



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com

Encyclopédie du

fil de tungstène résistant aux coupures

CTIA GROUP LTD



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

Global Leader in Intelligent Manufacturing for Tungsten, Molybdenum, and Rare Earth Industries

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 DE CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, une filiale en propriété exclusive dotée d'une personnalité juridique indépendante établie par CHINATUNGSTEN ONLINE, se consacre à la promotion de la conception et de la fabrication intelligentes, intégrées et flexibles de matériaux en tungstène et en molybdène à l'ère de l'Internet industriel. CHINATUNGSTEN ONLINE, fondée en 1997 avec www.chinatungsten.com comme point de départ – le premier site Web de produits en tungstène de premier plan en Chine – est la société de commerce électronique pionnière du pays axée sur les industries du tungstène, du molybdène et des terres rares. S'appuyant sur près de trois décennies d'expérience approfondie dans les domaines du tungstène et du molybdène, CTIA GROUP hérite des capacités exceptionnelles de conception et de fabrication, des services supérieurs et de la réputation commerciale mondiale de sa société mère, devenant ainsi un fournisseur de solutions d'application complètes dans les domaines des produits chimiques à base de tungstène, des métaux de tungstène, des carbures cémentés, des alliages à haute densité, du molybdène et des alliages de molybdène.

Au cours des 30 dernières années, CHINATUNGSTEN ONLINE a créé plus de 200 sites Web professionnels multilingues sur le tungstène et le molybdène couvrant plus de 20 langues, avec plus d'un million de pages d'actualités, de prix et d'analyses de marché liées au tungstène, au molybdène et aux terres rares. Depuis 2013, son compte officiel WeChat « CHINATUNGSTEN ONLINE » a publié plus de 40 000 informations, desservant près de 100 000 abonnés et fournissant quotidiennement des informations gratuites à des centaines de milliers de professionnels de l'industrie dans le monde entier. Avec des milliards de visites cumulatives sur son site Web et son compte officiel, elle est devenue un centre d'information mondial reconnu et faisant autorité pour les industries du tungstène, du molybdène et des terres rares, fournissant des informations multilingues 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7, les performances des produits, les prix du marché et les tendances du marché.

S'appuyant sur la technologie et l'expérience de CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP se concentre sur la satisfaction des besoins personnalisés des clients. À l'aide de la technologie de l'IA, elle conçoit et produit en collaboration des produits en tungstène et en molybdène avec des compositions chimiques et des propriétés physiques spécifiques (telles que la taille des particules, la densité, la dureté, la résistance, les dimensions et les tolérances) avec ses clients. Elle offre des services intégrés complets allant de l'ouverture du moule, de la production d'essai, à la finition, à l'emballage et à la logistique. Au cours des 30 dernières années, CHINATUNGSTEN ONLINE a fourni des services de R&D, de conception et de production pour plus de 500 000 types de produits en tungstène et en molybdène à plus de 130 000 clients dans le monde, jetant ainsi les bases d'une fabrication personnalisée, flexible et intelligente. S'appuyant sur cette base, CTIA GROUP approfondit encore la fabrication intelligente et l'innovation intégrée des matériaux en tungstène et en molybdène à l'ère de l'Internet industriel.

Le Dr Hanns et son équipe de CTIA GROUP, sur la base de leurs plus de 30 ans d'expérience dans l'industrie, ont également rédigé et publié des analyses de connaissances, de technologies, de prix du tungstène et de tendances du marché liées au tungstène, au molybdène et aux terres rares, les partageant librement avec l'industrie du tungstène. Le Dr Han, avec plus de 30 ans d'expérience depuis les années 1990 dans le commerce électronique et le commerce international de produits en tungstène et en molybdène, ainsi que dans la conception et la fabrication de carbures cémentés et d'alliages à haute densité, est un expert renommé dans les produits de tungstène et de molybdène, tant au niveau national qu'international. Adhérant au principe de fournir des informations professionnelles et de haute qualité à l'industrie, l'équipe de CTIA GROUP rédige en permanence des documents de recherche technique, des articles et des rapports sur l'industrie en fonction des pratiques de production et des besoins des clients du marché, ce qui lui vaut de nombreux éloges dans l'industrie. Ces réalisations constituent un soutien solide à l'innovation technologique, à la promotion des produits et aux échanges industriels de CTIA GROUP, ce qui lui permet de devenir un chef de file mondial dans la fabrication de produits en tungstène et en molybdène et les services d'information.



