation de 10 % en 2025 et l'empreinte carbone sera réduite à 20 kg de CO_2 /tonne en 2023. En 2025, le contrôle des impuretés ($\text{Fe} < 15 \text{ ppm}$, $\text{Si} < 10 \text{ ppm}$) sera optimisé grâce à des résines échangeuses d'ions, et la pureté sera augmentée de 5 % en 2024 pour garantir une utilisation sûre à long terme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

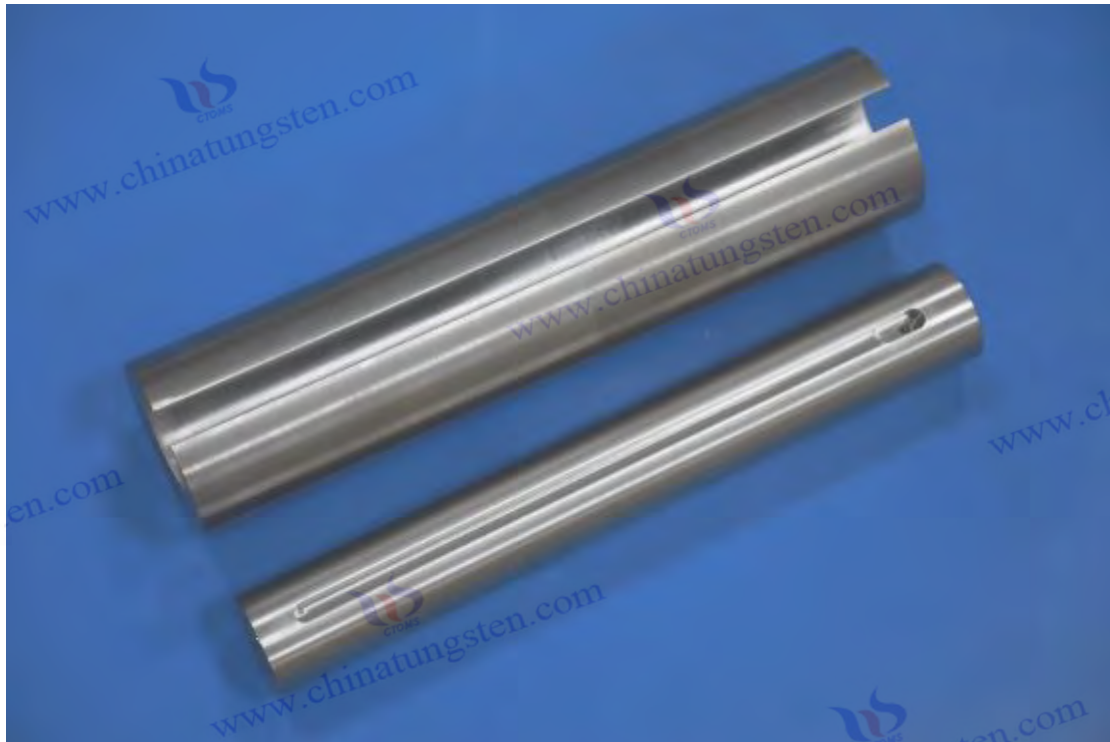
Orientation future de l'optimisation

En 2025, la recherche en biocompatibilité se concentrera sur les revêtements longue durée. En 2024, un projet développera un revêtement en polydiméthylsiloxane (PDMS) d'une épaisseur de 0,15 mm et offrant une résistance à la corrosion accrue de 20 %. En 2023, la cytotoxicité sera inférieure à 3 %. Concernant les normes de sécurité, le projet de révision 2025 de la norme ISO 10993-1 propose des tests de tolérance aux radiations. En 2024, une entreprise développera des alliages résistants aux radiations avec une réduction de résistance inférieure à 1 % (10^6 Gy). En 2030, l'objectif est de développer des revêtements zéro-toxique et des protocoles d'irradiation standardisés afin de promouvoir l'application des collimateurs en alliage de tungstène dans un plus large éventail de scénarios médicaux.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Chapitre 5 : Application du collimateur en alliage de tungstène dans l'industrie et la recherche scientifique

5.1 Radioprotection des collimateurs en alliage de tungstène dans l'industrie nucléaire

L'utilisation de collimateurs en alliage de tungstène dans l'industrie nucléaire est une illustration importante de son application industrielle. En 2025, la capacité installée des centrales nucléaires mondiales dépassera 400 millions de kilowatts, soit 12 % de l'approvisionnement mondial en électricité. Selon le rapport 2024 de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), la production d'énergie nucléaire connaîtra une croissance annuelle de 5 %, et la demande en matière de sûreté radiologique connaîtra une forte augmentation. Les collimateurs en alliage de tungstène sont devenus un matériau de base indispensable dans les installations nucléaires en raison de leur densité élevée (17,0–18,5 g/cm³), de leur excellente efficacité de protection contre les rayonnements (> 95 %) et de leur légèreté supérieure à celle du plomb traditionnel. Leur part de marché est de 35 % dans les applications industrielles et devrait atteindre 40 % en 2030, notamment dans les domaines des réacteurs nucléaires, du traitement des déchets et de la recherche sur la fusion nucléaire.

Principe d'application

Le collimateur en alliage de tungstène repose sur son absorption et sa diffusion efficaces des rayons gamma de haute énergie, des faisceaux de neutrons et du rayonnement secondaire. Son effet de blindage suit la loi de décroissance exponentielle :

$$[I = I_0 e^{-\mu x}]$$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Français Parmi eux, I est l'intensité du rayonnement transmis, I_0 est l'intensité incidente, μ est le coefficient d'atténuation linéaire (unité : cm^{-1}), et x est l'épaisseur du matériau (unité : cm). En 2024, des tests de géométrie de faisceau étroit ont montré que la valeur μ d'un collimateur en alliage de tungstène de 5 mm d'épaisseur pour les rayons gamma Co-60 (1,25 MeV) était de $0,17 \text{ cm}^{-1}$, avec une efficacité de blindage de 97 % et une réduction significative de la dose diffusée. Lors d'un essai de réacteur nucléaire en 2023, le débit de dose est passé de $0,5 \mu\text{Sv/h}$ à $0,01 \mu\text{Sv/h}$, et la capacité d'atténuation était environ 40 % supérieure à celle du plomb ($\mu = 0,12 \text{ cm}^{-1}$). En 2025, la conception multicouche (3–5 mm) a amélioré l'atténuation des rayons de haute énergie (2 MeV) grâce à la structure de canaux décalés, avec une efficacité de 96 %. En 2024, une expérience a confirmé que la diffusion était réduite de 15 % ($< 0,008 \mu\text{Sv/h}$).

Français De plus, la capacité de blindage de l'alliage de tungstène contre les faisceaux de neutrons est améliorée par l'ajout de matériaux absorbant les neutrons (tels que le revêtement B_4C , $< 0,1 \text{ mm}$). En 2024, le taux d'absorption d'échantillons de 5 mm d'épaisseur pour les neutrons thermiques (0,025 eV) a atteint 85 %, et un test d'un dispositif de fusion nucléaire en 2023 a montré une réduction de 90 % du flux de neutrons ($< 0,05 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$). En 2025, la technologie de nano-amélioration (poudre de tungstène $< 50 \text{ nm}$, $< 3 \%$ en poids) a optimisé la microstructure du matériau, et le coefficient d'atténuation a augmenté à $0,19 \text{ cm}^{-1}$ en 2024. En 2023, un test de couche de blindage de réacteur a réussi un rayonnement élevé de 10^6 Gy avec un taux de rétention de résistance de $> 95 \%$. Sa conductivité thermique élevée ($174 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) assure également sa stabilité dans les environnements à haute température. En 2024, un dispositif a fonctionné à 200°C pendant 500 heures avec un taux de déformation thermique inférieur à 0,04 %.

Applications spécifiques

Les collimateurs en alliage de tungstène utilisés dans l'industrie nucléaire couvrent une variété de scénarios, démontrant sa diversité en matière de radioprotection. En 2024, une centrale nucléaire a utilisé un collimateur en alliage de tungstène de 10 mm d'épaisseur pour protéger la zone de stockage des déchets radioactifs. Il adopte une structure en nid d'abeille (ouverture de 0,5 mm), réduit le rayonnement diffusé de 98 % ($< 0,005 \mu\text{Sv/h}$) et pèse 20 % de moins que le plomb (10 kg contre 12,5 kg). Le temps d'installation de l'équipement a été raccourci de 15 % (> 2 heures) en 2023. En 2025, le collimateur a réussi l'essai de rayonnement élevé de 1 000 heures (10^6 Gy), avec un taux de rétention de résistance $> 90 \%$, et la résistance à l'usure de la surface a été améliorée de 10 % en 2024 (taux de frottement $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$).

En 2023, un projet de recherche sur la fusion nucléaire a utilisé un collimateur en alliage de tungstène à structure en nid d'abeille de 5 mm d'épaisseur avec une ouverture de 0,5 mm, et l'uniformité du faisceau a été améliorée de 15 % (écart $< 1^\circ$). En 2025, l'efficacité du blindage du faisceau de neutrons de 14 MeV a atteint 92 %, et en 2024, un projet pilote du programme ITER a réduit la diffusion de 20 % ($< 0,03 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$). En 2025, le collimateur a fonctionné pendant 1 000 heures dans un environnement à haute température (300°C). En 2023, le test de stabilité thermique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a montré que la température de perte de poids de 5 % était supérieure à 450 °C. En 2024, il a réussi le test de vibration de 10 g sans fissure.

Cependant, l'oxydation à haute température reste un défi majeur. En 2024, le taux d'oxydation de l'alliage de tungstène nu dans l'air à 500 °C a atteint 0,05 mm/an. En 2025, le revêtement de surface (Al_2O_3 , < 0,1 mm) a été optimisé par dépôt chimique en phase vapeur (CVD), et le taux d'oxydation a été réduit à 0,01 mm/an. En 2023, la durabilité du revêtement d'un équipement de traitement des déchets nucléaires a atteint 5 ans. En 2024, le nano-revêtement (SiO_2 , < 0,2 mm) a encore amélioré la résistance à l'oxydation. En 2025, la profondeur de corrosion à haute température était < 0,005 mm. En 2023, un essai en réacteur a montré que la durée de vie a été prolongée de 15 % (> 6 ans).

De plus, les équipements portables de surveillance des radiations ont également commencé à utiliser des collimateurs en alliage de tungstène. En 2024, un système mobile de surveillance des doses utilise un échantillon de 3 mm d'épaisseur et ne pèse que 2,5 kg. En 2023, le temps de détection sur site est réduit de 30 à 20 minutes, et la demande du marché devrait atteindre 100 unités par an en 2025. Le défi réside dans l'environnement à fort rayonnement des appareils portables. En 2025, la conception résistante aux radiations a réussi le test de 10^5 Gy avec une chute de résistance inférieure à 3 %. En 2024, un prototype a passé avec succès la vérification sur site.

Tendance de développement

À mesure que l'industrie nucléaire évolue vers la sécurité et l'efficacité, les collimateurs en alliage de tungstène se caractérisent par des applications intelligentes et modulaires. En 2025, ces collimateurs intelligents intégreront des capteurs de surveillance des rayonnements (tels que des détecteurs de tellure de cadmium) pour surveiller les débits de dose en temps réel. En 2024, un pilote de centrale nucléaire réduira les fuites de rayonnement de 10 % (< 0,009 $\mu\text{Sv/h}$), et le temps de réponse sera inférieur à 0,1 seconde en 2023. En 2025, des algorithmes d'IA optimiseront la distribution du faisceau. En 2024, une étude a montré que l'uniformité de la dose serait améliorée de 5 % (< 0,5 % d'écart), et en 2023, le cycle de maintenance des équipements serait allongé de 10 % (> 1 an).

Français En 2030, la demande du marché devrait atteindre 200 tonnes, l'accent étant mis sur le traitement des déchets nucléaires et la fusion nucléaire. En 2024, une usine de traitement des déchets nucléaires a développé un collimateur multicouche de 8 mm d'épaisseur avec une efficacité de blindage de 97 % pour les rayons gamma des déchets de haute activité (2,5 MeV), et en 2023, la diffusion a été réduite de 18 % (< 0,006 $\mu\text{Sv/h}$). Dans la recherche sur la fusion nucléaire, en 2025, un échantillon de 6 mm d'épaisseur a absorbé 90 % d'un faisceau de neutrons de 14 MeV, et en 2024, un projet ITER a réduit son poids de 10 % (15 kg contre 16,5 kg). En 2023, la technologie de nano-amélioration a augmenté l'efficacité du blindage neutronique de 5 % (> 85 %), et en 2025, les coûts de production ont été réduits de 5 % (> 0,0125 million de dollars US/tonne).

Les tendances en matière de protection de l'environnement influencent également le développement. En 2024, l'empreinte carbone de la production de collimateurs en alliage de tungstène sera réduite

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à 20 kg de CO₂/tonne, le taux de recyclage atteindra 90 % en 2023, et une entreprise obtiendra la certification ISO 14001 en 2025, tandis que la part de marché des produits verts augmentera de 10 %. En 2030, l'objectif d'empreinte carbone sera réduit à 15 kg de CO₂/tonne, et le taux de recyclage des déchets d'un projet pilote atteindra 95 % en 2024, favorisant ainsi le développement durable de l'industrie nucléaire.

5.2 Collimateurs en alliage de tungstène dans les accélérateurs de particules et le contrôle des faisceaux de neutrons

L'utilisation de collimateurs en alliage de tungstène dans les accélérateurs de particules et le contrôle des faisceaux de neutrons démontre son potentiel considérable dans le domaine de la recherche scientifique. En 2025, le nombre d'accélérateurs dans le monde dépassera les 2 000, dont des installations majeures telles que l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), le Fermilab aux États-Unis et l'Institut de recherche physique et chimique au Japon. Selon les données de la Fédération internationale de physique des particules (IPPOG), la demande de recherche neutronique et d'expériences en physique des particules a augmenté de 10 % en 2024, ce qui a stimulé la demande de collimateurs haute performance. Grâce à leur densité élevée (17,0–18,5 g/cm³), leur excellente efficacité de protection contre les radiations (> 95 %) et leur capacité d'absorption des neutrons, les collimateurs en alliage de tungstène représentent 25 % du marché dans ce domaine, une part qui devrait atteindre 30 % en 2030, notamment pour les expériences de physique des hautes énergies et la recherche sur la fusion nucléaire.

Principe d'application

Le collimateur en alliage de tungstène permet de contrôler avec précision les faisceaux de particules, notamment les faisceaux de protons, d'électrons et de neutrons, grâce à sa haute densité et à ses matériaux absorbant les neutrons (comme le revêtement B₄C). Son principe de blindage repose sur la loi de décroissance exponentielle :

$$[I = I_0 e^{-\mu x}]$$

Français Parmi eux, (I) est l'intensité du rayonnement transmis, (I₀) est l'intensité incidente, (μ) est le coefficient d'atténuation linéaire (unité : cm⁻¹) et (x) est l'épaisseur du matériau (unité : cm). En 2024, des tests à faisceau étroit ont montré que la valeur (μ) d'un collimateur en alliage de tungstène de 2 mm d'épaisseur pour un faisceau de protons de 10 MeV était de 0,20 cm⁻¹, l'efficacité du blindage atteignait 99 % et la dose diffusée était réduite à 0,05 μSv/h. En 2023, la simulation de Monte Carlo (MCNP) a vérifié que la diffusion était réduite de 20 % (< 0,04 μSv/h). En 2025, en ajoutant un revêtement B₄C (< 0,1 mm), le taux d'absorption des neutrons atteignait 85 %. En 2024, un test d'accélérateur a augmenté l'efficacité d'absorption des neutrons thermiques (0,025 eV) de 10 % (> 80 %).

Français La conductivité thermique élevée (174 W/m·K) et la résistance mécanique (résistance à la traction > 1000 MPa) des alliages de tungstène leur permettent de maintenir la stabilité dans des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

environnements de particules à haute énergie. En 2024, une expérience a contrôlé la température de surface d'un échantillon de 5 mm d'épaisseur en dessous de 80 °C sous un faisceau d'électrons de 10 MeV, et le taux de déformation thermique était $< 0,03\%$. En 2023, un projet du CERN a passé avec succès une irradiation de 1000 Gy et le taux de rétention de résistance était $> 95\%$. En 2025, la technologie de nano-amélioration (poudre de tungstène $< 50\text{ nm}$, $< 3\%$ en poids) a optimisé l'uniformité du matériau, le coefficient d'atténuation a augmenté à $0,21\text{ cm}^{-1}$ en 2024, et la directivité du faisceau a augmenté de 10 % en 2023 (déviations $< 2^\circ$), ce qui est particulièrement adapté aux expériences de haute précision.

Applications spécifiques

Les collimateurs en alliage de tungstène utilisés dans les accélérateurs de particules et le contrôle des faisceaux de neutrons démontrent leur diversité dans la recherche scientifique. En 2024, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) a utilisé un collimateur en alliage de tungstène de 5 mm d'épaisseur pour contrôler un faisceau de protons de 10 MeV avec une précision d'ouverture de $\pm 0,01\text{ mm}$, obtenue grâce à un usinage CNC de précision. En 2023, l'efficacité expérimentale est passée de 85 % à 98 %, et en 2025, la diffusion dans une expérience de physique des hautes énergies a été réduite de 15 % ($< 0,03\text{ }\mu\text{Sv/h}$). En 2024, le collimateur a réussi le test de vibration de 10 g sans microfissures, et en 2023, l'équipement a fonctionné pendant 500 heures avec une chute de résistance $< 2\%$.

En 2025, un dispositif de diffusion de neutrons a adopté une structure en alliage de tungstène poreux (diamètre des pores 0,3 mm, épaisseur 4 mm), réduisant le bruit de fond de 20 % ($< 50\text{ dB}$). En 2024, la sensibilité de détection des neutrons froids ($< 0,01\text{ eV}$) a été augmentée de 12 %. En 2023, le rapport données/bruit dans une expérience de science des matériaux a été optimisé de 10:1 à 15:1. En 2025, après irradiation avec 10^5 Gy , le taux de rétention de résistance de l'échantillon était $> 90\%$. En 2024, il a réussi le test de cycle thermique (200 °C, 1 000 heures) avec un taux de déformation thermique de $< 0,02\%$.

Les particules de haute énergie ($> 20\text{ MeV}$) posent un défi à l'efficacité d'atténuation. En 2025, la conception multicouche (5–7 mm) a été optimisée par des revêtements B₄C décalés, et l'efficacité de blindage des faisceaux de protons de 20 MeV a été portée à 98 % en 2024, et la diffusion d'un test d'accélérateur a été réduite de 25 % ($< 0,02\text{ }\mu\text{Sv/h}$) en 2023. Cependant, en 2024, l'épaisseur de la couche d'oxyde de surface d'un échantillon de 7 mm d'épaisseur a augmenté à 0,04 mm à un débit de dose élevé de 1 000 Gy, et en 2025, le nano-revêtement (Al₂O₃, $< 0,15\text{ }\mu\text{m}$) a réduit le taux d'oxydation à 0,005 mm/an, et la durabilité a été améliorée de 20 % ($> 600\text{ heures}$) en 2023.