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

CONTENU

Chapitre 1 : Introduction et aperçu

1.1 Présentation

1.1.1 Définition et importance du fil de tungstène résistant aux coupures

1.1.2 Objectif de l'écriture de ce livre et public cible

1.2 Développement historique du fil de tungstène résistant aux coupures

1.2.1 Découverte et premières applications du fil de tungstène

1.2.2 Évolution de la technologie du fil de tungstène résistant aux coupures

1.2.3 Jalons clés et percées technologiques

Chapitre 2 : Fondements de la science des matériaux du fil de tungstène résistant aux coupures

2.1 Propriétés de base du fil de tungstène

2.1.1 Propriétés physiques du fil de tungstène

2.1.2 Propriétés chimiques du fil de tungstène

2.1.3 Propriétés mécaniques du fil de tungstène

2.2 Composition et structure du fil de tungstène résistant aux coupures

2.2.1 Différences entre le fil de tungstène pur et le fil de tungstène allié

2.2.2 Microstructure et structure cristalline

2.2.3 Effets du dopage et de l'alliage sur la performance

2.3 Comparaison du fil de tungstène résistant aux coupures avec d'autres matériaux

2.3.1 Comparaison des performances du fil de tungstène avec du fil d'acier, de la fibre de carbone, etc.

2.3.2 Avantages du fil de tungstène résistant aux coupures dans des applications spécifiques

Chapitre 3 : Processus de fabrication du fil de tungstène résistant aux coupures de CTIA GROUP

3.1 Sélection des matières premières

3.1.1 Extraction et purification du minerai de tungstène

3.1.2 Sélection et rôle des éléments dopants

3.2 Processus de production du fil de tungstène de CTIA GROUP

3.2.1 Méthode de métallurgie des poudres

3.2.2 Processus et équipement de tréfilage

3.2.3 Traitement thermique et processus de recuit

3.3 Contrôle de la qualité et essais du fil de tungstène résistant aux coupures

3.3.1 Surveillance de la qualité pendant la production

3.3.2 Normes et méthodes d'essai pour le fil de tungstène fini

Chapitre 4 : Performances et essais du fil de tungstène résistant aux coupures

4.1 Essais de performance mécanique du fil de tungstène résistant aux coupures

4.1.1 Résistance à la traction et ténacité à la rupture

4.1.2 Essai de dreté

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 4.1.3 Performance en fatigue et durabilité
- 4.2 Résistance à l'usure et résistance à la corrosion du fil de tungstène résistant aux coupures
 - 4.2.1 Mécanismes d'usure et méthodes d'essai
 - 4.2.2 Évaluation du rendement dans les environnements corrosifs
- 4.3 Performance à haute température du fil de tungstène résistant aux coupures
 - 4.3.1 Stabilité thermique et résistance à l'oxydation
 - 4.3.2 Modifications des propriétés mécaniques à haute température

Chapitre 5 : Normes relatives au fil de tungstène résistant aux coupures

- 5.1 Normes internationales
 - 5.1.1 Normes ISO
 - 5.1.2 Normes ASTM et autres normes internationales
- 5.2 Normes nationales chinoises et réglementations de l'industrie
 - 5.2.1 Normes GB/T
 - 5.2.2 Règlements et certifications de l'industrie
- 5.3 Tableau récapitulatif des normes relatives aux fils de tungstène résistants aux coupures
- 5.4 Application et perspectives d'avenir des normes

Chapitre 6 : Domaines d'application du fil de tungstène résistant aux coupures

- 6.1 Traitement de la découpe du fil
 - 6.1.1 Usinage par électroérosion (EDM)
 - 6.1.1.1 Rôle central du fil de tungstène résistant aux coupures en tant que fil d'électrode dans l'EDM
 - 6.1.1.2 Avantages de la fabrication de moules de haute précision
 - 6.1.1.3 Études de cas sur le traitement de pièces métalliques de forme complexe
 - 6.1.2 Découpe à la scie à fil diamanté
 - 6.1.2.1 Fil de tungstène comme matériau de base pour les scies à fil diamanté
 - 6.1.2.2 Découpe de haute précision de plaquettes de semi-conducteurs et de plaquettes de silicium photovoltaïque
 - 6.1.2.3 Applications de coupe pour les matériaux durs comme la pierre et la céramique
- 6.2 Composants fonctionnels dans des environnements à haute température
 - 6.2.1 Éléments chauffants dans les fours à haute température
 - 6.2.1.1 Applications du fil de tungstène dans les fours à gaz sous vide ou inerte
 - 6.2.1.2 Durabilité dans les procédés de recuit et de frittage à haute température
 - 6.2.2 Projection thermique et support de soudage
 - 6.2.2.1 Composants en fil de tungstène dans la pulvérisation au plasma
 - 6.2.2.2 Fil d'électrode de tungstène dans le soudage au gaz inerte de tungstène (TIG)
 - 6.2.3 Composants aérospatiaux à haute température
 - 6.2.3.1 Matériaux renforcés de fil de tungstène dans les tuyères de moteurs de fusée
 - 6.2.3.2 Cathodes à fil de tungstène dans les propulseurs électriques
- 6.3 Applications électroniques et électriques
 - 6.3.1 Faisceaux d'électrons et appareils à rayons X
 - 6.3.1.1 Filaments de fil de tungstène dans les microscopes électroniques et les tubes à rayons X

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.3.1.2 Sources à haute température dans le soudage par faisceau d'électrons
- 6.3.2 Équipement d'aspirateur
 - 6.3.2.1 Bateaux d'évaporation en fil de tungstène en dépôt sous vide
 - 6.3.2.2 Sources d'ions en fil de tungstène dans les spectromètres de masse
- 6.3.3 Éclairage et affichage
 - 6.3.3.1 Électrodes en tungstène dans les lampes à décharge à haute intensité (DHI)
 - 6.3.3.2 Filaments de fil de tungstène dans les lampes à incandescence et halogènes
- 6.4 Instruments médicaux et scientifiques
 - 6.4.1 Outils chirurgicaux
 - 6.4.1.1 Électrodes à fil de tungstène en électrochirurgie
 - 6.4.1.2 Couper les fils de haute précision en chirurgie mini-invasive
 - 6.4.2 Instruments d'analyse
 - 6.4.2.1 Détecteurs à fil de tungstène dans les spectromètres de masse
 - 6.4.2.2 Porte-échantillons à fil de tungstène à haute température dans les analyseurs thermogravimétriques
 - 6.4.3 Recherche biomédicale
 - 6.4.3.1 Électrodes à fil de tungstène dans l'électroporation de cellule
 - 6.4.3.2 Les réseaux de microélectrodes en neurosciences
- 6.5 Soutien à la fabrication et à la transformation industrielles
 - 6.5.1 Fabrication des textiles et du papier
 - 6.5.1.1 Guide-fils en tungstène résistant à l'usure dans les machines textiles
 - 6.5.1.2 Composants auxiliaires en fil de tungstène dans les machines à papier
 - 6.5.2 Transformation des aliments
 - 6.5.2.1 Fil de tungstène résistant à la corrosion dans les lignes de découpe d'aliments
 - 6.5.2.2 Éléments chauffants en fil de tungstène dans les équipements de cuisson à haute température
 - 6.5.3 Traitement du verre et de la céramique
 - 6.5.3.1 Fil de tungstène à haute résistance dans la découpe du verre
 - 6.5.3.2 Fil de tungstène pour la coupe et le perçage de substrats céramiques
- 6.6 Énergie et protection de l'environnement
 - 6.6.1 Énergie nucléaire
 - 6.6.1.1 Composants de commande du fil de tungstène dans les réacteurs nucléaires
 - 6.6.1.2 Treillis métallique en tungstène dans le blindage contre les rayonnements
 - 6.6.2 Énergie renouvelable
 - 6.6.2.1 Découpe de fils de tungstène dans la fabrication de cellules solaires
 - 6.6.2.2 Composants en fil de tungstène résistants à l'usure dans les éoliennes
 - 6.6.3 Traitement des déchets
 - 6.6.3.1 Éléments chauffants en fil de tungstène dans les incinérateurs à haute température
 - 6.6.3.2 Fils-électrodes électrolytiques en tungstène dans le traitement des eaux usées
- 6.7 Défense et sécurité
 - 6.7.1 Matériaux perforants
 - 6.7.1.1 Armure composite renforcée de fil de tungstène
 - 6.7.1.2 Noyaux de projectiles perforants à base de fil de tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.7.2 Détection et détection