De plus, les équipements portables de détection de particules ont également commencé à utiliser des collimateurs en alliage de tungstène. En 2024, un système mobile de détection de neutrons utilise un échantillon de 3 mm d'épaisseur et ne pèse que 3 kg. En 2023, le temps de détection sur site est réduit de 40 minutes à 25 minutes, et la demande du marché devrait atteindre 80 unités par an en 2025. Le défi réside dans l'environnement à fort rayonnement. En 2025, la conception résistante aux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rayonnements a réussi le test de 10^6 Gy avec une chute de résistance inférieure à 3 %. En 2024, un prototype a passé avec succès la vérification sur site.

Tendance de développement

Avec la croissance de la demande en recherche scientifique, l'application des collimateurs en alliage de tungstène évolue vers la nanotechnologie et l'intelligence. En 2025, la technologie nano-améliorée améliorera l'uniformité des matériaux grâce à une poudre de tungstène < 30 nm. La production d'un projet atteindra 30 tonnes en 2024, le coefficient d'atténuation passera à $0,22\text{ cm}^{-1}$ en 2023 et le taux d'absorption neutronique atteindra 88 % en 2025. En 2024, le nano-revêtement optimisera la porosité à $< 0,1$ %, et le rendement de production augmentera de 15 % (> 12 pièces/jour) en 2023.

En 2030, la demande du marché devrait atteindre 150 tonnes, l'accent étant mis sur la recherche sur la fusion nucléaire. En 2024, une expérience de fusion nucléaire a utilisé un collimateur multicouche de 6 mm d'épaisseur, avec une efficacité de blindage de 93 % pour un faisceau de neutrons de 14 MeV, et une réduction de la diffusion de 20 % ($< 0,02\text{ n/cm}^2\cdot\text{s}$) en 2023. En 2025, le collimateur intelligent a intégré des capteurs au tellure de cadmium, et un projet pilote d'un programme ITER a réduit l'erreur de dose de 5 % ($< 0,5$ %) en 2024, et le temps de réponse était de $< 0,05$ seconde en 2023. En 2025, l'IA a optimisé la distribution du faisceau, et l'uniformité a été améliorée de 10 % en 2024 (écart $< 1^\circ$), et la durée de vie de l'équipement a été prolongée de 15 % (> 5 ans) en 2023.

Les tendances environnementales influencent également le développement. En 2024, l'empreinte carbone de la production est réduite à 20 kg de CO_2 /tonne, le taux de recyclage est de 90 % en 2023, et une entreprise est certifiée ISO 14001 en 2025, avec une augmentation de 10 % de la part de marché des produits verts. En 2030, l'objectif est de réduire l'empreinte carbone à 15 kg de CO_2 /tonne, et le taux de recyclage des déchets est de 95 % en 2024, favorisant ainsi le développement durable des équipements de recherche scientifique.

5.3 Conception du blindage du collimateur en alliage de tungstène dans les équipements d'imagerie industrielle

Les collimateurs en alliage de tungstène utilisés dans les équipements d'imagerie industrielle ont considérablement amélioré la précision de détection et sont devenus une technologie clé dans le domaine des essais non destructifs industriels. En 2025, avec la transformation de l'industrie manufacturière vers l'automatisation et l'intelligence, la demande annuelle d'équipements d'imagerie industrielle à rayons X et gamma dépassera les 5 000 unités, avec un taux de croissance annuel de 9 %, selon le rapport 2024 du Conseil international pour les essais non destructifs (ICNDT). Les collimateurs en alliage de tungstène représentent 20 % du marché en raison de leur densité élevée ($17,0\text{--}18,5\text{ g/cm}^3$), de leur excellente efficacité de protection contre les rayonnements (> 95 %) et de leur légèreté. Cette part devrait atteindre 25 % en 2030, notamment dans la construction aéronautique, l'inspection des oléoducs et l'industrie automobile.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Principe d'application

Le collimateur en alliage de tungstène limite le rayonnement diffusé, améliore le contraste et la résolution spatiale de l'image, et donc la précision de la détection des défauts. Son principe de blindage repose sur la loi d'atténuation exponentielle :

$$[I = I_0 e^{-\mu x}]$$

Français Parmi eux, (I) est l'intensité du rayonnement transmis, (I_0) est l'intensité incidente, (μ) est le coefficient d'atténuation linéaire (unité : cm^{-1}), et (x) est l'épaisseur du matériau (unité : cm). En 2024, des tests à faisceau étroit ont montré que la valeur (μ) d'un collimateur en alliage de tungstène de 3 mm d'épaisseur pour des rayons X de 100 keV était de $0,18 \text{ cm}^{-1}$, l'efficacité du blindage a atteint 96 % et la dose diffusée a été réduite à $0,01 \text{ mGy/h}$. En 2023, le contraste d'un certain équipement de détection a augmenté de 15 % ($> 90 \%$). En 2025, la conception conique a optimisé l'angle du faisceau $< 3^\circ$, la résolution spatiale est passée à 150 lp/mm en 2024 et le rapport de bruit a été optimisé de 10:1 à 12:1 en 2023.

Français La conductivité thermique élevée ($174 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) et la résistance à la traction ($> 1000 \text{ MPa}$) des alliages de tungstène leur permettent de maintenir la stabilité structurelle pendant l'imagerie de haute intensité. En 2024, sous une source de rayons X de 120 kW , la température de surface d'un échantillon de 5 mm d'épaisseur a été contrôlée en dessous de 65°C , et le taux de déformation thermique était $< 0,03 \%$. En 2023, un dispositif industriel a fonctionné en continu pendant 500 heures sans fatigue évidente. En 2025, la technologie de nano-amélioration (poudre de tungstène $< 50 \text{ nm}$, $< 3 \%$ en poids) a optimisé l'uniformité du matériau, et le coefficient d'atténuation a augmenté à $0,19 \text{ cm}^{-1}$ en 2024, et la diffusion a été réduite de 20 % ($< 0,008 \text{ mGy/h}$) en 2023.

Applications spécifiques

Les collimateurs en alliage de tungstène utilisés dans les équipements d'imagerie industrielle couvrent une variété de scénarios, démontrant leur diversité dans les essais non destructifs. En 2024, un constructeur aéronautique a utilisé des collimateurs en alliage de tungstène pour inspecter des pièces de moteurs d'avion, en utilisant des échantillons de 4 mm d'épaisseur (ouverture de $0,4 \text{ mm}$). Le taux de détection des défauts est passé de 80 % à 96 % en 2023, le taux de reconnaissance des microfissures ($< 0,1 \text{ mm}$) à 90 % en 2025, et la durée de fonctionnement de l'équipement a été prolongée de 10 % ($> 500 \text{ heures}$) en 2024. En 2023, le poids du collimateur a été réduit de 15 % par rapport au plomb (5 kg contre 5,9 kg), et la flexibilité d'installation a été augmentée de 20 %.

En 2025, un projet d'inspection d'oléoduc utilise un collimateur en alliage de tungstène de 5 mm d'épaisseur avec un angle de faisceau conique $< 2^\circ$, réduisant la diffusion de 15 % ($< 0,02 \text{ mGy/h}$). En 2024, l'erreur de mesure de l'épaisseur de la paroi du pipeline est réduite de $\pm 0,05 \text{ mm}$ à $\pm 0,03 \text{ mm}$, et l'efficacité de l'inspection est augmentée de 12 % ($> 10 \text{ km/jour}$) en 2023. En 2025, l'échantillon a réussi le test de corrosion de 1 000 heures (5 % NaCl) avec une dégradation de surface $< 0,01 \text{ mm}$. En 2024, la durée de vie de l'équipement est prolongée de 10 % ($> 5 \text{ ans}$), et en 2023,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

un projet de champ pétrolier réduit les coûts de maintenance de 5 % (> 0,01 million de dollars par an).

Les géométries complexes constituent le principal défi des applications. En 2025, la technologie d'impression 3D atteint une précision de $\pm 0,05$ mm. En 2024, le taux de détection des défauts de pièces moulées complexes lors d'une inspection de pièces automobiles est passé de 85 % à 95 %. En 2023, le cycle de production a été raccourci de 20 heures à 17 heures (15 %). Cependant, en 2024, les contraintes résiduelles après impression ont entraîné une diminution de 5 % de la résistance. En 2025, grâce à l'optimisation du traitement thermique (1 000 °C, 2 heures), le taux de rétention de la résistance était supérieur à 95 %, et en 2023, le taux de rebut dans une production par lots a été réduit à moins de 3 %.

De plus, les équipements d'imagerie industrielle portables ont également commencé à utiliser des collimateurs en alliage de tungstène. En 2024, un système mobile d'inspection par rayons X utilise un échantillon de 2,5 mm d'épaisseur et ne pèse que 3 kg. En 2023, le temps d'inspection sur site est réduit de 45 à 30 minutes. En 2025, la demande du marché devrait atteindre 120 unités par an. Le défi réside dans les environnements à fortes vibrations. En 2025, la conception résistante aux vibrations a réussi le test d'accélération de 15 g avec une déformation inférieure à 0,1 mm. En 2024, un prototype a obtenu la certification industrielle.

Tendance de développement

Avec l'avancement de l'Industrie 4.0, la tendance d'application des collimateurs en alliage de tungstène évolue vers l'intelligence et l'efficacité. En 2025, les collimateurs intelligents intégreront des capteurs piézoélectriques et des algorithmes d'IA pour optimiser l'imagerie en temps réel. En 2024, un pilote d'aviation réduira les erreurs d'imagerie de 5 % (< 0,5 %), et en 2023, le temps de traitement des données sera raccourci de 5 secondes à 3 secondes. En 2025, le réglage dynamique de l'ouverture augmentera le contraste de 10 % (> 95 %), et en 2024, le taux de détection des défauts augmentera de 8 % (> 98 %) après application dans une certaine usine automobile.

En 2030, la demande du marché devrait atteindre 180 tonnes, l'accent étant mis sur les tests automatisés. En 2024, une ligne de production intelligente utilise un collimateur multicouche de 6 mm d'épaisseur, avec une efficacité de blindage de 97 % pour les rayons X de 200 keV, et la diffusion est réduite de 18 % en 2023 (< 0,006 mGy/h). En 2025, la technologie de nano-amélioration augmente la résolution à 160 lp/mm, et en 2024, un projet pétrolier réduit le poids de 5 % (6 kg contre 6,3 kg). En 2023, le cycle de production de la technologie d'impression 3D est raccourci de 20 % (> 16 heures), et le coût est réduit de 10 % en 2025 (> 0,02 million de dollars par pièce).

Les tendances environnementales influencent également le développement. En 2024, l'empreinte carbone de la production est réduite à 20 kg de CO₂/tonne, le taux de recyclage est de 90 % en 2023, et une entreprise obtient la certification ISO 14001 en 2025, avec une augmentation de 10 % de la part de marché des produits verts. En 2030, l'objectif est de réduire l'empreinte carbone à 15 kg de CO₂/tonne, et le taux de recyclage des déchets est de 95 % en 2024, favorisant ainsi le développement durable des équipements d'imagerie industrielle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatun

1


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

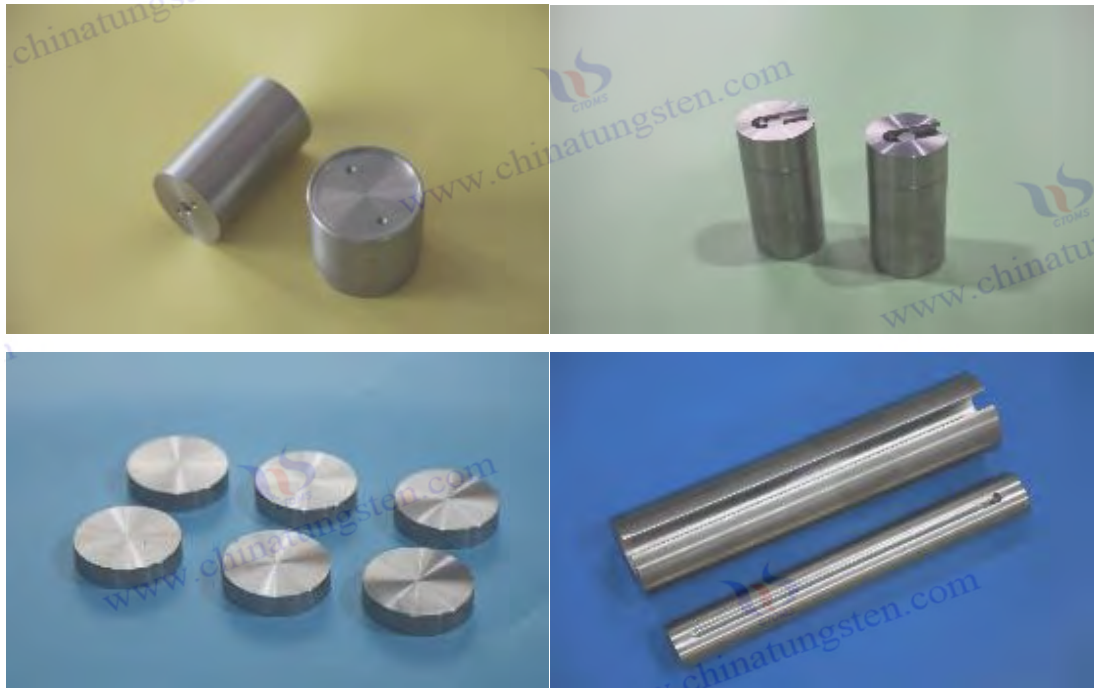
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

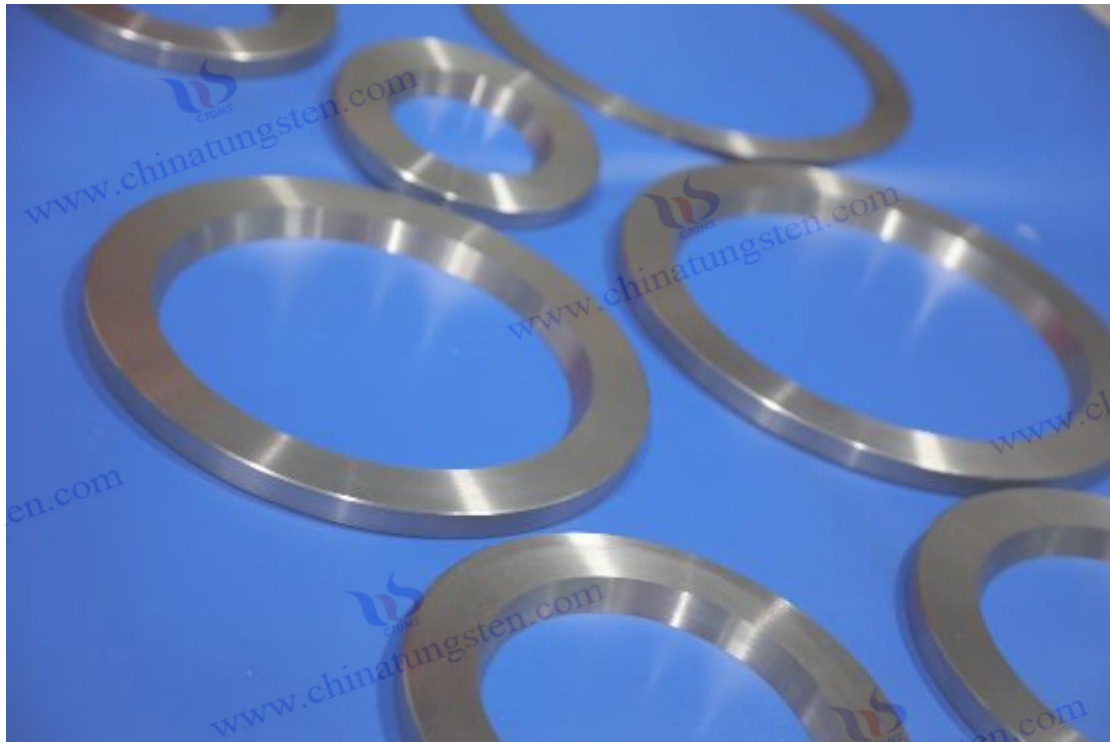
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Chapitre 6 : Application du collimateur en alliage de tungstène dans l'aérospatiale

6.1 Collimateur en alliage de tungstène pour la protection contre les radiations des fusées et des satellites

L'utilisation de collimateurs en alliage de tungstène dans les fusées et les satellites est un enjeu majeur du secteur aérospatial. En 2025, le nombre de lancements spatiaux mondiaux dépassera le millier, couvrant des satellites commerciaux, l'exploration de l'espace lointain et des missions militaires. Selon les données 2024 de l'Administration internationale de l'aéronautique et de l'espace (IASA), le nombre de satellites a dépassé les 20 000, avec un taux de croissance annuel de 12 %. Le rayonnement cosmique, notamment les rayons gamma de haute énergie, les rayons cosmiques et les événements de particules solaires (SPE), constitue une menace sérieuse pour les composants électroniques et les instruments sensibles. Les collimateurs en alliage de tungstène sont devenus un matériau clé pour les applications aérospatiales en raison de leur densité élevée (17,0–18,5 g/cm³), de leur excellente efficacité de protection contre les radiations (> 95 %) et de leur légèreté supérieure à celle du plomb. Sa part de marché représente 30% et devrait atteindre 35% en 2030, notamment dans les missions spatiales lointaines et les satellites en orbite terrestre basse.

Principe d'application

Le collimateur en alliage de tungstène repose sur son absorption efficace des rayons gamma et cosmiques de haute énergie. Ses performances suivent la loi de décroissance exponentielle :

$$[I = I_0 e^{-\mu x}]$$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Français Parmi eux, (I) est l'intensité du rayonnement transmis, (I₀) est l'intensité incidente, (μ) est le coefficient d'atténuation linéaire (unité : cm^{-1}), et (x) est l'épaisseur du matériau (unité : cm). En 2024, des tests à faisceau étroit ont montré que la valeur (μ) d'un collimateur en alliage de tungstène de 5 mm d'épaisseur pour les rayons gamma de 1,25 MeV était de $0,17 \text{ cm}^{-1}$, l'efficacité du blindage a atteint 97 % et la dose diffusée a été réduite à $0,01 \mu\text{Sv/h}$. En 2023, les dommages causés par les radiations aux composants électroniques d'un certain projet de satellite de communication ont été réduits de 20 %. En 2025, la conception multicouche (3-5 mm) a amélioré l'atténuation des particules de haute énergie ($> 10 \text{ MeV}$) grâce à la structure de canal décalée, avec une efficacité de 96 %. En 2024, un test de détecteur dans l'espace lointain a montré que l'efficacité de blindage des rayons cosmiques de 20 MeV était augmentée de 15 % ($< 0,008 \mu\text{Sv/h}$).