6.7.2.1 Composants en fil de tungstène dans les capteurs à haute température

6.7.2.2 Déclencheurs en fil de tungstène dans l'équipement de détection d'explosifs

6.7.3 Équipement de communication

6.7.3.1 Fil de tungstène résistant aux hautes températures dans les antennes de communication militaires

6.7.3.2 Treillis réfléchissant en fil de tungstène dans les communications par satellite

Chapitre 7 : Sujets avancés et tendances futures du fil de tungstène résistant aux coupures

7.1 Nanotechnologie et fil de tungstène

7.1.1 Préparation et propriétés du fil de tungstène à l'échelle nanométrique

7.1.2 Applications potentielles et défis

7.2 Matériaux composites et technologie de revêtement

7.2.1 Matériaux composites renforcés de fil de tungstène

7.2.2 Amélioration du rendement grâce aux revêtements de surface

7.3 Tendances futures en matière de développement

7.3.1 Recherche et développement de nouveaux matériaux pour fils de tungstène

7.3.2 Considérations relatives à la durabilité et à l'environnement

7.3.3 Exploration des applications interdisciplinaires

Chapitre 8 : Études de cas et guide pratique pour le fil de tungstène résistant aux coupures

8.1 Études de cas sur les applications pratiques du fil de tungstène résistant aux coupures

8.1.1 Études de cas de l'industrie sur des applications réussies

8.1.2 Cas d'échec et leçons apprises

8.2 Guide de sélection et d'utilisation du fil de tungstène résistant aux coupures

8.2.1 Comment choisir le bon fil de tungstène résistant aux coupures

8.2.2 Installation, entretien et précautions de sécurité

Chapitre 9 : Annexe

9.1 Glossaire

9.2 Références

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 1 : Introduction et aperçu

1.1 Présentation

Le fil de tungstène résistant aux coupures, en tant que matériau d'ingénierie haute performance, occupe une position importante dans l'industrie moderne et la recherche scientifique en raison de ses propriétés physiques et chimiques uniques. Il sert non seulement de paradigme de l'intersection entre la science des matériaux et la technologie de l'ingénierie, mais fournit également un soutien essentiel dans de multiples industries.

1.1.1 Définition et importance du fil de tungstène résistant aux coupures

Le fil de tungstène résistant aux coupures est un fil fin principalement composé de tungstène (W, numéro atomique 74), optimisé par des procédés de dopage ou d'alliage pour présenter une résistance à la traction exceptionnelle (supérieure à 4000 MPa), une résistance exceptionnelle à l'usure et une stabilité à haute température (point de fusion d'environ 3422°C). D'un diamètre allant généralement du micromètre au millimètre, il peut résister à des contraintes mécaniques et à des charges thermiques extrêmes, ce qui le rend particulièrement adapté à la découpe de précision et aux applications fonctionnelles dans des environnements à haute température. Par rapport au fil de tungstène ordinaire, le fil de tungstène résistant aux coupures est spécialement conçu pour améliorer les performances dans les applications de coupe, telles que servir de fil d'électrode dans l'usinage par électroérosion (EDM) ou de substrat à haute résistance dans les scies à fil diamanté.

Son importance se manifeste à travers de multiples dimensions. Dans le secteur de la fabrication, la durabilité du fil de tungstène résistant aux coupures améliore considérablement la précision et l'efficacité du traitement, permettant des tolérances inférieures au micron (moins de 1 μm) dans des applications telles que la découpe de plaquettes de semi-conducteurs. Sa résistance aux hautes températures et à l'oxydation le rend indispensable dans l'aérospatiale (par exemple, comme matériau de renforcement dans les tuyères de fusée) et l'industrie électronique (par exemple, comme filaments dans les tubes à rayons X). De plus, la haute densité (19,25 g/cm^3) et la résistance à la corrosion du tungstène élargissent son potentiel dans les secteurs de la défense (par exemple, les matériaux perforants) et de l'énergie (par exemple, les composants de réacteurs nucléaires). En tant que réalisation représentative à la croisée de la science et de l'ingénierie des matériaux, le fil de tungstène résistant aux coupures est à l'origine du progrès technologique et constitue un outil essentiel pour relever des défis d'ingénierie complexes.