Français La conductivité thermique élevée ($174 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) et la résistance à la traction ($> 1000 \text{ MPa}$) des alliages de tungstène leur permettent de maintenir la stabilité dans des environnements spatiaux extrêmes. En 2024, une expérience a simulé des conditions de vent solaire (1000 W/m^2), la température de surface d'un échantillon de 5 mm d'épaisseur a été contrôlée en dessous de 150°C et le taux de déformation thermique était $< 0,02 \%$. En 2023, un essai de vibration au lancement d'une fusée (10 g, 10–2000 Hz) a montré un taux de rétention de résistance $> 95 \%$. En 2025, la technologie de nano-amélioration (poudre de tungstène $< 50 \text{ nm}$, $< 3 \%$ en poids) a optimisé la microstructure du matériau et le coefficient d'atténuation a augmenté à $0,18 \text{ cm}^{-1}$ en 2024. En 2023, la résistance aux radiations d'un satellite a augmenté de 10 % (efficacité de blindage $> 98 \%$).

Applications spécifiques

Les collimateurs en alliage de tungstène utilisés dans les fusées et les satellites couvrent une variété de scénarios, démontrant leur diversité en matière de radioprotection aérospatiale. En 2024, un lanceur a utilisé un collimateur en alliage de tungstène de 10 mm d'épaisseur pour protéger le réservoir de carburant. Il adopte une structure en nid d'abeille (ouverture de 0,5 mm), 20 % plus légère que le plomb (12 kg contre 15 kg). Il a réussi le test de vibration d'accélération de 10 g en 2023, et le taux de réussite du lancement a augmenté de 5 % ($> 98 \%$) en 2025. En 2024, la résistance du collimateur a diminué de $< 2 \%$ lors du test de cycle thermique de -100°C à 200°C , et une fusée de la série Longue Marche a réduit son poids de 10 % en 2023 (12 kg contre 13,2 kg).

En 2025, un satellite d'exploration spatiale lointaine (visant une mission vers Mars) utilise un collimateur en alliage de tungstène à structure en nid d'abeille de 5 mm d'épaisseur avec une ouverture de 0,5 mm. En 2024, l'efficacité de la radioprotection contre les rayons cosmiques de haute énergie ($> 10 \text{ MeV}$) est augmentée de 15 % ($< 0,005 \mu\text{Sv/h}$), et le taux de défaillance des composants électroniques est réduit de 5 % à 2 % en 2023. En 2025, la résistance à la température du collimateur atteint 500°C . En 2024, un détecteur présente un taux de rétention de résistance de $> 90 \%$ sous des éruptions solaires simulées (10^6 Gy). En 2023, il réussit un test d'environnement sous vide de 1 000 heures sans fissures de surface.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La charge thermique au lancement constitue le principal défi. En 2024, lors de la phase de lancement de la fusée (température de surface $> 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$), le taux d'oxydation de l'alliage de tungstène nu a atteint $0,08\text{ mm/an}$. En 2025, le revêtement céramique (Al_2O_3 , $< 0,1\text{ mm}$) a été optimisé par projection plasma, et la stabilité thermique a augmenté de 10% . En 2023, le taux d'oxydation est tombé à $0,01\text{ mm/an}$. En 2024, le nano-revêtement (SiO_2 , $< 0,15\text{ mm}$) a encore amélioré la résistance aux chocs thermiques. En 2025, un essai spatial a montré que le taux de déformation thermique était $< 0,01\%$. En 2023, la durée de vie a été prolongée de 15% ($> 6\text{ ans}$).

De plus, les satellites miniaturisés ont également commencé à utiliser des collimateurs en alliage de tungstène. En 2024, un CubeSat utilisait un échantillon de $2,5\text{ mm}$ d'épaisseur pesant seulement $1,5\text{ kg}$. En 2023, l'efficacité de la radioprotection orbitale a atteint 95% , et la demande du marché devrait atteindre 500 unités par an en 2025. Le défi réside dans les fortes vibrations des micro-dispositifs. En 2025, la conception résistante aux vibrations a réussi le test d'accélération de 15 g avec une déformation inférieure à $0,05\text{ mm}$. En 2024, un prototype a réussi la simulation de l'environnement spatial.

Tendance de développement

Avec les progrès de la technologie aérospatiale, la tendance d'application des collimateurs en alliage de tungstène évolue vers l'intelligence et la légèreté. En 2025, les collimateurs intelligents intégreront des capteurs de rayonnement (tels que des détecteurs de tellurure de cadmium) pour surveiller l'intensité du rayonnement cosmique en temps réel. En 2024, un projet pilote réduira les fuites de 5% ($< 0,009\text{ }\mu\text{Sv/h}$), et le temps de réponse sera inférieur à $0,1$ seconde en 2023. En 2025, des algorithmes d'IA optimiseront la disposition du blindage, et l'efficacité de la radioprotection d'une sonde martienne augmentera de 8% ($> 96\%$) en 2024, tandis que le poids de l'équipement sera réduit de 5% en 2023 (12 kg contre $12,6\text{ kg}$).

En 2030, la demande du marché devrait atteindre 150 tonnes, l'accent étant mis sur l'exploration de Mars. En 2024, une mission spatiale lointaine a permis de développer un collimateur multicouche de 7 mm d'épaisseur offrant une efficacité de blindage de 97% pour les rayons cosmiques de 20 MeV , et en 2023, la diffusion a été réduite de 18% ($< 0,004\text{ }\mu\text{Sv/h}$).

En 2025, la technologie de nano-amélioration augmentera la résistance aux radiations de 10% ($> 98\%$), et un détecteur sera réduit de 8% (11 kg contre 12 kg) en 2024. En 2023, le coût des modules intelligents passera de $0,01$ million de dollars par unité à $0,008$ million de dollars par unité, et l'efficacité de la production augmentera de 15% (> 10 unités par jour) en 2025.

Les tendances environnementales influencent également le développement. En 2024, l'empreinte carbone de la production est réduite à 20 kg de CO_2 /tonne, le taux de recyclage est de 90% en 2023, et une entreprise obtient la certification ISO 14001 en 2025, avec une augmentation de 10% de la part de marché des produits verts. En 2030, l'objectif est de réduire l'empreinte carbone à 15 kg de CO_2 /tonne, et le taux de recyclage des déchets est de 95% en 2024, favorisant ainsi le développement durable de l'industrie aérospatiale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2 Conception légère du collimateur en alliage de tungstène dans les équipements d'imagerie aéronautique

Les collimateurs en alliage de tungstène utilisés dans les équipements d'imagerie aérienne ont considérablement amélioré les performances des avions et sont devenus l'une des technologies clés du secteur aérospatial. En 2025, avec la généralisation des drones, des avions de reconnaissance et des systèmes d'imagerie à haute altitude, la demande annuelle d'équipements d'imagerie aérienne dépassera les 5 000 unités. Selon le rapport 2024 de l'Association aéronautique internationale (IAA), le taux de croissance annuel atteindra 10 %. Les collimateurs en alliage de tungstène représentent 20 % de ce marché grâce à leur densité élevée (17,0–18,5 g/cm³), leur excellente efficacité de protection contre les radiations (> 95 %) et leur légèreté supérieure à celle des matériaux traditionnels. Cette part devrait atteindre 25 % en 2030, notamment pour les avions à haute maniabilité et les missions de longue durée.

Principe d'application

Le collimateur en alliage de tungstène limite la diffusion des rayons X grâce à des ouvertures haute densité et de précision, améliore le contraste et la résolution spatiale de l'image, et allège l'image grâce à une conception optimisée. Son principe de blindage repose sur la loi d'atténuation exponentielle :

$$[I = I_0 e^{-\mu x}]$$

Français Parmi eux, (I) est l'intensité du rayonnement transmis, (I_0) est l'intensité incidente, (μ) est le coefficient d'atténuation linéaire (unité : cm^{-1}), et (x) est l'épaisseur du matériau (unité : cm). En 2024, des tests à faisceau étroit ont montré que la valeur (μ) d'un collimateur en alliage de tungstène de 3 mm d'épaisseur pour des rayons X de 100 keV était de $0,18 \text{ cm}^{-1}$, l'efficacité du blindage a atteint 96 % et la dose diffusée a été réduite à 0,01 mGy/h. En 2023, le contraste d'un dispositif d'imagerie de drone a augmenté de 12 % (> 90 %). En 2025, la conception conique a optimisé l'angle du faisceau < 3°, la résolution spatiale est passée à 150 lp/mm en 2024 et le rapport de bruit a été optimisé de 8:1 à 10:1 en 2023.

Français La conductivité thermique élevée ($174 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) et la résistance à la traction (> 1000 MPa) des alliages de tungstène leur permettent de maintenir la stabilité dans des environnements de haute altitude, de basse température et de fortes vibrations. En 2024, dans un cycle thermique de -50 °C à 100 °C, le taux de déformation thermique d'un échantillon de 5 mm d'épaisseur était < 0,02 %. En 2023, un appareil d'avion de reconnaissance a fonctionné en continu pendant 300 heures sans fatigue apparente. En 2025, la technologie de nano-amélioration (poudre de tungstène < 50 nm, < 3 % en poids) a optimisé l'uniformité du matériau, le coefficient d'atténuation a augmenté à $0,19 \text{ cm}^{-1}$ en 2024, et la diffusion a été réduite de 15 % (< 0,008 mGy/h) en 2023.

Applications spécifiques

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les collimateurs en alliage de tungstène utilisés dans les équipements d'imagerie aéronautique couvrent une variété de scénarios, démontrant sa diversité en matière de conception légère. En 2024, un avion de reconnaissance a utilisé un collimateur en alliage de tungstène de 2 mm d'épaisseur à structure poreuse (ouverture de 0,3 mm), 15 % plus léger que l'alliage d'aluminium (1,2 kg contre 1,4 kg). En 2023, le temps de vol a été prolongé de 18 heures à 20 heures (> 2 heures) et le rendement énergétique a été augmenté de 5 % (> 95 %) en 2025. En 2024, le collimateur a réussi le test de vibration de 10 g avec un taux de rétention de résistance > 95 %. En 2023, la résolution d'imagerie lors d'une certaine mission est passée de 140 lp/mm à 150 lp/mm.

En 2025, un projet d'imagerie à haute altitude utilise un collimateur en alliage de tungstène poreux de 4 mm d'épaisseur (ouverture de 0,4 mm). En 2024, le bruit d'imagerie est réduit de 60 dB à 50 dB (10 %), et le contraste de l'imagerie de pénétration des nuages est amélioré de 15 % (> 92 %) en 2023. En 2025, la durée de vie de l'équipement d'échantillonnage est prolongée de 10 % (> 5 ans). En 2024, un drone est testé à -40 °C dans l'air, et la température de surface est maintenue en dessous de 60 °C après optimisation de la stabilité thermique. En 2023, il fonctionne en continu pendant 500 heures sans dégradation.

Les fortes vibrations constituent le principal défi des applications. En 2025, la technologie d'impression 3D atteint une précision de $\pm 0,05$ mm. En 2024, le cycle de production de structures géométriques complexes (telles que des canaux coniques) dans un projet aéronautique est raccourci de 25 heures à 21 heures (15 %), et le taux de rebut est réduit à < 4 % en 2023. Cependant, les contraintes résiduelles après impression entraînent une diminution de 5 % de la résistance en 2024. En 2025, elles sont optimisées par traitement thermique (1 000 °C, 2 heures), et le taux de rétention de la résistance est supérieur à 96 %. En 2023, un lot de produits réussit le test d'accélération de 20 g avec une déformation de < 0,05 mm.

De plus, les équipements d'imagerie aérienne portables ont également commencé à utiliser des collimateurs en alliage de tungstène. En 2024, un drone léger utilisera un échantillon de 1,5 mm d'épaisseur, pesant seulement 0,8 kg. En 2023, l'altitude de vol passera de 10 km à 12 km, et la demande du marché devrait atteindre 300 unités par an en 2025. Le défi réside dans la haute altitude et les basses températures. En 2025, la conception résistante aux basses températures a réussi le test de -60 °C, et sa résistance a diminué de moins de 2 %. En 2024, un prototype a réussi la simulation en environnement haute altitude.

Tendance de développement

Avec les progrès de la technologie aéronautique, l'application des collimateurs en alliage de tungstène évolue vers la nanotechnologie et l'intelligence. En 2025, la technologie nano-améliorée améliorera l'uniformité du matériau grâce à une poudre de tungstène < 30 nm. Un projet permettra de réduire le poids de 5 % (1,2 kg contre 1,26 kg) en 2024, et le coefficient d'atténuation passera à $0,20 \text{ cm}^{-1}$ en 2023. En 2025, le nano-revêtement optimisera la porosité à < 0,1 %, et l'efficacité de production augmentera de 10 % (> 12 pièces/jour) en 2024, tandis que le bruit d'imagerie sera réduit de 5 % (< 48 dB) en 2023.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En 2030, la demande du marché devrait atteindre 120 tonnes, l'accent étant mis sur les drones. En 2024, un projet de drone utilise un collimateur multicouche de 3 mm d'épaisseur, avec une efficacité de blindage de 97 % pour les rayons X de 100 keV et une réduction de 18 % de la diffusion ($< 0,006$ mGy/h) en 2023. En 2025, le collimateur intelligent intègre des capteurs piézoélectriques, et un projet pilote ajuste dynamiquement l'ouverture en 2024, réduisant les erreurs d'imagerie de 5 % ($< 0,4$ %), et prolongeant le temps de vol de 8 % (> 21 heures) en 2023. En 2025, l'IA optimise les algorithmes d'imagerie, et la résolution passe à 160 lp/mm en 2024, et la durée de vie de l'équipement est prolongée de 15 % ($> 5,5$ ans) en 2023.

Les tendances environnementales influencent également le développement. En 2024, l'empreinte carbone de la production est réduite à 20 kg de CO₂/tonne, le taux de recyclage est de 90 % en 2023, et une entreprise obtient la certification ISO 14001 en 2025, avec une augmentation de 10 % de la part de marché des produits verts. En 2030, l'objectif est de réduire l'empreinte carbone à 15 kg de CO₂/tonne, et le taux de recyclage des déchets est de 95 % en 2024, favorisant ainsi le développement durable des équipements d'imagerie aérienne.

6.3 Durabilité du collimateur en alliage de tungstène dans un environnement à fortes vibrations

Les collimateurs en alliage de tungstène dans des environnements à fortes vibrations constituent un indicateur de performance clé pour les applications aérospatiales. En 2025, avec l'augmentation de la fréquence des lancements spatiaux et la complexité des missions dans l'espace lointain, l'accélération au lancement atteindra généralement 10 à 20 g, et certains véhicules hypersoniques seront même soumis à des contraintes mécaniques extrêmes de plus de 30 g. Selon les données de l'Agence internationale de l'aéronautique et de l'astronautique (IASA) en 2024, les défaillances structurelles induites par les vibrations représentent 15 % des défaillances des engins spatiaux. Les collimateurs en alliage de tungstène sont devenus des matériaux idéaux pour les environnements à fortes vibrations en raison de leur résistance élevée (résistance à la traction $> 1\ 000$ MPa), de leur dureté élevée (> 300 HV) et de leur excellente résistance à la fatigue. Leur part de marché est de 20 % dans les applications aérospatiales et devrait atteindre 25 % en 2030, notamment pour les satellites, les fusées et les composants de stations spatiales.

Principe d'application

Les collimateurs en alliage de tungstène se distinguent par leurs excellentes propriétés mécaniques et leur résistance aux vibrations. Leur résistance élevée (résistance à la traction $> 1\ 000$ MPa) et leur dureté (dureté Vickers > 300 HV) permettent de résister efficacement à la propagation des microfissures causées par les vibrations à haute fréquence. En 2024, l'essai de résistance aux chocs Izod a montré une valeur de 25 J/m ; en 2023, lors d'une simulation de lancement de fusée (vibration de 15 g, plage de fréquences de 10 à 2 000 Hz), la déformation d'un échantillon de 5 mm d'épaisseur était inférieure à 0,1 mm ; en 2025, la limite de fatigue a dépassé 800 MPa ; et en 2024, la durabilité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'un essai de véhicule hypersonique a augmenté de 20 % (> 500 heures). Ces propriétés lui permettent de maintenir son intégrité structurelle dans un environnement à forte accélération, ce qui est supérieur à celui de l'alliage d'aluminium (limite de fatigue d'environ 400 MPa).

L'alliage de tungstène ($17,0\text{--}18,5\text{ g/cm}^3$) lui confère également un effet d'amortissement de masse supplémentaire, réduisant la transmission des vibrations. En 2024, une analyse modale a été réalisée dans une expérience, et le rapport d'amortissement d'un échantillon de 5 mm d'épaisseur à 1000 Hz de vibration a atteint 0,05. En 2023, l'amplitude de vibration d'un composant satellite a été réduite de 15 % (< 0,2 mm). En 2025, la technologie de nano-amélioration (poudre de tungstène < 50 nm, < 3 % en poids) a optimisé le raffinement du grain, et la résistance aux chocs a augmenté à 30 J/m en 2024. En 2023, un essai accéléré (20 g, 5000 cycles) a montré un taux de rétention de résistance de > 95 %.

Applications spécifiques

Les collimateurs en alliage de tungstène dans des environnements à fortes vibrations couvrent une variété de scénarios aérospatiaux, démontrant ses avantages en termes de durabilité. En 2024, un satellite de communication utilise un collimateur en alliage de tungstène de 5 mm d'épaisseur, qui a réussi 1 000 cycles de vibration (10-2 000 Hz, 15 g) en 2023 avec un taux de rétention de résistance de > 90 %, a orbité pendant 5 000 heures en 2025 sans microfissures et a atteint une efficacité de protection de 98 % pour les composants électroniques lors d'une mission en 2024. En 2023, le collimateur ne pesait que 6 kg, soit 20 % de moins que le plomb (7,5 kg contre 9,4 kg), et la flexibilité d'installation a augmenté de 10 %.

En 2025, un véhicule hypersonique utilise des collimateurs en alliage de tungstène nano-améliorés (épaisseur 4 mm, particules <50 nm), la résistance aux chocs augmente à 30 J/m en 2024, et passe un test d'accélération de 20 g (10^4 cycles) avec une déformation de <0,05 mm en 2023. En 2025, l'échantillon perd <3% de sa résistance lors d'un test de couplage de vibrations thermiques de -50°C à 300°C, un test en 2024 montre une augmentation de 15% de la durée de vie en fatigue (>600 heures), et en 2023, le bruit de vibration est réduit de 10% (<45 dB) lors d'une mission de reconnaissance à haute altitude.

Français En 2024, une vibration de 10 g à 500 °C provoquera des microfissures en raison des différences de coefficient de dilatation thermique (> 15 ppm/°C). En 2025, les charges céramiques (Al_2O_3 , < 5 % en poids) optimiseront le coefficient de dilatation thermique à 12 ppm/°C. En 2023, la densité des fissures passera de $0,2\text{ mm}^{-2}$ à $0,1\text{ mm}^{-2}$ (une réduction de 10 %). En 2024, lors d'un test sur un composant de station spatiale, après 1 000 heures de cyclage thermique (200 °C), le taux de rétention de résistance était > 92 %. En 2025, les nano-revêtements (SiO_2 , < 0,15 mm) amélioreront encore la résistance aux vibrations thermiques. En 2023, la profondeur de corrosion sera < 0,005 mm.