1.1.2 Objectif de l'écriture de ce livre et public cible

Ce livre vise à fournir une introduction complète et systématique aux principes scientifiques, aux processus de fabrication, aux tests de performance et à la large gamme d'applications du fil de tungstène résistant aux coupures, en comblant le manque de littérature existante pour une étude systématique de ce matériau spécialisé. En intégrant les dernières recherches universitaires et l'expérience pratique industrielle, le livre décrit non seulement l'état actuel de la technologie du fil de tungstène résistant aux coupures, mais explore également ses orientations de développement futures, offrant un soutien théorique et des conseils pratiques pour faire progresser l'innovation des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

matériaux et l'expansion des applications.

Le public cible comprend les universitaires et les ingénieurs engagés dans la recherche en science des matériaux, en génie mécanique et en technologie de fabrication, en particulier ceux qui se concentrent sur la conception de matériaux haute performance, l'optimisation des processus et le développement d'applications. De plus, le livre s'adresse aux praticiens des industries connexes, tels que les professionnels techniques de la fabrication de semi-conducteurs, de l'aérospatiale et des secteurs des dispositifs médicaux, ainsi qu'aux étudiants universitaires et aux chercheurs diplômés intéressés par les matériaux avancés. Que les lecteurs recherchent des idées théoriques ou des solutions pratiques, ce livre s'efforce de fournir un contenu faisant autorité et détaillé pour faciliter les percées dans les domaines académiques et industriels.

1.2 Développement historique du fil de tungstène résistant aux coupures

L'évolution du fil de tungstène résistant aux coupures reflète le développement plus large de la technologie des matériaux à base de tungstène, progressant à travers plusieurs étapes d'innovation, de la découverte initiale du métal à ses applications modernes à haute performance. Ce parcours illustre comment elle est passée du statut de matériau de base à celui d'élément essentiel de l'industrie moderne.

1.2.1 Découverte et premières applications du fil de tungstène

La découverte du tungstène remonte à la fin du 18^{ème} siècle. En 1781, le chimiste suédois Carl Wilhelm Scheele a déduit l'existence du tungstène grâce à l'analyse du minerai d'acide tungstique. Par la suite, en 1783, les frères espagnols Juan José Elhuyar et Fausto Elhuyar ont réussi à isoler le tungstène métallique du minerai de tungstène. Cependant, en raison des limites de la technologie métallurgique de l'époque, les applications industrielles du tungstène n'ont émergé qu'à la fin du 19^{ème} siècle.

L'utilisation précoce du fil de tungstène a commencé au début du 20^e siècle. En 1904, les scientifiques hongrois Justus von Liebig et Hans Kuzel ont mis au point un procédé de fabrication de fils de tungstène utilisant des techniques de métallurgie des poudres et de tréfilage, produisant de fins fils de tungstène initialement appliqués comme filaments dans les lampes à incandescence. Le point de fusion élevé et la conductivité électrique du tungstène (résistivité d'environ $5,6 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) lui ont permis de remplacer rapidement les filaments de carbone, devenant ainsi le matériau standard dans l'industrie de l'éclairage. En 1909, William D. Coolidge de General Electric aux États-Unis a encore affiné le processus de production du fil de tungstène en adoptant des méthodes d'étirage du tungstène ductile, élargissant son utilisation dans les tubes à électrons et les éléments chauffants. Au cours de cette période, le fil de tungstène était principalement du tungstène pur, avec une ductilité limitée (allongement à la rupture généralement inférieur à 5 %), mais il a jeté les bases de son développement en tant que matériau haute performance.