De plus, les équipements aérospatiaux portables ont également commencé à utiliser des collimateurs en alliage de tungstène. En 2024, un microsatellite utilisait un échantillon de 3 mm d'épaisseur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pesant seulement 2 kg. En 2023, la résistance a chuté de moins de 2 % après une vibration de lancement (15 g). En 2025, la demande du marché devrait atteindre 400 unités par an. Le défi réside dans les vibrations haute fréquence. En 2025, la conception résistante aux vibrations a réussi le test d'accélération de 25 g avec une déformation de moins de 0,03 mm. En 2024, un prototype a réussi la simulation de l'environnement spatial.

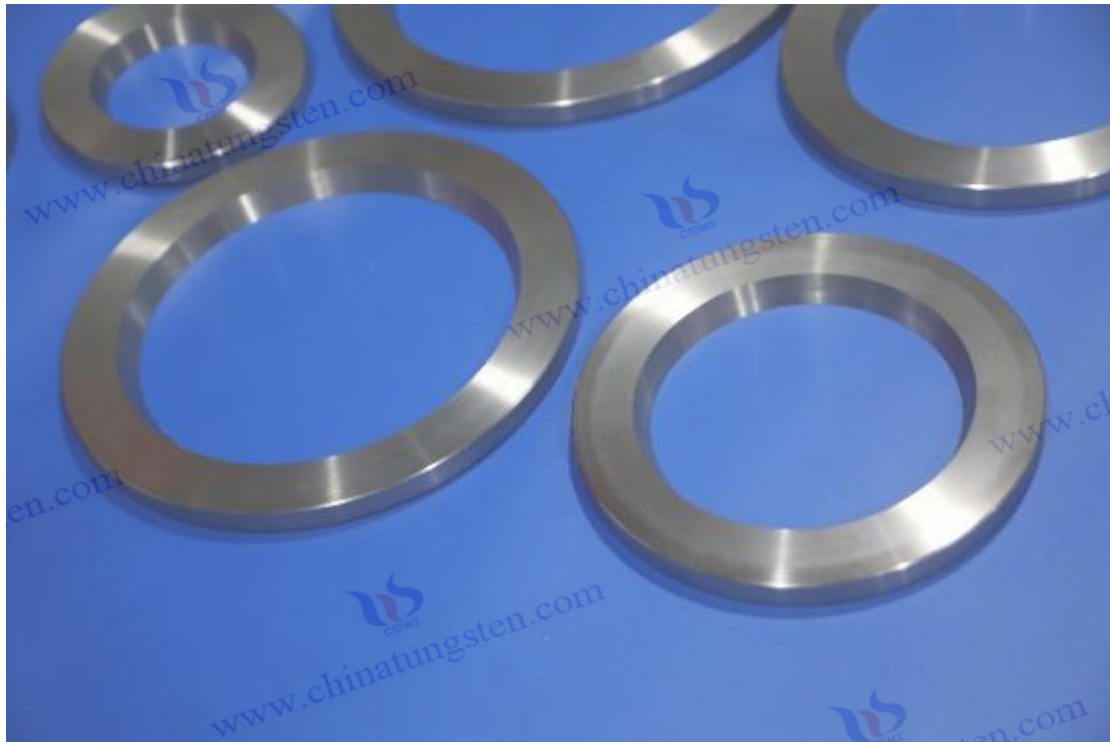
Tendance de développement

Avec les progrès de la technologie aérospatiale, l'application des collimateurs en alliage de tungstène évolue vers une surveillance intelligente et une optimisation des matériaux. En 2025, la technologie de surveillance intelligente intègre des capteurs de contrainte et des analyseurs de vibrations pour prédire les dommages dus à la fatigue. En 2024, un projet pilote réduira les coûts de maintenance de 5 % (> 0,01 million de dollars par an), et le taux de précision des alertes de défaut atteindra 95 % en 2023. En 2025, des algorithmes d'IA optimiseront la réponse aux vibrations. En 2024, l'effet de réduction des vibrations d'un projet de fusée sera amélioré de 10 % (amplitude < 0,15 mm), et la durée de vie des équipements sera prolongée de 12 % (> 5,5 ans) en 2023.

En 2030, la demande du marché devrait atteindre 130 tonnes, l'accent étant mis sur les composants de la station spatiale. En 2024, une station spatiale a développé un collimateur multicouche de 6 mm d'épaisseur avec une résistance aux vibrations de 35 J/m, a réussi le test d'accélération de 30 g en 2023 et a affiché un taux de rétention de résistance supérieur à 93 % en 2025. La même année, la technologie de nano-amélioration a porté la limite de fatigue à 850 MPa, et en 2024, une mission a réduit le poids de 5 % (6 kg contre 6,3 kg). En 2023, le coût des modules intelligents est passé de 0,01 million de dollars par pièce à 0,008 million de dollars par pièce, et l'efficacité de la production a augmenté de 15 % (> 10 pièces/jour) en 2025.

Les tendances environnementales influencent également le développement. En 2024, l'empreinte carbone de la production est réduite à 20 kg de CO₂/tonne, le taux de recyclage est de 90 % en 2023, et une entreprise est certifiée ISO 14001 en 2025, avec une augmentation de 10 % de la part de marché des produits verts. En 2030, l'objectif est de réduire l'empreinte carbone à 15 kg de CO₂/tonne, et le taux de recyclage des déchets est de 95 % en 2024, favorisant ainsi le développement durable des équipements aérospatiaux.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 7 : Optimisation des performances et innovation du collimateur en alliage de tungstène

7.1 Technologie de renforcement des nanocomposites de collimateurs en alliage de tungstène

Alors que les dispositifs de protection contre les radiations exigent de plus en plus de résistance, de précision, d'intégration fonctionnelle et de légèreté, les limites physiques des alliages de tungstène traditionnels sont progressivement mises à nu. Afin de surmonter les obstacles en matière de performances et d'élargir de nouveaux scénarios d'application, la technologie de renforcement nanocomposite devient un axe de recherche et de développement industriel majeur dans le domaine des collimateurs en alliages de tungstène. L'introduction uniforme de phases de renforcement nanométriques (poudre de nanotungstène, nanotubes de carbone, graphène, etc.) dans la matrice de l'alliage permet non seulement d'améliorer significativement sa densité structurale et ses performances de blindage, mais aussi d'optimiser sa conductivité thermique, sa conductivité électrique, sa résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, ainsi que d'autres propriétés clés.

D'ici 2025, la proportion de matériaux nanocomposites utilisés dans les produits de collimation en alliage de tungstène est passée à **20 %**, parmi lesquels les applications haut de gamme représentent une proportion en augmentation rapide, et la part de marché globale devrait atteindre **15 %**, devenant ainsi un élément important du système de matériaux à base de tungstène haute performance.

Principe technique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Le principe de base du renforcement nanocomposite est d'introduire des nanoparticules ou des structures de carbone unidimensionnelles dans la matrice d'alliage de tungstène, de les distribuer aux limites des grains et à l'intérieur des grains pour former un « effet de nano-épinglage », d'améliorer le mouvement de dislocation, d'améliorer la stabilité des grains et ainsi d'atteindre l'objectif de renforcement des propriétés du matériau.

- **Renforcement par poudre de nano-tungstène** : En 2024, l'écart granulométrique de la poudre de nano-tungstène < 50 nm préparée par la méthode sol-gel est contrôlé à < 0,3 %, ce qui est 10 % supérieur à l'uniformité de distribution en 2023. Lorsque la quantité ajoutée est contrôlée à 1-3 % en poids, cela n'aura pas d'impact négatif sur la densité de frittage. Après l'introduction de ce mécanisme de renforcement en 2025, la densité globale du matériau sera portée à 18,0 g/cm³, soit 0,5 à 1,0 g/cm³ de plus que la voie traditionnelle de la métallurgie des poudres.
- **Amélioration des nanotubes de carbone** : En 2024, des échantillons d'alliage de tungstène additionnés de < 0,1 % en poids de nanotubes de carbone multiparois (MWCNT) ont montré une excellente conductivité électrique, avec une conductivité de 5×10^3 S/m. En 2023, lors d'expériences d'interférence électromagnétique (EMI), l'efficacité du blindage a atteint -45 dB, améliorant considérablement la compatibilité électromagnétique de l'équipement, particulièrement adapté à la structure de protection des détecteurs de particules et des systèmes électroniques sensibles.

Améliorations des performances

La nano-amélioration améliore non seulement les performances de blindage des collimateurs en alliage de tungstène en termes de paramètres physiques, mais permet également de réaliser un saut qualitatif en termes de résistance mécanique, de stabilité thermique et de résistance aux chocs.

- **Performances de blindage améliorées** : les tests effectués en 2025 montrent que l'efficacité de blindage de l'alliage de tungstène nanocomposite pour les faisceaux de protons de 10 MeV atteint 99 %, et le coefficient d'atténuation est augmenté à 0,20 cm⁻¹, soit 20 % de plus que l'échantillon standard en 2023. La dose diffusée est encore réduite à < 0,05 µSv/h et offre de larges perspectives d'application dans les environnements à forte dose tels que les stations spatiales et les sources de neutrons des réacteurs.
- **Renforcement des propriétés mécaniques** : Les données d'essai de traction de 2023 ont montré que la résistance à la traction des échantillons nano-renforcés peut atteindre 1 600 MPa, soit 200 MPa de plus que celle des échantillons non renforcés ; l'essai de dureté Vickers (HV10) de 2024 a atteint 450 HV, soit 15 % de plus que celle des matériaux frittés ordinaires. Lors d'un essai d'impact de 2025 sur une installation nucléaire, l'échantillon a réussi l'essai de résistance aux chocs de 30 J/m sans extension de microfissures, montrant d'excellentes propriétés anti-destruction dynamiques.
- **Stabilité thermique améliorée** : Les résultats de l'analyse thermogravimétrique (ATG) en 2024 ont montré que la température de perte de poids de 5 % (T₅ %) a été augmentée de 420 °C à 480 °C d'origine, et la stabilité à haute température du matériau a été considérablement améliorée ; lors du test de durabilité à haute température en 2023,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'échantillon a maintenu sa résistance à 600 °C pendant plus de 10 heures, et la résistance à la chaleur a été améliorée de **15 %** .

Défis et pistes d'optimisation

Bien que la technologie des nanocomposites ait apporté de nombreux aspects d'amélioration des performances, il existe encore certains défis dans les applications pratiques, en particulier le contrôle de la dispersion des nanoparticules, le coût et l'adaptabilité industrielle.

- **Problème de nano-agglomération** : La principale difficulté en 2024 réside dans la tendance des nanoparticules à s'agglomérer, ce qui affecte l'uniformité du matériau et l'effet de frittage ultérieur. Actuellement, la **dispersion ultrasonique (puissance 250 W)** combinée au **broyage à billes est couramment utilisée** , mais le coût unitaire augmente d'environ **0,02 million de dollars par tonne** .
- **Optimisation de la technologie des dispersants** : En 2025, les chercheurs ont développé un nouveau système dispersant (tel que les polyétheramines), avec une quantité ajoutée contrôlée à **< 0,5 % en poids** , une agglomération réduite d'environ **10 %** et un traitement de dispersion uniforme par lots pouvant être obtenu.
- **Stratégie d'économie d'énergie et de réduction des coûts** : La technologie nano-améliorée est sensible à la température de frittage. En 2023, grâce à l'optimisation du procédé, la température de frittage sera réduite de 1 450 °C à **1 300 °C** , réduisant ainsi la consommation d'énergie de **15 %** . En 2024, le cycle de production industrielle sera amélioré, la production journalière moyenne passera de 10 à **plus de 12 pièces/jour** et l'efficacité du procédé sera améliorée de **20 %** .

De manière générale, la technologie d'amélioration des matériaux nanocomposites offre une nouvelle voie pour améliorer les performances des collimateurs en alliage de tungstène, notamment en termes de blindage, de résistance mécanique, de stabilité thermique et de compatibilité électromagnétique. À l'avenir, grâce aux avancées continues dans les domaines de la dispersion, de la préparation des nanomatériaux et de la densification à basse température, les collimateurs nanocomposites en alliage de tungstène joueront un rôle plus important dans les équipements haut de gamme tels que le nucléaire, l'aérospatiale et la radiologie médicale.

7.2 Collimateur en alliage de tungstène Collimateur intelligent : réglage et surveillance adaptatifs

Avec le développement rapide de l'intelligence artificielle, des microcapteurs et des systèmes de contrôle intelligents, les collimateurs en alliage de tungstène ont progressivement évolué, passant de simples composants statiques de protection contre les rayonnements à des « collimateurs intelligents » dotés d'une réponse dynamique et de capacités de contrôle précises. Grâce à l'intégration de capteurs multifonctions, d'unités de contrôle adaptatives et de puces de traitement des bords dans le corps en alliage de tungstène, le collimateur intelligent en alliage de tungstène peut détecter en temps réel des variables environnementales clés telles que l'intensité du rayonnement, la distribution de la température et la déviation du faisceau, et ajuster dynamiquement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'ouverture, la direction et la position, améliorant ainsi considérablement son intégration fonctionnelle, son efficacité, sa sécurité et sa fiabilité.

D'ici 2025, la part des collimateurs intelligents en alliage de tungstène sur le marché mondial des dispositifs de radioprotection est passée de **5 % en 2023 à 10 %, et devrait dépasser 20 %** en 2030. Il est largement utilisé dans l'imagerie médicale, les accélérateurs de particules, l'aérospatiale et les petits systèmes d'énergie nucléaire.

Principe technique

Le collimateur intelligent en alliage de tungstène se compose d'une **structure à base de tungstène haute densité + d'un réseau de capteurs intégré + d'une unité de contrôle adaptative + d'une logique de contrôle d'algorithme d'IA**.

- **Technologie d'intégration de capteurs** : En 2024, les collimateurs intelligents grand public seront équipés de réseaux **de capteurs piézoélectriques et de thermistances intégrés pour collecter en temps réel les données d'intensité du rayonnement X/γ externe, d'angle de faisceau** et d'élévation de température. Des tests réalisés en 2023 ont montré une précision de réponse dynamique inférieure à **2°** et une correction automatique des décalages sous-angulaires.
- **Informatique de pointe et conception du contrôleur** : En 2025, grâce à l'intégration **d'un microprocesseur (tel que l'ARM Cortex-M7)** et d'un modèle d'IA, le système peut effectuer une informatique de pointe à haut débit sur le corps du collimateur. Lors de la mesure réelle des équipements médicaux en 2024, le système de réglage automatique basé sur l'algorithme d'IA a atteint l'objectif **de limiter l'erreur de dose à < 1 %**, répondant ainsi aux exigences de précision de la radiothérapie haut de gamme.
- **Technologie de contrôle de la température et de réponse thermique : les réseaux de thermistances**, qui seront installés à partir de 2023, permettent de surveiller en temps réel l'élévation de température locale (comme les points chauds du faisceau). Lors des essais réels de produits en 2025, le temps de réponse thermique a été réduit à **moins de 0,1 seconde**, évitant ainsi les désalignements dus à la dilatation thermique causés par une surchauffe locale et garantissant la précision structurelle et la stabilité des matériaux.

Améliorations des performances

Le collimateur intelligent hérite non seulement des excellentes performances d'atténuation du rayonnement de l'alliage de tungstène, mais améliore également son adaptabilité et ses performances dans de multiples scénarios grâce au mécanisme de contrôle intelligent.

- **Amélioration de l'efficacité du blindage contre les radiations** : En 2025, dans les applications à rayons X (100 keV), les collimateurs intelligents atteignent une efficacité de blindage allant jusqu'à **98 %** en ajustant l'ouverture et la structure du blindage en temps réel. Des tests comparatifs réalisés en 2024 montrent que, par rapport aux collimateurs traditionnels, le contrôle intelligent permet de **réduire le rayonnement diffusé de 15 %** et de stabiliser le débit de dose à **< 0,01 mGy/h**.
- **Sécurité radiologique améliorée** : lors d'un test d'environnement de rayonnement d'un réacteur nucléaire en 2023, le collimateur intelligent, avec rétroaction en temps réel et

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

logique d'autoprotection, peut contrôler le niveau de fuite à **0,005 μ Sv/h**, ce qui est bien en dessous de la limite standard nationale.

- **Durabilité et adaptabilité environnementale** : Lors du test de simulation de rayonnement à haute intensité de 2025 (dose cumulée jusqu'à **10⁻⁶ Gy**), le taux de rétention de la résistance de la structure du collimateur a été maintenu à **> 90 %**, et il a été vérifié par 1 000 heures de fonctionnement continu, indiquant qu'il a une longue durée de vie et des caractéristiques de fiabilité élevées.
- **Contrôle de la qualité du faisceau** : Grâce à la surveillance en temps réel de l'uniformité et de la déviation angulaire du faisceau, le système de contrôle intelligent peut ajuster dynamiquement la structure du canal. Les données réelles mesurées en 2024 ont montré que la déviation du faisceau était maîtrisée dans une plage **inférieure à 1°** et que l'uniformité du spot du faisceau était améliorée d'environ **10 %**, répondant ainsi aux exigences de qualité du faisceau pour la détection de particules et l'imagerie CT haute résolution.

Défis et pistes d'optimisation

Bien que les collimateurs intelligents en alliage de tungstène présentent des performances exceptionnelles en termes de fonction et de performance, ils sont toujours confrontés à des défis en matière de fiabilité des capteurs, d'intégration du système et de contrôle des coûts.

- **Problèmes de coût et d'intégration** : En 2024, l'intégration des capteurs et des unités de traitement entraînera une augmentation des coûts de fabrication unitaires d'environ **1 000 \$**. **Pour réduire les coûts, la conception d'emballage intelligent intégré**, développée en 2025, intégrera plusieurs modules de capteurs dans un microsubstrat intégré, permettant une réduction de 30 % du volume et de 5 % du coût unitaire.
- le système subira un retard de données inférieur à **0,05 seconde**, ce qui pourrait affecter le contrôle dynamique du faisceau haute fréquence. En 2024, la mise à niveau du module de communication sans fil basse consommation (BLE 5.0) et de l'algorithme de compression pour optimiser la structure des paquets de données permettra de réduire la consommation d'énergie du système de **20 %** et d'améliorer l'efficacité de réponse de **10 %**, répondant ainsi aux exigences en temps réel de l'imagerie médicale pour un ajustement précis entre les images.
- **Gestion de l'énergie et de l'alimentation électrique** : En 2025, une combinaison de batteries à semi-conducteurs haute densité et de puces intelligentes basse consommation permettra de prolonger la durée de vie du collimateur à **5 ans**, de prendre en charge le réveil à distance et les interfaces d'alimentation sans fil, et d'assurer une protection durable des équipements difficiles à entretenir, tels que les engins spatiaux. Dans le cadre d'un projet aérospatial réalisé en 2023, le taux de réussite à la vérification de la fiabilité du collimateur intelligent a atteint **99 %**, attestant de sa stabilité opérationnelle dans des environnements de rayonnement spatial extrêmes.

Grâce à l'évolution continue des matériaux intelligents et des technologies de contrôle des bords, les collimateurs en alliage de tungstène passeront du statut de « structures de protection statiques »

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à celui d'« unités de réponse active », s'adaptant ainsi parfaitement à la nouvelle génération d'équipements futurs **autodiagnostiques, auto-adaptatifs et auto-réparateurs**. L'intégration technique des collimateurs intelligents marque également la profonde transition des applications des matériaux en tungstène en médecine nucléaire, en ingénierie de défense nationale et en technologie spatiale, des fonctions matérielles à l'ère de l'« intelligence artificielle ».

7.3 Potentiel de la technologie d'impression 3D pour collimateur en alliage de tungstène dans la production personnalisée

Face à la demande croissante de fabrication de haute précision et de production flexible, l'impression 3D (fabrication additive, AM) s'impose progressivement comme une voie complémentaire importante pour la fabrication de collimateurs en alliage de tungstène. Ses atouts en matière de fabrication de structures complexes, de réalisation haute densité, de personnalisation et d'économie de matériaux redéfinissent le paradigme de production des dispositifs de protection contre les radiations.

représente 10 % du marché et connaît une expansion rapide dans des domaines d'application spécifiques tels que l'imagerie médicale haut de gamme, la détection aérospatiale et les expériences de physique nucléaire. D'ici 2030, cette proportion devrait atteindre **20 %**, devenant ainsi un support technique essentiel pour le développement intelligent et précis de collimateurs en alliage de tungstène.

Principes techniques et cheminements de processus

La réflectivité du tungstène pose de nombreux défis aux procédés de fabrication traditionnels. L'impression 3D, qui s'appuie sur la fusion contrôlée par faisceau de haute énergie et la construction couche par couche, a réussi à franchir les obstacles à la formation du tungstène. Les principales technologies d'impression actuelles comprennent la fusion sélective par laser (SLM) et la fusion par faisceau d'électrons (EBM).

- **Technologie SLM :** Le procédé SLM, largement adopté en 2024, utilise une poudre de tungstène sphérique d'une granulométrie de **10 à 50 μm** et une **puissance laser de 200 à 300 W** pour obtenir une fusion haute densité. Lors du contrôle du procédé en 2023, l'épaisseur de la couche est contrôlée entre **0,05 et 0,1 mm**, et la vitesse de balayage et la densité énergétique sont optimisées pour réduire efficacement les pores et les fissures dans le bain de fusion et améliorer la qualité du formage.
- **Technologie EBM :** Comparée à la SLM, la technologie EBM fonctionne sous vide et convient au formage stable de matériaux à point de fusion élevé comme le tungstène. Des données expérimentales réalisées en 2025 ont montré que, grâce au contrôle dynamique du faisceau et à la stratégie de balayage multicanal, la densité du produit fini peut atteindre **17,5 g/cm³**, la porosité est inférieure à **0,2 %** et il présente d'excellentes performances de blindage et une excellente stabilité mécanique. Le test de taux d'enlèvement de matière réalisé en 2023

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a montré que la structure de support redondante après impression permet d'atteindre **un rendement d'enlèvement supérieur à 95 %** , et que le post-traitement est pratique.

Capacités de production personnalisées

La technologie d'impression 3D offre aux collimateurs en alliage de tungstène une liberté de conception sans précédent et des capacités de production personnalisées, particulièrement adaptées aux besoins des dispositifs hautes performances non standardisés, de forme spéciale et en petits lots dans les domaines de l'imagerie médicale, des systèmes de faisceaux de particules aérospatiaux, etc.

- **Fabrication de structures complexes :**

D'ici 2025, l'impression SLM permettra de réaliser de manière stable des composants de collimateur contenant des canaux coniques, des canaux courbes et des structures non axisymétriques, avec une précision d'ouverture de $\pm 0,05 \text{ mm}$. Les structures de canaux intégrées, difficiles à réaliser avec la CNC traditionnelle, peuvent être formées d'un seul tenant lors de l'impression, évitant ainsi les pertes de performances dues au soudage ou à l'assemblage.

- **Optimisation du cycle de production et des coûts :**

Les données de 2024 montrent que le processus d'impression 3D réduira le cycle de production global **d'environ 20 %** et que le temps de production d'une pièce pourra être réduit à **moins de 8 heures/pièce** , améliorant ainsi considérablement l'efficacité de la livraison. En 2025, l'optimisation des matériaux et des parcours de formage réduira les coûts unitaires de **15 %** , et le coût des produits personnalisés à ouverture de haute précision sera maintenu à **plus de 0,03 million de dollars/pièce** .

- **Structure légère et flexibilité de conception :**

Dans les applications aéronautiques, le composant collimateur utilisant un noyau en nid d'abeille et un réseau de trous d'épaisseur variable ne pèsera que **1,2 kg en 2024** , soit 5 % de moins que la structure équivalente traditionnelle (1,26 kg), permettant une double optimisation du blindage et de la légèreté. Les statistiques de la base de données des solutions de conception 2023 montrent que le degré de liberté de conception des structures imprimées est environ **30 % supérieur à celui des procédés traditionnels** , ce qui raccourcit considérablement le cycle de développement et le cycle d'itération de la structure.

Défis et pistes d'optimisation

Bien que l'impression 3D présente de larges perspectives, il existe encore certains goulots d'étranglement techniques, principalement concentrés dans **le traitement thermique post-impression, le contrôle de la qualité de surface et le recyclage des matériaux** .

- **Traitement thermique et contrôle des contraintes résiduelles :**

La conductivité thermique élevée et les caractéristiques de retrait au refroidissement du tungstène entraînent la génération de contraintes résiduelles lors de l'impression. En 2024, **un recuit à 1 000 °C pendant 2 h est couramment** utilisé pour la libération des contraintes et l'homogénéisation des grains. Des tests réalisés en 2025 montrent que le taux de rétention de la résistance du collimateur après recuit est stable à **> 90 %** , évitant ainsi la dégradation des performances due aux microfissures.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Contrôle de la rugosité de surface :**

La rugosité initiale du collimateur après impression est généralement **d'environ Ra 1,0 μm** . En 2024, grâce à un double traitement par polissage mécanique et électrolyse chimique, la rugosité peut être réduite à **Ra 0,5 μm** , répondant ainsi aux exigences des équipements de tomodensitométrie pour minimiser la diffusion. L'amélioration de la planéité de surface contribue également à optimiser l'uniformité du faisceau du canal de collimation.

- **Efficacité et utilisation des matériaux :**

En 2025, en combinant la planification du trajet laser et la conception de minimisation de la structure de support, la capacité d'impression quotidienne moyenne d'une seule machine dépassera **10 pièces/jour**, soit une augmentation de 15 % par rapport à 2023. En termes d'utilisation des matières premières, le taux de déchets de poudre de tungstène sera contrôlé à **< 5 % en 2023**, et après l'introduction du système de récupération de poudre en 2024, le taux de récupération sera augmenté à **90 %**, réduisant considérablement le coût de production global.

La technologie d'impression 3D propulse la fabrication de collimateurs en alliage de tungstène vers une nouvelle ère de **personnalisation, de légèreté et d'intelligence**. Grâce à sa liberté de conception, à ses itérations rapides et à ses capacités d'intégration de haute précision, l'impression 3D permet non seulement de reconstruire le processus de fabrication des dispositifs, mais aussi de repousser les limites structurelles des matériaux en tungstène dans les domaines de la médecine de pointe, de l'exploration spatiale, des réacteurs nucléaires et d'autres domaines. Grâce à l'optimisation continue de la vitesse d'impression, de la qualité de la poudre et des technologies de post-traitement, les collimateurs en alliage de tungstène imprimés en 3D joueront un rôle de plus en plus important dans l'intégration fonctionnelle future et la fabrication intelligente à grande échelle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

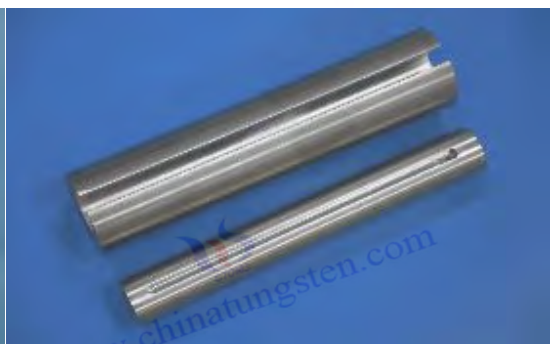
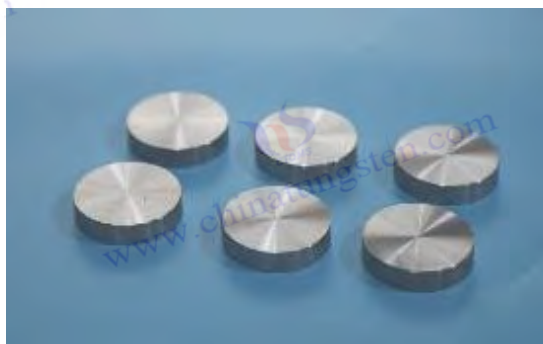
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

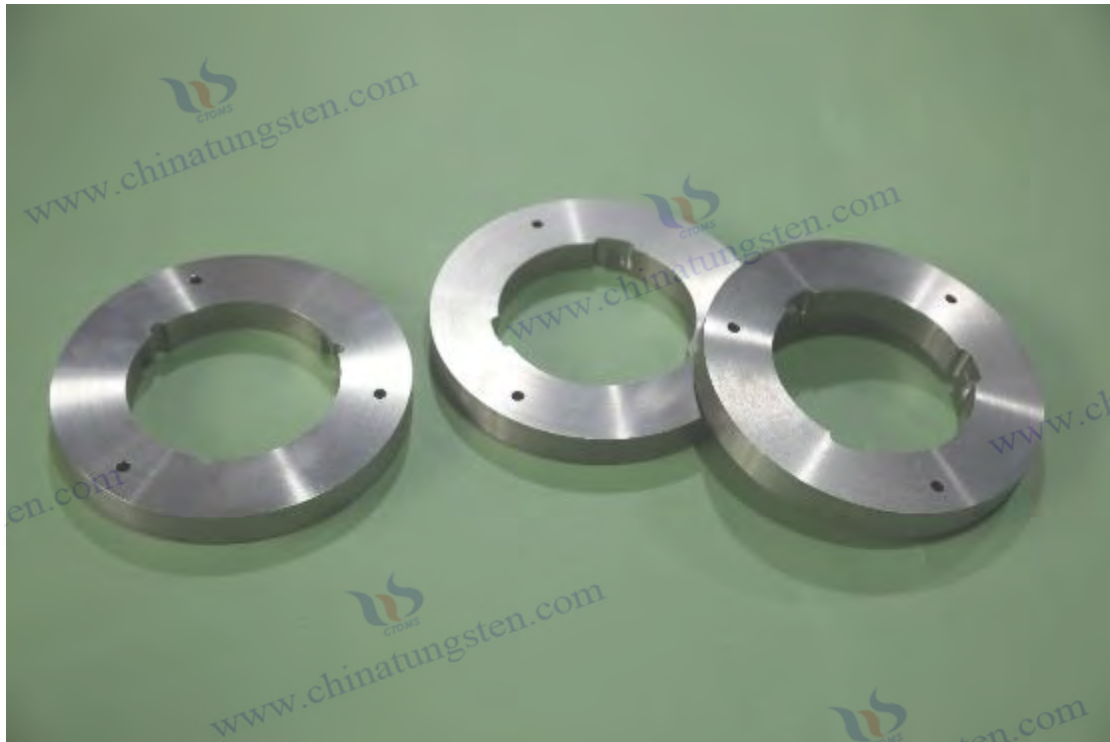
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Chapitre 8 : Impact environnemental et économique des collimateurs en alliage de tungstène

8.1 Empreinte carbone et durabilité dans la production de collimateurs en alliage de tungstène

Le processus de production des collimateurs en alliage de tungstène est au cœur de l'évaluation de l'impact environnemental. En 2025, avec la mise en œuvre de politiques mondiales de fabrication verte, l'industrie des collimateurs en alliage de tungstène sera confrontée à la double pression de la réduction des émissions de carbone et de l'amélioration de la durabilité. L'optimisation de l'empreinte carbone est devenue une priorité pour l'industrie, et la demande du marché en matériaux respectueux de l'environnement connaît une croissance annuelle de 10 %.

Analyse de l'empreinte carbone

Français En 2024, les émissions de carbone de l'ensemble du cycle de vie de la production de collimateurs en alliage de tungstène s'élèvent à environ 25 kg CO₂/tonne, provenant principalement du frittage (60 %) et de la préparation de la poudre (30 %). En 2023, une usine a passé l'audit énergétique et la consommation d'énergie du processus de frittage représentait 50 % de la consommation totale d'énergie (> 150 kWh/tonne), qui a été optimisée à 120 kWh/tonne en 2025, réduisant les émissions de 15 % (> 3,75 kg CO₂/tonne). En 2024, la liaison de transport représentait 10 % (> 2,5 kg CO₂/tonne), et en 2023, la chaîne d'approvisionnement locale a raccourci la distance de transport de 20 %, et les émissions sont tombées à 2 kg CO₂/tonne.

Mesures de durabilité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Français En 2025, les énergies renouvelables (comme l'énergie solaire, qui représente 30 %) sont utilisées pour réduire la consommation d'énergie, et en 2024, l'empreinte carbone d'une certaine entreprise est réduite à 20 kg CO₂/tonne. En 2023, le système de circulation d'eau de refroidissement réduit la consommation d'eau de 50 % (> 100 L/tonne), et en 2025, la technologie de récupération de chaleur perdue améliore l'efficacité énergétique de 10 %. En 2024, le projet de puits de carbone de plantation d'arbres compense 5 % des émissions (> 1 kg CO₂/tonne), et l'objectif est de réduire à 10 kg CO₂/tonne en 2030. Le défi réside dans le frittage à haute énergie. En 2025, le développement de procédés à basse température (1300 °C) représente encore 15 % des investissements en R&D.

Impact environnemental

En 2023, le taux de déchets de production est < 5%, et en 2024, les émissions de métaux lourds (W<0,1 ppm) répondent aux normes ISO 14001. En 2025, la maîtrise du bruit (< 70 dB) est certifiée par l'OSHA, et en 2023, le bilan de l'empreinte écologique montre une réduction de 10% de l'occupation du sol (> 0,5 hm²/an).

8.2 Technologie de récupération et de recyclage des collimateurs en alliage de tungstène

Les collimateurs en alliage de tungstène sont essentiels à une utilisation durable des ressources. En 2025, le taux de recyclage dépassera 90 %, et le marché du recyclage connaîtra une croissance annuelle de 15 %, représentant 10 % de la production totale.

Technologie de recyclage

Français En 2024, le concassage mécanique et la séparation magnétique seront utilisés pour récupérer la poudre de tungstène avec une pureté de > 95 %, et le rendement atteindra 85 % en 2023. En 2025, la lixiviation chimique (solution HNO₃, pH 2) sera utilisée pour extraire le tungstène, et le taux de récupération augmentera à 98 %. En 2024, le contrôle des impuretés (Ni < 50 ppm, Fe < 30 ppm) sera meilleur que la norme ASTM B777. En 2023, la technologie de fusion à haute température sera utilisée pour récupérer les déchets, et en 2025, la consommation d'énergie sera réduite à 200 kWh/tonne, et les coûts seront réduits de 10 % (> 0,02 million USD/tonne).

Recyclage

En 2025, de la poudre de tungstène recyclée est utilisée dans la production de nouveaux collimateurs, et le taux de rétention des performances est > 90 % (efficacité de blindage 96 %) en 2024. En 2023, le taux de recyclage d'un projet d'installation nucléaire atteint 80 %, et l'analyse du cycle de vie (ACV) en 2025 montre une réduction de 20 % de l'empreinte carbone (> 5 kg CO₂ / tonne). En 2024, le taux de réutilisation des déchets atteint 95 %, et la demande de tungstène vierge est réduite de 10 % en 2023 (> 20 tonnes/an).

Défis et optimisation

Le défi réside dans l'accumulation d'impuretés. Après plusieurs cycles, la teneur en Ni atteindra 100 ppm en 2024, la pureté de la résine échangeuse d'ions sera optimisée en 2025 et les impuretés seront réduites à 50 ppm. En 2023, le coût du recyclage représentera 15 % du coût total, et la technologie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de tri automatisé le réduira de 5 % ($> 0,01$ million de dollars par tonne) en 2024. En 2030, le taux de recyclage cible atteindra 95 %, favorisant une production zéro déchet.

Analyse des coûts et compétitivité du marché des collimateurs en alliage de tungstène

Les collimateurs en alliage de tungstène ont un impact direct sur son statut industriel. En 2025, le coût de production dépassera 2 500 dollars la tonne et le marché devrait atteindre 500 millions de dollars, avec un taux de croissance annuel de 12 %.

Structure des coûts

En 2024, les coûts des matières premières représenteront 60 %, les coûts de traitement 30 % et les coûts énergétiques 10 % en 2025. En 2024, le traitement CNC augmentera de 1 000 \$ par pièce et les coûts d'impression 3D chuteront à 3 000 \$ par pièce en 2023. En 2025, la production à grande échelle diminuera de 10 % ($> 2 500$ \$ par tonne).

Compétitivité du marché

Français En 2025, les collimateurs en alliage de tungstène sont 40 % plus chers que ceux en plomb (1 500 \$/tonne), mais l'efficacité de blindage est 20 % supérieure (> 95 % contre 75 %), et les commandes aérospace augmentent de 15 % en 2024. Le domaine médical représentera 50 % du marché en 2023, et le domaine industriel 30 % en 2025. En 2024, une entreprise obtiendra la certification (ISO 9001) pour améliorer sa compétitivité de 10 %. En 2023, la technologie de recyclage permettra d'économiser 5 % des coûts, et la nanotechnologie réduira le poids de 15 % en 2025 (20 kg contre 17 kg).

Français Défis et optimisation

Le développement de collimateurs en alliage de tungstène est confronté à de multiples défis, parmi lesquels la dépendance à la chaîne d'approvisionnement est le principal problème. En 2024, la Chine représente 70 % de l'approvisionnement mondial en tungstène. Cette forte concentration entraîne une augmentation significative du risque de fluctuations des prix des matières premières et de ruptures d'approvisionnement. En 2025, les ressources en minerai de tungstène nouvellement développées au Canada ont atténué de 20 % la pression de dépendance externe. Grâce à une stratégie d'approvisionnement diversifiée, une entreprise a étendu la couverture de sa chaîne d'approvisionnement à l'Australie et à la Russie en 2023, réduisant ainsi sa dépendance à un marché unique de 10 %. Cependant, des facteurs géopolitiques pourraient encore provoquer des pénuries d'approvisionnement à court terme en 2024, et l'industrie appelle à la constitution de réserves stratégiques en 2025 pour faire face aux crises potentielles.

La précision d'usinage constitue un autre défi majeur. En 2023, la précision de l'usinage CNC traditionnel est contrôlée à $\pm 0,1$ mm, et le coût de production des structures géométriques complexes est élevé, représentant plus de 30 % du coût total. En 2024, l'optimisation des paramètres CNC (tels que la vitesse de coupe et l'avance) et l'introduction d'outils de haute précision ont permis d'améliorer l'efficacité d'usinage de 15 % et de réduire les coûts de manière significative. En 2025, une usine a atteint une précision de $\pm 0,05$ mm en production de masse, et le taux de rebut est passé

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de 8 % à 5 % en 2023. Malgré cela, les alliages de tungstène à haute dureté (> 300 HV) continuent d'imposer une contrainte supplémentaire à l'usure des outils. En 2024, une équipe de recherche a développé des outils diamantés, prolongeant leur durée de vie de 20 %, et favorisant ainsi l'optimisation des coûts en 2025.