1.2.2 Évolution de la technologie du fil de tungstène résistant aux coupures

Au fur et à mesure que la technologie industrielle progressait, les limites du fil de tungstène pur sont

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

devenues évidentes, en particulier dans les applications nécessitant une résistance et une durabilité accrues. Au début du 20e siècle, l'introduction de la technologie de dopage a marqué un bond significatif dans les performances du fil de tungstène. En 1913, General Electric a été le pionnier du dopage du fil de tungstène avec du potassium (K), contrôlant sa distribution microscopique pour améliorer la résistance à l'affaissement à haute température. Initialement développé pour prolonger la durée de vie des filaments de lampes à incandescence, ce procédé a jeté les bases techniques du fil de tungstène résistant aux coupures. Plus tard, le développement d'alliages tungstène-rhénium (W-Re) a encore amélioré la ténacité et la stabilité à haute température du fil, ouvrant la voie à des applications plus larges.

Le concept de fil de tungstène résistant aux coupures en tant que matériau spécialisé a pris forme au milieu du 20e siècle. Dans les années 1950, l'essor de la technologie d'usinage par électroérosion (EDM) a stimulé la demande de fils d'électrode à haute résistance et résistants à l'usure, ce qui a incité à différencier les fils de tungstène résistants aux coupures des processus de production de filaments traditionnels. Sa fabrication comportait des étapes complexes d'emboutissage et de traitement thermique pour garantir une résistance à la traction élevée et une qualité de surface à des diamètres fins. Dans les années 1970, la commercialisation de la technologie de la scie à fil diamanté a propulsé le développement du fil de tungstène résistant aux coupures, qui est devenu largement utilisé comme substrat pour les particules de diamant dans les industries des semi-conducteurs et du photovoltaïque. Cette phase reflète la transition du fil de tungstène résistant aux coupures d'un matériau à usage général à un fil spécialisé à haute performance.

1.2.3 Jalons clés et percées technologiques

Le développement du fil de tungstène résistant aux coupures a été façonné par plusieurs jalons clés et percées technologiques qui définissent sa forme moderne. En 1927, le succès de l'étirage du fil de tungstène ultra-fin (diamètre inférieur à 0,01 mm) s'est imposé comme une percée dans le domaine de l'usinage de haute précision, rendue possible par les progrès de la précision des matrices d'étirage (tolérance $\pm 0,5 \mu\text{m}$) et des processus de recuit optimisés (température contrôlée entre 1200°C et 1500°C). Dans les années 1950, la production industrielle d'alliages tungstène-rhénium a considérablement amélioré la résistance à haute température (supérieure à 3000 MPa) et la résistance à la fatigue du fil, ouvrant de nouvelles applications dans l'aérospatiale (par exemple, les composants de moteurs de fusée) et l'électronique (par exemple, les tubes à rayons X).

L'adoption généralisée de la technologie EDM dans les années 1970 a marqué un tournant pour les applications de fil de tungstène résistant aux coupures. En tant que fil d'électrode EDM, il a démontré une excellente stabilité à la décharge (densité de courant jusqu'à 10^6 A/m^2) et une résistance à l'usure, révolutionnant la fabrication de moules et le traitement de pièces de précision. À l'aube du 21e siècle, les progrès de la nanotechnologie et de l'ingénierie de surface ont apporté d'autres percées, telles que la préparation de fils de tungstène à l'échelle nanométrique (diamètres aussi bas que 20-50 nm) et l'application de revêtements résistants à l'usure (par exemple, des revêtements en nitrure de tungstène). Ces jalons ont non seulement élargi la portée fonctionnelle du fil de tungstène résistant aux coupures, mais ont également renforcé son rôle central dans les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

domaines de haute technologie, illustrant l'interaction étroite entre la science des matériaux et les exigences industrielles.



Chapitre 2 : Fondements de la science des matériaux du fil de tungstène résistant aux coupures

2.1 Propriétés de base du fil de tungstène

Les performances du fil de [tungstène](#) proviennent des caractéristiques uniques de l'élément en tungstène, avec son point de fusion élevé, sa haute densité et son excellente résistance mécanique constituant la base de l'application du fil de tungstène résistant aux coupures dans des environnements extrêmes. Cette section explore les propriétés de base du fil de tungstène d'un point de vue physique, chimique et mécanique.

2.1.1 Propriétés physiques du fil de tungstène

[Le tungstène \(W, numéro atomique 74\)](#) est un métal de transition avec une structure cubique centrée sur le corps (BCC), bénéficiant d'un point de fusion exceptionnellement élevé de 3422°C, le plus élevé de tous les métaux purs. Son point d'ébullition est d'environ 5555°C, démontrant une stabilité thermique remarquable. Avec une densité de 19,25 g/cm³, comparable à celle de l'or et de l'uranium, le tungstène est avantageux dans les applications nécessitant une densité de masse élevée.