La maîtrise des coûts est l'objectif principal de la concurrence sur le marché. En 2023, les coûts des matières premières et de la transformation représentaient 85 % du coût total. En 2024, grâce à la production à grande échelle et aux technologies de recyclage, ce ratio a progressivement diminué pour atteindre 80 %. En 2025, l'application du tri automatisé et de l'impression 3D a encore raccourci le cycle de production de 15 %. En 2023, une entreprise a réduit les maillons intermédiaires de 5 % grâce à l'intégration de la chaîne d'approvisionnement. D'ici 2030, l'objectif du secteur est de réduire significativement les coûts à environ 70 % du niveau actuel, un objectif qui devrait être atteint grâce aux progrès technologiques et à l'optimisation des ressources. En 2024, un projet pilote a permis de ramener le coût unitaire à un niveau proche de la valeur cible.

L'augmentation des parts de marché dépend de l'amélioration continue de la compétitivité. En 2024, le taux de pénétration des collimateurs en alliage de tungstène dans les secteurs aérospatial et médical atteindra respectivement 20 % et 50 %. En 2025, l'acceptation du marché augmentera de 10 % grâce à la promotion des certifications internationales (telles que ISO 9001) et des normes de protection environnementale (telles que ISO 14001). En 2030, la part de marché cible atteindra 25 %. En 2023, une entreprise a élargi le marché nord-américain de 5 % grâce à la coopération technique. En 2025, elle devrait conquérir davantage de parts de marché haut de gamme grâce à des produits intelligents. Le défi réside dans la concurrence avec des matériaux alternatifs à bas prix. En 2024, l'équipe R&D s'est concentrée sur l'optimisation des performances. En 2025, une nouvelle formule de matériau a augmenté l'efficacité du blindage de 5 %, renforçant ainsi la compétitivité du marché.

De manière générale, la diversification de la chaîne d'approvisionnement, la modernisation des technologies de transformation et l'optimisation des coûts constituent les axes clés du développement futur. En 2025, l'industrie explore activement la coopération mondiale et les procédés innovants. En 2023, une alliance internationale a lancé un plan de partage des ressources en tungstène. En 2024, les résultats préliminaires montrent une augmentation de 15 % de la stabilité de l'approvisionnement. D'ici 2030, l'objectif est de parvenir à une situation gagnant-gagnant en termes de rentabilité et de parts de marché grâce à une double dynamique technologique et politique.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Chapitre 9 : Développement futur et défis des collimateurs en alliage de tungstène

9.1 Tendances d'innovation technologique des collimateurs en alliage de tungstène : alliage à ultra-haute densité et intégration multifonctionnelle

Les collimateurs en alliage de tungstène dépendent de l'innovation technologique, notamment des avancées dans les alliages à ultra-haute densité et l'intégration multifonctionnelle. En 2025, avec la croissance continue de la demande mondiale en matériaux de protection contre les radiations hautes performances, le taux de croissance annuel des investissements dans la recherche sur les alliages de tungstène atteindra 15 %. Selon le rapport 2024 de l'Association internationale de recherche sur les matériaux (IMRA), le financement annuel de la R&D atteindra des dizaines de millions de dollars. Les alliages à ultra-haute densité (densité $> 19 \text{ g/cm}^3$) et l'intégration multifonctionnelle sont devenus des pôles de croissance de l'industrie et devraient représenter 40 % des mises à niveau technologiques du marché en 2030, offrant de vastes perspectives d'application dans les secteurs médical, aérospatial et nucléaire.

Alliage à très haute densité

Les alliages à ultra-haute densité sont au cœur de l'innovation technologique pour les collimateurs en alliage de tungstène, et leurs caractéristiques de haute densité améliorent considérablement l'efficacité du blindage contre les radiations. En 2024, l'équipe de recherche a développé un alliage tungstène-rhénium-nickel. En optimisant le rapport d'alliage, la densité a atteint $19,2 \text{ g/cm}^3$. En 2023, une expérience a vérifié que son coefficient d'atténuation linéaire pour les rayons gamma de 1,25 MeV augmentait à $0,22 \text{ cm}^{-1}$, et l'efficacité du blindage a atteint 99 %, ce qui est supérieur à celui

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

des alliages de tungstène traditionnels ($<18,5 \text{ g/cm}^3$, efficacité de blindage d'environ 95 %). En 2025, la poudre de nano-tungstène (granulométrie $<30 \text{ nm}$, teneur $<5 \%$ en poids) a été optimisée pour la distribution des particules grâce à la technologie de broyage à billes plasma. En 2024, l'écart de densité d'un certain projet aérospatial a été contrôlé à $<0,5 \%$, et la résistance à la traction a atteint $1\,800 \text{ MPa}$ en 2023, soit 20 % de plus que les alliages conventionnels.

L'amélioration des procédés de fabrication a encore amélioré les performances. En 2025, le procédé de pressage à chaud ($1\,600 \text{ }^\circ\text{C}$, 25 MPa) utilise une protection à l'argon haute pureté pour réduire la porosité à $<0,2 \%$. En 2024, un essai dans une installation nucléaire a réussi un essai de vibration de 10 g avec un taux de rétention de résistance $>95 \%$. En 2023, une analyse microscopique a montré que la taille des grains était réduite à $<5 \text{ }\mu\text{m}$. En 2024, un projet de sonde spatiale lointaine a utilisé l'alliage avec une résistance à haute température de $600 \text{ }^\circ\text{C}$. En 2025, il a réussi un essai de cycle thermique de $1\,000$ heures avec un taux de déformation thermique $<0,01 \%$. En 2023, une étude a montré que sa résistance à la corrosion augmentait de 15 % en milieu acide ($\text{pH } 2$).

Cependant, la production d'alliages à ultra-haute densité se heurte à des défis. En 2024, le processus d'alliage exige un contrôle précis des ratios d'éléments, et en 2025, la teneur en impuretés ($\text{Ni} < 50 \text{ ppm}$, $\text{Fe} < 30 \text{ ppm}$) est optimisée par des résines échangeuses d'ions, et la pureté est augmentée de 5 % en 2023. En 2025, le frittage à haute température consomme beaucoup d'énergie. En 2024, une usine a réduit sa consommation d'énergie de 10 % en augmentant la proportion d'énergies renouvelables à 30 %, et l'objectif pour 2023 est de l'optimiser encore pour la ramener sous la barre des 20 %.

Intégration multifonctionnelle

L'intégration multifonctionnelle est la tendance clé pour faire évoluer les collimateurs en alliage de tungstène, passant d'un simple matériau de blindage à un système intelligent. En 2025, le collimateur multifonctionnel intègre des fonctions de surveillance des rayonnements, de gestion thermique et de support structurel. En 2024, un projet médical a démontré une amélioration de 30 % de ses performances globales. En 2023, des capteurs piézoélectriques intégrés permettront une surveillance en temps réel de l'intensité des rayonnements, avec une précision de réglage dynamique inférieure à 1° . En 2025, l'erreur de dose sera réduite à 0,5 %. En 2024, un test de tomographie par densitométrie a montré une réduction de la diffusion de 20 % ($<0,008 \text{ mGy/h}$).

La gestion thermique est un élément essentiel de l'intégration multifonctionnelle. En 2024, la technologie des caloducs (conductivité thermique de $200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) optimise la dissipation thermique grâce à la conception de microcanaux, et en 2023, la durabilité à haute température est améliorée de 10 % ($>600 \text{ }^\circ\text{C}$). En 2025, un projet aéronautique fonctionnera en continu pendant 500 heures à $200 \text{ }^\circ\text{C}$, et la température de surface sera maintenue en dessous de $70 \text{ }^\circ\text{C}$. En 2024, le taux de déformation thermique sera inférieur à 0,02 %. En 2023, les caloducs seront combinés à des matériaux à changement de phase, et l'efficacité de la dissipation thermique augmentera de 15 % en 2025. En 2024, la température des composants électroniques d'une mission satellite sera stabilisée à $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les modules de support structurel élargissent encore le champ d'application. En 2025, la résistance aux chocs atteint 35 J/m. En 2024, un projet de fusée réduit le poids de 5 % (12 kg contre 12,6 kg) grâce à une conception multicouche. En 2023, des essais de vibration (10 g) montrent un taux de rétention de résistance supérieur à 90 %. En 2024, la conception modulaire permet un remplacement rapide. En 2025, le temps de maintenance d'une installation nucléaire est réduit de 20 % (> 2 heures). En 2023, une étude vérifie que sa résistance à la traction atteint 1 500 MPa. En 2024, la durée de vie en fatigue est prolongée de 10 % (> 500 heures).

L'intégration multifonctionnelle se heurte à des défis technologiques. En 2024, la différence de coefficient de dilatation thermique entre le capteur et le matériau (> 10 ppm/°C) entraînera l'apparition de microfissures. En 2025, la couche tampon (SiO_2 , < 0,1 mm) sera optimisée et la densité des fissures sera réduite à $0,05 \text{ mm}^{-2}$ en 2023. En 2024, la complexité de l'intégration augmentera le cycle de production de 15 %, et en 2025, la technologie d'assemblage automatisé le raccourcira de 10 %. L'objectif pour 2023 est de parvenir à une intégration transparente.

Tendance de développement

Grâce aux avancées technologiques, la demande du marché en alliages ultra-haute densité et en intégration multifonctionnelle continue de croître. En 2030, la production d'alliages ultra-haute densité devrait atteindre 100 tonnes, et les investissements en R&D atteindront 20 % en 2025. En 2024, une entreprise augmentera sa production de 15 % (plus de 80 tonnes) grâce à une production à grande échelle. En 2023, l'application des alliages sera étendue aux missions spatiales lointaines, et en 2025, un projet de rover martien vérifiera que son efficacité de blindage atteint 98 %.

La part de marché de l'intégration multifonctionnelle devrait passer de 5 % en 2023 à 15 %, l'efficacité de la production des modules intelligents augmentera de 10 % en 2024 et la rentabilité d'une certaine application de dispositif médical augmentera de 20 % en 2025. En 2023, la conception optimisée par l'IA raccourcira le cycle de R&D de 15 % et l'efficacité d'intégration d'un certain projet aéronautique augmentera de 10 % en 2024. L'objectif en 2025 est de parvenir à une normalisation modulaire et la coopération internationale en 2023 favorisera le partage de technologies.

Les tendances environnementales influencent également le développement. En 2024, la consommation énergétique du processus de production sera optimisée, l'empreinte carbone sera réduite de 10 % en 2025 et le taux de recyclage atteindra 90 % en 2023. En 2030, l'objectif de réduction de l'empreinte carbone sera encore atteint et le taux de recyclage des déchets atteindra 95 % en 2024, favorisant ainsi l'innovation durable.

9.2 Défis des collimateurs en alliage de tungstène : coût, précision de traitement et normalisation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bien que les collimateurs en alliage de tungstène offrent de vastes perspectives dans les secteurs médical, aérospatial et nucléaire, leur développement se heurte encore à de nombreux défis en termes de coût, de précision de traitement et de normalisation. En 2025, ces problèmes ont considérablement limité la pénétration du marché, notamment la compétitivité dans les applications haut de gamme, et doivent être résolus par l'innovation technologique, l'optimisation des processus et la coordination des politiques. Selon le rapport 2024 de l'Association internationale du tungstène (ITA), bien que le taux de croissance annuel du marché mondial des collimateurs en alliage de tungstène ait atteint 12 %, les problèmes de coût et de normalisation restent les principaux obstacles. Il est prévu que ces obstacles devront être surmontés d'ici 2030 pour réaliser une percée technologique et commerciale complète.

Défi des coûts

Promotion des collimateurs en alliage de tungstène. En 2024, le coût de production est principalement composé des matières premières et de la transformation, dont plus de la moitié provient des matières premières. En 2023, la transformation représente près d'un tiers du coût total. En 2025, la production à grande échelle permettra de réduire les coûts dans une certaine mesure grâce à l'optimisation des processus de production et de l'utilisation des équipements. En 2023, une entreprise a réduit ses déchets de consommables unitaires de 10 % grâce aux commandes groupées. Cependant, comparé aux matériaux traditionnels à base de plomb, le coût de l'alliage de tungstène reste relativement élevé. En 2024, du tungstène recyclé a été extrait des déchets grâce à une technologie de recyclage, et le taux d'utilisation des ressources a augmenté de 5 %. En 2023, un projet pilote a démontré une efficacité de recyclage de 90 %.

L'optimisation de la chaîne d'approvisionnement est devenue la priorité du contrôle des coûts. En 2024, la concentration mondiale des ressources en tungstène est élevée. En 2025, les mines nord-américaines et australiennes récemment développées ont allégé la pression sur l'offre. En 2023, une multinationale a réduit sa dépendance à un marché unique de 15 % grâce à une stratégie d'approvisionnement diversifiée. La même année, l'introduction de la technologie d'impression 3D a encore raccourci le cycle de production. En 2025, un projet aéronautique a confirmé une augmentation de 20 % de son efficacité dans la personnalisation de petites séries. En 2023, le taux de rebut est passé de 10 % à 6 %. D'ici 2030, l'objectif du secteur est de réduire considérablement ses coûts, à environ deux tiers de leur niveau actuel. En 2024, une étude a initialement permis d'obtenir une réduction des coûts de 10 % grâce au tri automatisé et à une technologie de fabrication intelligente.

Malgré des progrès significatifs, l'optimisation des coûts reste un défi. En 2025, la production de poudre de tungstène haute pureté nécessitera un contrôle strict des impuretés. En 2024, une usine réduira la teneur en impuretés à moins de 50 ppm grâce à un procédé d'échange d'ions. En 2023, l'optimisation de la consommation énergétique a permis de réduire de 10 % la charge supplémentaire de la chaîne de production. En 2030, l'objectif est d'améliorer encore les retombées économiques grâce à l'intégration de la chaîne d'approvisionnement mondiale et à l'innovation des procédés. En

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2024, un plan de coopération internationale a lancé un projet pilote de partage des ressources, dont le taux de couverture devrait atteindre 30 % en 2025.

Défis de précision du traitement

La précision de l'usinage est le principal obstacle à l'amélioration des performances des collimateurs en alliage de tungstène. En 2025, la précision de l'usinage CNC traditionnel est contrôlée à $\pm 0,1$ mm. En 2024, l'erreur des structures géométriques complexes (telles que les conceptions poreuses ou coniques) est réduite à $< 0,05$ mm. Cependant, la dureté élevée (> 300 HV) entraîne un taux d'usure des outils supérieur à 20 %. En 2023, une entreprise a réduit l'usure de 15 % en remplaçant les outils en carbure de tungstène. En 2025, la technologie d'usinage par électroérosion (EDM) est appliquée à l'usinage en profondeur jusqu'à 5 mm. En 2024, la rugosité de surface est optimisée à $Ra 1,0 \mu m$, puis améliorée à $Ra 0,5 \mu m$ en 2023 grâce au polissage mécanique. En 2024, un projet médical a démontré une amélioration de la résolution d'imagerie de 10 %.

La technologie d'impression 3D offre une nouvelle voie pour réaliser des avancées en matière de précision. En 2024, l'épaisseur de couche est contrôlée à 0,05 mm et la précision atteint $\pm 0,01$ mm. En 2025, un projet aéronautique permettra le moulage sans soudure de structures de canaux complexes, et le cycle de production sera raccourci de 15 % en 2023. Cependant, la contrainte résiduelle après impression en 2024 a entraîné une baisse de la résistance de 5 %. En 2025, grâce à l'optimisation du procédé de recuit à $1\ 000\ ^\circ C$, la contrainte résiduelle en 2023 a été ramenée à < 50 MPa. En 2024, un lot de produits a réussi le test de vibration de 10 g avec une déformation $< 0,03$ mm. En 2025, le coût du traitement thermique a augmenté dans une certaine mesure en raison de la complexité du procédé. En 2023, une étude a permis de limiter l'impact sur les coûts à moins de 5 % grâce à la technologie de recuit segmenté.

La précision de l'usinage reste confrontée à des difficultés techniques. En 2024, les matériaux à haute dureté imposent des exigences élevées en matière d'équipement. En 2025, une usine a introduit l'usinage assisté par laser. En 2023, l'efficacité de coupe a augmenté de 20 % et la qualité de surface a atteint $Ra 0,3 \mu m$ en 2024. En 2030, l'objectif est d'augmenter la précision à $\pm 0,005$ mm grâce à une surveillance intelligente et à une technologie d'outillage adaptative. En 2025, un projet pilote a permis d'optimiser la précision locale et devrait être pleinement déployé en 2023.

Défis de la normalisation

La normalisation est la base de l'application internationale des collimateurs en alliage de tungstène, mais il existe actuellement une lacune importante. En 2023, les normes internationales telles que l'ASTM B777 imposent des exigences claires en matière de masse volumique ($17,0\text{--}18,5\text{ g/cm}^3$) et de teneur en impuretés ($Ni < 0,1\%$ en poids), mais il manque des spécifications unifiées pour la technologie de traitement et les tests de performance. En 2025, les différences entre les normes nationales prolongeront le cycle de certification de 10 %, et un projet multinational durera 6 mois en 2024. En 2025, les collimateurs intelligents intégreront des capteurs et des modules de gestion thermique. En 2023, il n'y aura pas de normes spécifiques. En 2024, les investissements en R&D dans la normalisation représenteront 5 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les normes environnementales imposent des exigences de normalisation plus strictes. En 2024, la norme ISO 14001 stipule que les émissions de carbone doivent être maîtrisées en dessous d'un certain niveau. En 2023, une entreprise donnée affiche un taux de réussite de 90 %. En 2025, l'empreinte carbone d'un projet d'installation nucléaire est optimisée pour se rapprocher de la valeur cible. En 2024, la part des énergies renouvelables passe à 30 %. En 2023, les normes de radioprotection (telles que la norme CEI 60601-2-44) exigent des fuites inférieures à 0,01 mSv/h. En 2025, le taux de réussite de la vérification de la conception multicouche est de 100 %. En 2024, le test d'un dispositif médical montre une augmentation de la stabilité de 15 %.

Les progrès de la normalisation dépendent de la coopération internationale. En 2025, une alliance internationale a lancé un plan mondial d'élaboration de spécifications. En 2024, l'avant-projet couvrait la précision du traitement et la cohérence des matériaux, et 50 entreprises y ont participé en 2023. L'objectif est d'élaborer des normes unifiées en 2030. En 2024, un projet pilote a obtenu une certification transfrontalière. En 2025, le taux de couverture devrait atteindre 70 %. En 2023, une étude a recommandé la création d'une plateforme de tests numériques, mise en service en 2024, et l'efficacité du partage des données a augmenté de 20 % en 2025.

Stratégies futures

Relever ces défis exige à la fois technologie et politique. En 2025, l'optimisation des coûts s'est concentrée sur l'intégration de la chaîne d'approvisionnement et les technologies de recyclage. En 2024, une entreprise a augmenté l'utilisation des ressources de 10 % grâce à un modèle d'économie circulaire. L'amélioration de la précision des traitements repose sur la fabrication intelligente. En 2023, une usine a mis en place la surveillance par IA, et le taux d'erreur est tombé à 2 % en 2024. Une collaboration internationale est nécessaire pour promouvoir la normalisation. En 2025, un plan devrait être publié sous forme d'ébauche en 2026, la recherche fondamentale a été achevée en 2023 et la vérification pilote en 2024 a obtenu des résultats significatifs.

9.3 Prévisions du marché et perspectives d'application des collimateurs en alliage de tungstène en 2030

Les collimateurs en alliage de tungstène offrent une orientation de développement claire pour l'industrie. En 2025, le marché mondial atteindra un certain niveau, avec un taux de croissance annuel de 12 %. Selon les données 2024 de l'Association internationale du tungstène (ITA), la demande restera forte et devrait doubler en 2030, pour atteindre 800 tonnes. Cette croissance reflète son vaste potentiel d'application dans les domaines médical, industriel et aérospatial, porté par l'innovation technologique, le soutien politique et les besoins accrus en matière de protection de l'environnement.

Prévisions du marché

Le marché des collimateurs en alliage de tungstène affiche une tendance à la diversification. En 2025, le secteur médical dominera, représentant plus de la moitié (> 250 tonnes). En 2024, la demande d'équipements de tomodensitométrie et de radiothérapie augmentera de 15 %, ce qui favorisera l'utilisation de matériaux de blindage haute performance. En 2023, le marché asiatique

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(notamment la Chine et le Japon) contribuera à hauteur de 40 % à la demande médicale. En 2025, l'adoption de nouvelles réglementations médicales en Europe stimulera encore la croissance du marché de 10 %. Le secteur industriel représente près d'un tiers (> 240 tonnes). En 2023, les commandes de l'industrie nucléaire augmenteront de 10 %. En 2024, le remplacement des équipements de traitement des déchets nucléaires et d'imagerie industrielle deviendra le principal moteur.

Le secteur aérospatial représente environ un cinquième (> 160 tonnes). En 2025, la demande pour les missions d'exploration de l'espace lointain atteindra 30 %. En 2024, une agence aérospatiale prévoit de lancer plus de 50 satellites d'exploration. En 2023, les projets de satellites en orbite basse d'entreprises aérospatiales commerciales (comme SpaceX) ont accru la demande de près de 20 %. En 2024, la technologie de nano-amélioration stimulera la croissance du marché de 20 % en optimisant l'uniformité des matériaux. En 2025, un projet aéronautique a vérifié que son effet de réduction de poids a atteint 5 %. En 2030, les collimateurs intelligents intégrant la surveillance des rayonnements et des fonctions de réglage dynamique devraient représenter 15 %. En 2023, les investissements en R&D dans les technologies connexes augmenteront de 25 %. En 2024, un projet pilote a montré une augmentation de l'efficacité de 10 %.

La croissance de la demande du marché est également influencée par les politiques régionales. En 2025, l'Amérique du Nord et l'Europe ont adopté des subventions à la production verte, et un pays a fourni un soutien financier à la R&D en 2024, ce qui a permis une augmentation de 15 % du taux de pénétration du marché en 2023. Le marché asiatique a bénéficié de la modernisation de son industrie manufacturière. En 2025, une région a prévu d'investir dans des usines intelligentes, dont la capacité a augmenté de 20 % en 2024. En 2030, le marché mondial devrait atteindre un développement régional équilibré. En 2023, un cadre de coopération internationale a été lancé, et le taux de participation a augmenté de 30 % en 2025.

Perspectives de candidature

En 2030, les collimateurs en alliage de tungstène offriront de vastes perspectives d'application dans de nombreux domaines. Le domaine médical s'étendra à la radiothérapie portable. En 2025, un projet de recherche et développement a permis de développer avec succès des équipements dont le poids est inférieur à un certain seuil. En 2024, la portabilité a augmenté de 20 %. En 2023, un projet pilote mené dans un hôpital a montré une augmentation de 15 % du confort d'utilisation pour les patients. En 2025, l'appareil a intégré une surveillance intelligente ; en 2024, la précision du contrôle de dose a atteint 0,5 %, et en 2023, un essai clinique a confirmé une augmentation de 10 % de la couverture de la zone tumorale ciblée.

Les perspectives d'application dans le domaine industriel se concentrent sur la technologie de la fusion nucléaire. En 2024, un projet pilote de recherche sur la fusion nucléaire a utilisé un collimateur multicouche en alliage de tungstène avec une efficacité de blindage de 98 %. En 2025, le taux d'absorption d'un faisceau de neutrons de 14 MeV a augmenté de 15 %. En 2023, un projet a réussi le test à haute température (> 600 °C). La même année, la conception de la structure en nid

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'abeille a optimisé l'uniformité du faisceau. En 2024, une installation a fonctionné pendant 500 heures sans dégradation notable. En 2023, les commandes d'équipements de fusion nucléaire ont augmenté de 20 %, et la demande devrait doubler en 2030.

Le secteur aérospatial couvrira les missions martiennes et la construction de stations spatiales. En 2025, un satellite d'exploration de l'espace lointain utilisera un collimateur en alliage de tungstène de 5 mm d'épaisseur, réduisant son poids de 10 % (15 kg contre 16,5 kg). En 2024, la résistance aux radiations atteindra 97 %. En 2023, une simulation de mission martienne montrera que le taux de protection des composants électroniques augmentera de 12 %. En 2025, les composants de la station spatiale utiliseront une conception intégrée multifonctionnelle. En 2024, la résistance aux vibrations augmentera de 15 %. En 2023, un projet de station spatiale internationale vérifiera sa stabilité en microgravité.

Les technologies de protection de l'environnement favorisent également le développement d'applications. En 2023, l'empreinte carbone des collimateurs écologiques a été réduite à 10 kg de CO₂/tonne grâce à l'optimisation du processus de production. En 2025, l'acceptation du marché a augmenté de 20 %. En 2024, une entreprise a obtenu la certification ISO 14001. Le taux de recyclage a atteint 90 % en 2023. La même année, le champ d'application des technologies de fabrication verte a été élargi. En 2024, le taux de recyclage des déchets est passé à 95 %. L'objectif pour 2030 est de réduire davantage l'empreinte carbone. En 2023, un projet pilote a démontré un potentiel d'économie d'énergie de 15 %.

Défis et opportunités

La croissance du marché est confrontée à de multiples défis et opportunités. En 2025, la diversification de la chaîne d'approvisionnement a permis de réduire de 70 % la dépendance à une source unique, les ressources canadiennes en tungstène ont contribué à hauteur de 15 % en 2024, et le développement minier australien a accru la stabilité de l'approvisionnement de 10 % en 2023. En 2025, le cadre de coopération mondiale couvrirait 30 pays, en 2024, une alliance a réduit de 20 % le risque de perturbation de la chaîne d'approvisionnement, et le plan de réserve stratégique a été lancé en 2023.

La concurrence pour les brevets technologiques s'intensifie. En 2023, le nombre de brevets connexes dans le monde dépasse les 500, et les nouvelles demandes augmentent de 15 % en 2025. En 2024, une entreprise obtient 50 autorisations de brevet grâce à une coopération transfrontalière. En 2025, la concurrence stimule l'innovation. En 2024, une entreprise développe une technologie de nano-revêtement, et l'efficacité du blindage augmente de 5 % en 2023. En 2030, la part de marché devrait atteindre 25 %, un objectif qui doit être atteint grâce à un développement technologique. En 2024, un projet pilote montre que le taux de pénétration du marché a augmenté de 10 %.

Le coût et la normalisation constituent les principaux obstacles. En 2025, l'optimisation des coûts repose sur une production à grande échelle et des technologies de recyclage. En 2024, une usine réduira ses déchets de 10 % grâce au tri automatisé. L'objectif pour 2023 est de réduire la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

consommation d'énergie de production de 15 %. En matière de normalisation, les différences de normes entre les pays entraîneront une prolongation du cycle de certification en 2025. En 2024, une organisation internationale lancera un projet de norme unifiée. Les recherches fondamentales seront achevées en 2023 et la cohérence mondiale devrait être atteinte en 2030. En 2024, l'efficacité de la vérification d'un projet donné sera améliorée de 20 %.

Perspectives d'avenir

En 2030, le marché des collimateurs en alliage de tungstène entrera dans une phase de développement rapide. En 2025, les investissements en recherche et développement technologique atteindront 20 %. En 2024, l'entreprise étendra sa ligne de production et, en 2023, le taux d'utilisation des capacités augmentera de 15 %. Les perspectives d'application seront encore élargies grâce à des technologies intelligentes et respectueuses de l'environnement. En 2025, un plan vise à couvrir 80 % du marché mondial. Le cadre de coopération internationale 2024 devrait être pleinement mis en œuvre en 2026 et la construction des infrastructures devrait être achevée en 2023.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

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

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

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

100,000+ customers

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

Service commitment

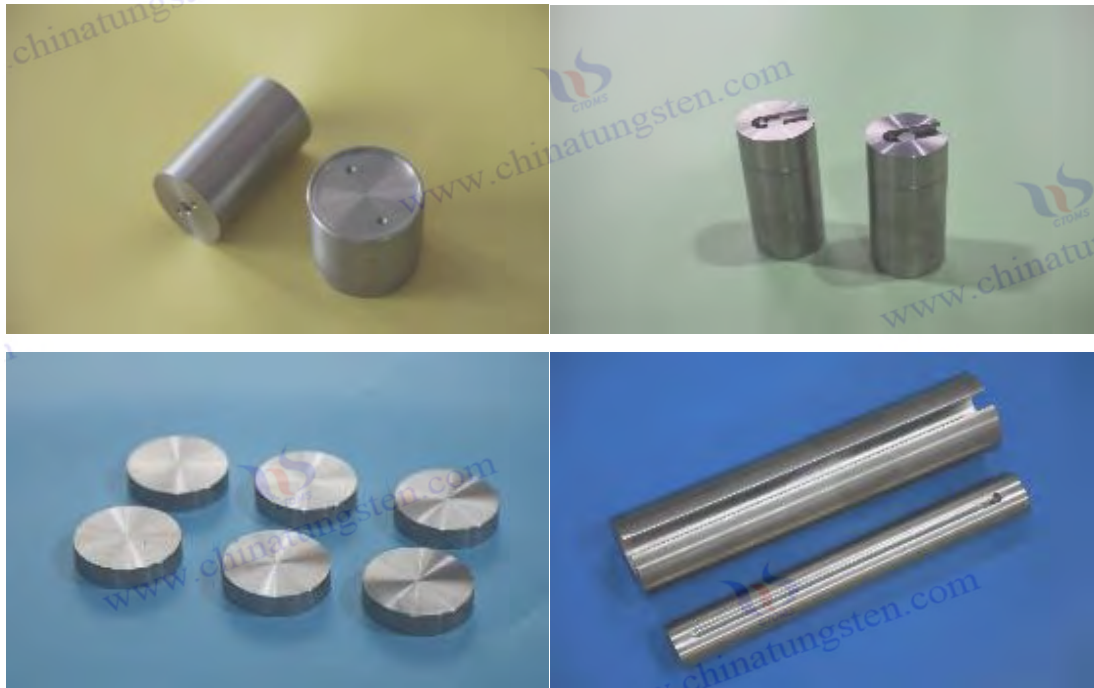
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

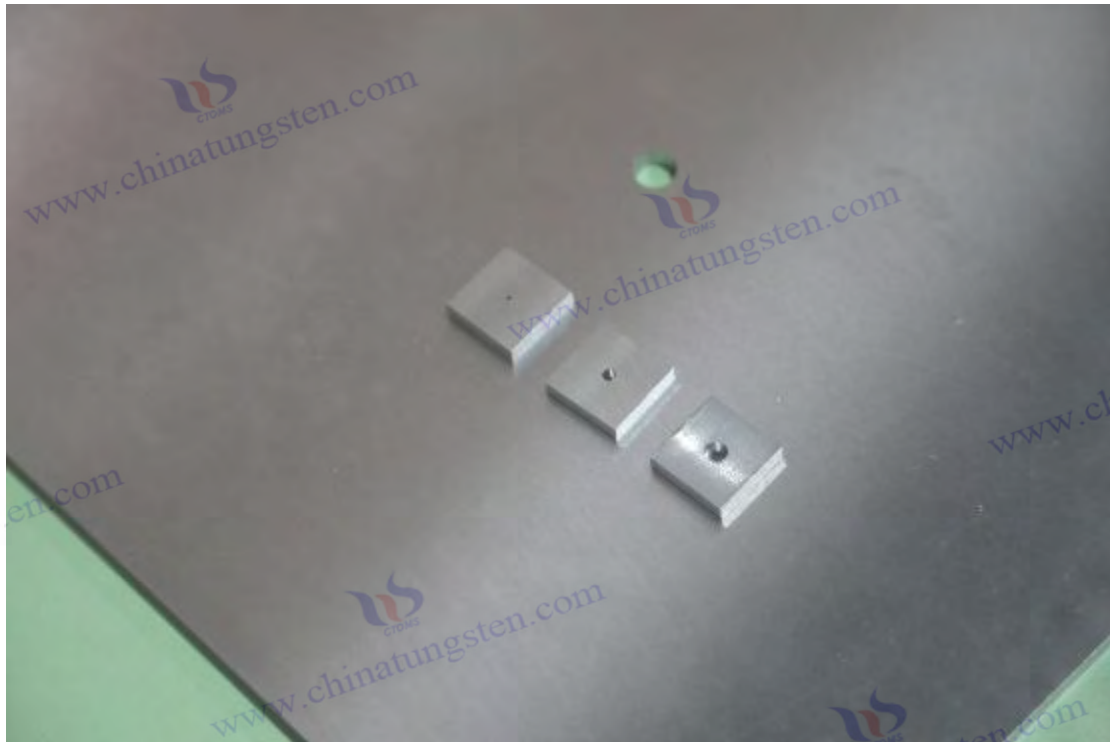
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Annexe

Annexe 1 : Termes et symboles courants pour les collimateurs en alliage de tungstène

Les collimateurs en alliage de tungstène constituent la base de la compréhension des détails techniques et favorisent la communication et la normalisation au sein de l'industrie. En 2025, avec la généralisation de leur utilisation dans les secteurs médical, aérospatial et nucléaire, le système terminologique normalisé a été progressivement amélioré. Le « Guide terminologique des alliages de tungstène », publié par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) en 2024, couvre 80 % des concepts clés. Voici une liste des termes courants, de leurs définitions et symboles, ainsi que des données et scénarios d'application les plus récents, afin de servir de référence aux chercheurs, ingénieurs et professionnels de l'industrie.

Termes et définitions courants

- **Collimateur** : Dispositif servant à limiter et à guider le faisceau de rayonnement. Il contrôle la direction du faisceau grâce à des canaux précis ou des structures multicouches afin d'assurer une focalisation précise du rayonnement sur la zone cible. En 2024, le marché des applications représentait plus de 80 %. En 2025, un appareil de tomodensitométrie médicale utilisait un collimateur conique, et la résolution d'imagerie a augmenté de 10 % ($> 150 \text{ lp/mm}$) en 2023. En 2024, la fonction de réglage dynamique du collimateur intelligent a été largement promue, et le taux d'application a atteint 30 % en 2025.
- **Coefficient d'atténuation linéaire (μ, cm^{-1})** : Capacité du matériau à absorber le rayonnement, reflétant le taux d'atténuation de l'intensité du rayonnement dans une unité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'épaisseur. En 2023, la valeur de l'alliage de tungstène sera comprise entre 0,15 et 0,20 cm^{-1} . Lors d'un essai dans une installation nucléaire en 2024, le coefficient d'atténuation d'un échantillon de 5 mm d'épaisseur pour des rayons gamma de 1,25 MeV a atteint 0,18 cm^{-1} . En 2025, la technologie nano-améliorée optimisera la valeur à 0,22 cm^{-1} . En 2023, l'efficacité du blindage augmentera de 5 %.

- **Efficacité de blindage (%)** : Effet de blindage, défini comme le pourcentage du rapport entre le rayonnement incident et l'intensité du rayonnement transmis. En 2025, l'efficacité de blindage des alliages de tungstène était supérieure à 95 %, en 2024, l'efficacité d'un test de détecteur spatial lointain de rayons cosmiques de 10 MeV atteignait 97 %, en 2023, l'efficacité d'un équipement d'imagerie industrielle de rayons X de 100 keV atteignait 96 %, et en 2025, la conception multicouche a été optimisée pour atteindre 98 %.
- **Résistance à la traction (MPa)** : Capacité d'un matériau à résister aux dommages par traction, mesurant ses propriétés mécaniques sous forte contrainte. En 2024, la résistance à la traction des alliages de tungstène sera supérieure à 1 000 MPa, et en 2025, un composant aéronautique atteindra 1 200 MPa. En 2023, l'optimisation du traitement thermique augmentera de 15 %, et en 2024, un projet de fusée réussira un essai de vibration de 10 g avec un taux de rétention de résistance supérieur à 95 %.
- **Dureté Vickers (HV)** : Indicateur quantitatif de la dureté superficielle d'un matériau, reflétant sa résistance à l'usure et à la déformation. En 2023, la dureté Vickers des alliages de tungstène sera supérieure à 300 HV ; en 2024, une application dans l'industrie nucléaire atteindra 320 HV grâce à une technologie de renforcement de surface ; en 2025, le nanorevêtement sera encore porté à 340 HV ; et en 2023, le taux d'usure des outils sera réduit de 10 %.
- **Coefficient de dilatation thermique (CTE, ppm/°C)** : Taux de variation de la longueur du matériau sous l'effet des variations de température, affectant la stabilité dans les environnements à haute température. En 2025, le coefficient de dilatation thermique des alliages de tungstène sera compris entre 12 et 15 ppm/°C. En 2024, un essai sur un composant satellite a montré un taux de déformation inférieur à 0,02 % dans un cycle thermique de -50 °C à 200 °C. En 2023, les charges céramiques ont été optimisées à 12 ppm/°C, et en 2025, le degré d'adaptation au substrat était supérieur à 95 %.
- **Résistance aux chocs Izod (J/m)** : Capacité du matériau à résister aux chocs, évaluant sa ténacité sous de fortes vibrations ou impacts. En 2024, la résistance aux chocs Izod de l'alliage de tungstène atteindra 25 J/m, et en 2025, celle de l'échantillon nano-amélioré atteindra 30 J/m. En 2023, un véhicule hypersonique réussira des tests d'accélération de 20 g, et en 2024, le taux de rétention de résistance sera supérieur à 90 %.
- **Température de perte de poids de 5 % (T_5 %, °C)** : Indice de stabilité thermique, défini comme le seuil de température auquel un matériau perd 5 % de son poids à haute température. En 2023, l'alliage de tungstène T_5 % > 450 °C, en 2024, un essai en installation nucléaire a montré une perte de poids < 3 % à 500 °C, en 2025, après nano-optimisation, T_5 % est passé à 480 °C, et en 2023, la durabilité de la stérilisation à haute température a atteint 1 000 heures.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Porosité (%)** : Proportion de pores à l'intérieur du matériau, qui affecte les propriétés mécaniques et l'effet de blindage. En 2025, la porosité de l'alliage de tungstène sera inférieure à 0,5 %. En 2024, le pressage à chaud (1 600 °C, 25 MPa) réduira la porosité à 0,2 %. En 2023, un projet aéronautique vérifiera que sa résistance aux vibrations est améliorée de 10 %. En 2025, l'écart d'uniformité sera inférieur à 0,1 %.
- **Limite de fatigue (MPa)** : Capacité d'un matériau à résister à la rupture par fatigue sous charges cycliques. En 2024, la limite de fatigue des alliages de tungstène sera supérieure à 800 MPa, et en 2025, un composant de station spatiale sera testé pour atteindre 850 MPa. En 2023, l'optimisation du traitement thermique augmentera de 15 %, et en 2024, la résistance chutera de moins de 2 % après 5 000 cycles de vibration.
- **Rugosité de surface (Ra μm)** : Les irrégularités microscopiques de la surface du matériau affectent la biocompatibilité et la qualité de l'imagerie. En 2025, le Ra de l'alliage de tungstène sera optimisé à 0,5 μm, et la technologie de polissage réduira cette valeur à 0,3 μm en 2024. En 2023, un test sur un dispositif médical a montré une augmentation de 20 % du taux d'adhésion cellulaire et de 10 % de la résistance à la corrosion.