La conductivité thermique du fil de tungstène est de 173 W/(m·K) à température ambiante, tandis que sa conductivité électrique est relativement faible, avec une résistivité de 5,6 μΩ·cm à 20°C, augmentant à environ 45 μΩ·cm à 2000°C. Son coefficient de dilatation thermique est faible (4,5×10⁻⁶ K⁻¹ à température ambiante), ce qui contribue à la stabilité dimensionnelle à haute température. Ces propriétés physiques permettent au fil de tungstène d'exceller dans des environnements à haute température et de haute précision, tels que les fils résistants aux coupures ou les éléments chauffants à haute température.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tableau 2.1.1 Propriétés physiques du fil de tungstène

Propriété	Valeur	Remarques
Point de fusion	3422°C	Le plus élevé parmi les métaux purs
Point d'ébullition	5555°C	Excellente stabilité thermique
Densité	19,25 g/cm ³	Comparable à l'or et à l'uranium
Conductivité thermique	173 W/(m·K)	À température ambiante
Résistivité	5,6 μΩ·cm (20°C)	S'élève à 45 μΩ·cm à 2000°C
Dilatation thermique	4,5×10 ⁻⁶ K ⁻¹	Forte stabilité dimensionnelle

2.1.2 Propriétés chimiques du fil de tungstène

Le tungstène présente une grande stabilité chimique à température ambiante, montrant une bonne résistance à la corrosion de la plupart des acides (par exemple, l'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique) et des alcalis. Cependant, à des températures élevées (>400°C), le tungstène réagit avec l'oxygène pour former du trioxyde de tungstène (WO₃), qui commence à se sublimer à environ 800°C, entraînant une perte de matière. Par conséquent, dans les applications à haute température, le fil de tungstène est généralement utilisé dans des environnements sous vide ou sous gaz inerte (par exemple, l'argon ou l'azote) pour empêcher l'oxydation.

Le tungstène a une résistance plus faible aux halogènes (par exemple, le fluor, le chlore), formant des halogénures volatils (par exemple, WF₆) à des températures élevées. De plus, il réagit avec le carbone à des températures élevées pour produire du carbure de tungstène (WC), une propriété ayant une valeur potentielle dans la modification de surface du fil de tungstène résistant aux coupures. Ces propriétés chimiques déterminent l'adaptabilité environnementale du fil de tungstène et ses limites dans des conditions spécifiques.

Tableau 2.1.2 Propriétés chimiques du fil de tungstène

Condition de réaction	Propriété	Produit ou effet
Température ambiante	Résistant aux acides et aux alcalis	Haute stabilité chimique
Haute température (>400°C)	Réagit avec l'oxygène	Forme WO ₃ , se sublime à 800°C
Halogènes à haute température	Forme des halogénures volatils	p. ex., WF ₆ , résistance plus faible
Carbone haute température	Formes carbure de tungstène (WC)	Applicable dans la modification de surface