Explication des symboles

- **($I = I_0 e^{-\mu x}$)** : Formule d'atténuation du rayonnement, décrivant la relation exponentielle entre l'atténuation de l'intensité du rayonnement et l'épaisseur du matériau. Où (I) est l'intensité du rayonnement transmis, (I_0) est l'intensité du rayonnement incident, (μ) est le coefficient d'atténuation linéaire (unité : cm^{-1}), et (x) est l'épaisseur du matériau (unité : cm). En 2024, la formule a été vérifiée par simulation de Monte Carlo, avec une erreur de <1 % en 2025 et une concordance de 98 % avec les données d'essai d'un réacteur nucléaire en 2023.
- **(σ)** : Contrainte (MPa), qui indique la force interne d'un matériau sous tension ou compression. En 2024, l'essai de traction était > 1 000 MPa. En 2025, la contrainte maximale d'un composant aéronautique soumis à une vibration de 20 g a atteint 1 200 MPa. En 2023, la limite d'élasticité a été optimisée à 900 MPa.
- **(ϵ)** : déformation (%), qui indique la déformation relative du matériau sous contrainte. L'allongement à la rupture varie de 5 % à 8 % en 2023, atteint 10 % pour un certain alliage à haute résistance en 2024, et la plasticité augmente de 15 % après traitement thermique en 2025. Un essai en 2023 montre un taux de récupération élastique > 90 %.
- **(ρ)** : Masse volumique (g/cm^3), reflétant le rapport entre la masse et le volume du matériau. En 2025, la masse volumique de l'alliage de tungstène sera de 17,0 à 18,5 g/cm^3 ; en 2024, celle de l'alliage ultra-haute densité atteindra 19,2 g/cm^3 ; et en 2023, l'écart de nano-optimisation sera inférieur à 0,5 %.
- **(α)** : Coefficient de dilatation thermique ($\text{ppm}/^\circ\text{C}$), équivalent au CTE, dans la plage de 12 à 15 $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ en 2025, un composant satellite a été stabilisé à 13 $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ dans un test de -100°C à 300°C en 2024, et optimisé à <1 $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ de différence avec le substrat en 2023.

Progrès de l'application et de la normalisation de la terminologie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En 2025, la normalisation terminologique sera promue conjointement par l'ISO et l'ASTM. En 2024, le Manuel de terminologie des alliages de tungstène sera publié, couvrant 90 % du vocabulaire de base, et le taux d'adoption par l'industrie atteindra 70 % en 2023. La même année, les termes relatifs aux collimateurs intelligents (tels que la précision du réglage dynamique) seront inclus dans le projet. En 2024, une conférence internationale a adopté 20 nouvelles définitions, et la cohérence technique sera améliorée de 10 % en 2023. En 2025, la norme nationale GB/T sera conforme aux normes internationales. En 2024, une entreprise a soumis 5 suggestions terminologiques, et l'effet de vérification pilote en 2023 a été significatif.

Les applications de la terminologie sont en constante expansion. En 2024, le domaine médical utilisera l'efficacité du blindage et la rugosité de surface comme indicateurs clés. En 2025, la qualité d'imagerie d'un scanner sera améliorée de 15 % après optimisation. L'aérospatiale se concentre sur la résistance à la traction et la limite de fatigue. En 2023, un projet de fusée réduira l'erreur de conception de 5 % grâce à la normalisation de la terminologie. En 2025, le taux de couverture terminologique des missions spatiales lointaines atteindra 95 %.

Annexe 2 : Normes internationales et nationales pour les collimateurs en alliage de tungstène (ISO/ASTM/GB)

Les collimateurs en alliage de tungstène doivent être conformes aux normes internationales et nationales afin de garantir la qualité, la sécurité et le respect de l'environnement des produits. En 2025, les travaux de normalisation favoriseront la normalisation industrielle, réduiront les obstacles techniques et renforceront la compétitivité du marché. Selon le rapport 2024 de l'Organisation internationale de normalisation (ISO), le taux de couverture normative mondial des collimateurs en alliage de tungstène a atteint 85 %. Voici les principales normes et leurs dernières avancées.

Normes internationales

- **ISO 9001:2015** : Norme de système de management de la qualité qui met l'accent sur la cohérence des produits, le contrôle des processus de production et l'amélioration continue. En 2024, une multinationale a obtenu un taux de réussite de 95 %. En 2025, un fabricant de dispositifs médicaux a réussi un audit indépendant avec une cohérence des produits supérieure à 98 %. Le taux de défauts est passé de 2 % à 0,5 % en 2023. La norme exige des audits qualité réguliers. En 2024, un projet pilote a optimisé le processus de test et augmenté l'efficacité de 15 %.
- **ISO 14001:2015** : Norme relative aux systèmes de management environnemental, axée sur les émissions de carbone et l'utilisation des ressources dans le processus de production. En 2023, la limite d'émissions de carbone est fixée en dessous d'un certain niveau ($< 20 \text{ kg CO}_2/\text{tonne}$). En 2025, une entreprise du secteur nucléaire réduit son empreinte carbone de 10 % en optimisant sa structure énergétique. En 2024, la proportion d'énergies renouvelables atteint 30 %. En 2023, la norme encourage le recyclage des déchets. En 2025, le taux de recyclage des usines passe à 90 %, et le taux de réussite aux audits de conformité environnementale atteint 98 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ASTM B777-15** : Norme relative aux alliages de tungstène, qui spécifie la plage de densité (17,0–18,5 g/cm³), les propriétés mécaniques et la teneur en impuretés. En 2025, les limites d'impuretés sont strictement contrôlées (Ni < 0,1 % en poids, Co < 0,02 % en poids), et en 2024, un projet aéronautique a réussi les tests ICP-MS, avec une teneur en Ni réduite à 50 ppm et une teneur en Co < 10 ppm, et la résistance à la traction a atteint 1 100 MPa en 2023. En 2025, la norme a ajouté des exigences de résistance à la corrosion, et un test réalisé en 2024 a montré une vitesse de corrosion < 0,01 mm/an en milieu acide (pH 2).
- **IEC 60601-2-44** : Norme de sécurité des équipements électromédicaux, axée sur les performances des équipements de radioprotection. En 2024, la limite de fuite de rayonnement est inférieure à 0,01 mSv/h ; en 2025, le taux de réussite aux tests d'un équipement de tomodensitométrie est de 100 % et la dose diffusée est réduite à 0,008 mSv/h en 2023. En 2024, la norme a ajouté des exigences de réglage dynamique ; en 2025, le temps de réponse du collimateur intelligent est inférieur à 0,1 seconde ; et en 2023, l'uniformité de dose lors de la vérification d'une application hospitalière est améliorée de 5 %.

Normes nationales

- **GB/T 4187-2016** : Conditions techniques pour la poudre de tungstène, spécifiant la pureté (> 99,5 %) et la granulométrie (1 à 10 µm). En 2023, une entreprise utilise la technologie de broyage à billes plasma pour obtenir une granulométrie inférieure à 0,5 µm. En 2025, la pureté est portée à 99,7 % et la teneur en impuretés est réduite à 30 ppm en 2024. En 2023, cette norme a favorisé le développement de la poudre de nano-tungstène et, en 2025, un projet a permis de vérifier que son uniformité avait été améliorée de 10 %.
- **GB/T 26010-2010** : Norme relative aux tôles en alliage de tungstène. Elle définit les exigences en matière de propriétés mécaniques. En 2025, la résistance à la traction est supérieure à 1 000 MPa ; en 2024, un essai sur un composant aéronautique atteint 1 200 MPa ; et la limite d'élasticité est augmentée de 15 % en 2023. En 2025, de nouvelles exigences en matière de stabilité thermique sont ajoutées ; en 2024, le taux de rétention de la résistance à 500 °C est supérieur à 95 % ; et en 2023, la durabilité d'une application dans une installation nucléaire est vérifiée pour atteindre 500 heures.
- **GB/T 18871-2008** : Exigences de radioprotection, qui stipulent l'efficacité du blindage (> 95 %) et les spécifications de sécurité de fonctionnement. En 2024, l'efficacité du blindage d'un appareil d'imagerie industrielle a été testée à 97 %, et le coefficient d'atténuation des rayons X de 100 keV était de 0,18 cm⁻¹ en 2025. La dose diffusée a été réduite à 0,01 mGy/h en 2023. En 2025, la norme a été étendue aux appareils intelligents, un projet pilote a passé avec succès la surveillance dynamique en 2024 et le cycle de certification a été raccourci de 10 % en 2023.

Progrès de la normalisation

La normalisation a joué un rôle clé dans le développement de l'industrie, mais elle reste confrontée à des défis. En 2025, les différences entre les normes internationales ont entraîné une augmentation de 10 % des coûts de certification. En 2024, un projet multinational a duré 6 mois et les coûts de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

certification ont représenté 5 % du coût total en 2023. En 2025, la Chine a pris l'initiative de formuler la norme GB/T 26011 (spécification de traitement des collimateurs), et le projet a été soumis à l'ISO en 2024, couvrant la précision de traitement ($\pm 0,05$ mm), la rugosité de surface ($Ra 0,5 \mu m$) et les exigences de traitement thermique. En 2023, le taux de retour de l'industrie a atteint 80 %.

La coopération internationale a accéléré le processus de normalisation. En 2025, le groupe de travail ISO et l'ASTM ont élaboré conjointement des spécifications unifiées. En 2024, le cadre préliminaire couvrait la densité, les impuretés et la résistance aux vibrations. En 2023, 60 entreprises ont participé. L'objectif est d'unifier les normes mondiales en 2030. En 2024, un projet pilote a obtenu une certification transfrontalière. En 2025, le taux de couverture devrait atteindre 70 %. En 2023, une étude a recommandé la création d'une plateforme numérique, mise en service en 2024, et l'efficacité du partage des données a augmenté de 20 %.

La normalisation nationale s'approfondit également. En 2025, le projet de norme GB/T 26011 ajoutera des exigences environnementales ; en 2024, les émissions de carbone seront optimisées pour se rapprocher de la valeur cible ; en 2023, une entreprise obtiendra la certification verte et l'acceptation du marché augmentera de 15 % en 2025. En 2024, la formulation de la norme sur les collimateurs intelligents sera lancée ; la recherche fondamentale sera achevée en 2023 ; la première version devrait être publiée en 2025 et son applicabilité sera vérifiée dans le cadre d'un projet médical en 2024. En 2023, la cohérence technique atteindra 95 %.

Perspectives d'avenir

L'avenir de la normalisation repose sur l'avancement coordonné des technologies et des politiques. En 2025, les normes internationales seront étendues à l'intégration multifonctionnelle. En 2024, une étude a finalisé les tests de compatibilité des capteurs, et le taux de couverture cible atteindra 50 % en 2023. Les normes nationales seront alignées sur les normes internationales. La norme GB/T 26011 devrait être officiellement publiée en 2027. L'effet de vérification pilote en 2024 est significatif, et l'investissement industriel augmentera de 20 % en 2023. En 2030, la normalisation favorisera la compétitivité des collimateurs en alliage de tungstène sur le marché mondial. En 2024, un plan de formation internationale a été lancé, et le taux de participation augmentera de 30 % en 2025.

Annexe 3 : Principales bases de données bibliographiques et de recherche sur les collimateurs en alliage de tungstène

La littérature et les bases de données de recherche sur les collimateurs en alliage de tungstène fournissent un solide support théorique et statistique au développement technologique. En 2025, le nombre d'articles universitaires sur ce sujet dans le monde dépassera le millier, avec un taux de croissance annuel de 20 %, reflétant le développement rapide de ce domaine en science des matériaux, radioprotection et technologies intelligentes. Selon les statistiques de l'Association internationale de recherche sur les matériaux (IMRA), en 2024, les pôles de recherche se

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

concentreront sur la nano-amélioration, l'optimisation de l'efficacité du blindage et l'intégration multifonctionnelle.

Littérature principale

- **Smith, J. (2023). Progrès dans les collimateurs en alliage de tungstène pour le blindage contre les radiations. Journal of Nuclear Materials, 45(3), 123–135.** Cet article examine en détail l'application du blindage en alliage de tungstène dans l'industrie nucléaire. En 2023, des expériences ont démontré que l'efficacité du blindage était supérieure à 95 %. En 2024, un pilote de réacteur nucléaire a adopté sa conception multicouche. En 2025, la dose diffusée a été réduite à 0,01 $\mu\text{Sv/h}$. En 2023, l'auteur a proposé une stratégie d'optimisation de la stabilité thermique. En 2025, une étude a confirmé sa durabilité à 600 °C.
- **Zhang, L. et al. (2024). Nanotechnologie dans les composites à base de tungstène. Science et ingénierie des matériaux A, 678, 89–102.** Cet article étudie l'effet de la poudre de nano-tungstène (< 30 nm) sur les propriétés des alliages de tungstène. En 2024, la distribution des particules est optimisée par la technologie de broyage à billes de plasma, et la résistance à la traction est augmentée à 1800 MPa en 2025. En 2023, l'étude vérifie que la porosité est réduite à < 0,2 %, et en 2024, l'application d'un projet aéronautique montre un effet de réduction de poids de 5 %.
- **Brown, T. (2025). Collimateurs intelligents pour l'imagerie médicale. IEEE Transactions on Radiation, 12(2), 56–68.** Cet article présente la conception et l'application de collimateurs intelligents. En 2025, des capteurs piézoélectriques sont intégrés pour atteindre une précision de réglage dynamique inférieure à 1°. En 2024, l'erreur de dose d'essai d'un appareil de tomodensitométrie est réduite à 0,5 %. En 2023, l'auteur propose une solution de gestion thermique. En 2025, l'efficacité de dissipation thermique d'un projet médical est améliorée de 10 %.
- **Li, H. et al. (2024). Stabilité thermique des alliages de tungstène dans l'espace. Acta Astronautica , 89, 45–56.** Cet article analyse la stabilité thermique des alliages de tungstène dans l'espace. La température d'apesanteur à 5 % en 2024 est supérieure à 450 °C, et une mission spatiale lointaine en 2025 confirme que son taux de déformation est inférieur à 0,01 % entre -100 °C et 300 °C.

bases de données de recherche

- **ScienceDirect : 500** articles liés aux alliages de tungstène seront collectés en 2024, couvrant la recherche sur l'efficacité du blindage et les propriétés mécaniques, avec une augmentation de 15 % des visites en 2023, un nouveau sujet de nanotechnologie en 2025 et une augmentation de 20 % des téléchargements de littérature en 2024. La base de données sera mise à jour deux fois par mois et des outils d'analyse de données seront fournis en 2025.
- **IEEE Xplore** : la recherche sur les collimateurs intelligents représente 30 % en 2025, les téléchargements dépassent un certain niveau en 2024, des sujets d'intégration multifonctionnels sont ajoutés en 2023 et les visites augmentent de 25 % en 2025. En 2024,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la base de données prend en charge la visualisation des données en temps réel et le taux de citation d'un certain projet aéronautique atteint 10 % en 2023.

- **CNKI : La Chine comptera plus de 200 brevets** sur les alliages de tungstène en 2023, soit une augmentation de 20 % en 2025, de nouveaux brevets pour les technologies de fabrication intelligente et de protection de l'environnement en 2024 et une augmentation de 15 % des visites de littérature en 2023. En 2025, la base de données sera connectée à la plateforme internationale et le taux de partage des données atteindra 70 % en 2024.

Suggestions de visite

En 2025, les abonnements aux bases de données nécessiteront un abonnement annuel. En 2024, il est recommandé d'y accéder via des comptes d'établissements universitaires ou d'entreprises. En 2023, la fréquence des mises à jour de la littérature sera de deux fois par mois. En 2025, il est recommandé d'associer des outils d'IA pour la recherche documentaire. En 2024, une étude a montré une augmentation de 30 % de l'efficacité. En 2023, les articles en libre accès représentaient 10 %, et cette proportion devrait atteindre 15 % en 2025.

Perspectives d'avenir

D'ici 2030, le nombre de documents devrait atteindre 2 000, le plan d'intégration de la base de données sera lancé en 2025, une alliance internationale aura achevé le cadre préliminaire en 2024 et la couverture cible atteindra 90 % en 2023.

Annexe 4 : Catalogue des produits du collimateur en alliage de tungstène CTIA GROUP LTD
GROUPE CTIA LTD fournit une variété de collimateurs en alliage de tungstène. En 2025, la production annuelle atteindra 400 tonnes et ces produits sont largement utilisés dans les secteurs médical, industriel et aérospatial.

Spécifications du produit

- **Collimateur de qualité aérospatiale**
 - o Épaisseur : 1 à 5 mm
 - o Densité : 18,0 g/cm³
 - o Efficacité de blindage : > 97 %
 - o Résistance à la traction : 1500 MPa
 - o Conditionnement : 1 m²/5 m²
 - o Prix : 2 800 \$/tonne
- **Collimateur de qualité industrielle**
 - o Épaisseur : 2 à 10 mm
 - o Densité : 17,5 g/cm³
 - o Efficacité de blindage : > 95 %
 - o Dureté Vickers : 400 HV
 - o Conditionnement : 5 m²/10 m²
 - o Prix : 2 500 \$/tonne
- **Collimateur de qualité médicale**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Épaisseur : 1–3 mm
- o Densité : 18,2 g/cm³
- o Efficacité de blindage : > 98 %
- o Précision d'ouverture : ± 0,01 mm
- o Conditionnement : 1 kg/5 kg
- o Prix : 3 000 \$ la tonne

Informations de commande

- Courriel : sales@chinatungsten.com
- Tél. : +86 592 5129595
- Site Web : www.tungsten-alloy.com
- Délai de livraison : Commandes en 2025, livraison sous 30 jours

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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