2.1.3 Propriétés mécaniques du fil de tungstène

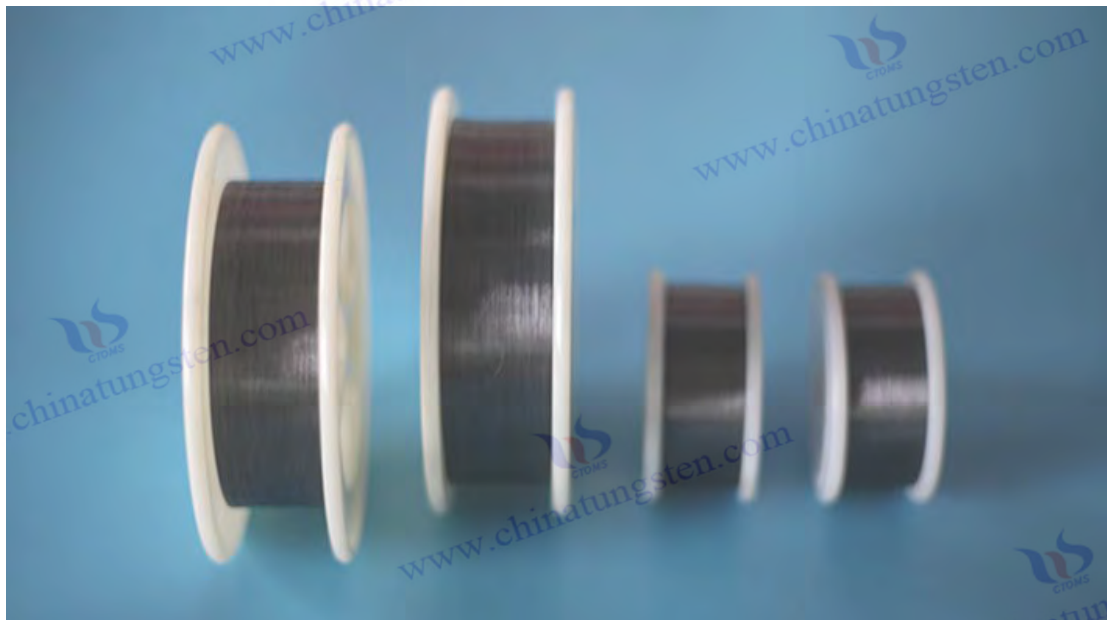
Les propriétés mécaniques du fil de tungstène sont son principal avantage en tant que matériau résistant aux coupures. Le tungstène pur a une résistance à la traction d'environ 550-1000 MPa à température ambiante, qui peut augmenter à 3000-4000 MPa après tréfilage, en fonction du diamètre et des techniques de traitement. Sa dureté est élevée (dureté Vickers de 350-450 HV), mais sa ductilité est faible, avec un allongement à la rupture généralement inférieur à 5 %, indiquant une certaine fragilité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

À des températures élevées (>1000°C), la résistance du tungstène diminue, mais le dopage ou l'alliage (par exemple, le dopage au potassium ou les alliages tungstène-rhénium) améliore considérablement sa résistance aux hautes températures et sa résistance à la fatigue. Par exemple, [les alliages tungstène-rhénium](#) peuvent maintenir une résistance à la traction supérieure à 500 MPa à 2000°C. Ces propriétés mécaniques permettent au fil de tungstène de résister à des contraintes et à une usure élevées, ce qui en fait un choix idéal pour les applications résistantes aux coupures.

Tableau 2.1.3 Propriétés mécaniques du fil de tungstène

Propriété	Valeur	État ou remarques
Traction	550 à 1000 MPa	Tungstène pur, température ambiante
	3000 à 4000 MPa	Après le tréfilage
	500 MPa (2000°C)	Alliage tungstène-rhénium
Dureté	350 à 450 HV	Dureté Vickers
Allongement à la rupture	<5 %	Faible ductilité



2.2 Composition et structure du fil de tungstène résistant aux coupures

Les performances du fil de tungstène résistant aux coupures dépendent non seulement du tungstène lui-même, mais aussi de sa composition et de sa microstructure. Cette section analyse les différences entre le fil de tungstène pur et le fil allié, explore leurs microstructures et élucide les effets du dopage et de l'alliage.

2.2.1 Différences entre le fil de tungstène pur et le fil de tungstène allié

Le fil de tungstène pur, composé de plus de 99,95 % de tungstène, offre le point de fusion et la densité les plus élevés, mais a une résistance et une ductilité médiocres à l'affaissement à haute température, ce qui le rend sujet à la recristallisation à des températures élevées, ce qui entraîne une

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

croissance des grains et une réduction de la résistance. En revanche, le fil de tungstène allié améliore les performances grâce à l'ajout d'autres éléments. Par exemple, les alliages tungstène-rhénium (W-Re, avec 3 % à 26 % de rhénium) améliorent la ténacité et la résistance à haute température, couramment utilisés dans les composants aérospatiaux, tandis que les alliages tungstène-molybdène (W-Mo) améliorent la résistance à la corrosion, adaptés à des environnements chimiques spécifiques.

Le fil de tungstène résistant aux coupures utilise généralement un dopage ou un alliage doux pour équilibrer résistance et facilité de traitement. Le fil de tungstène pur a une applicabilité limitée dans la coupe de précision, tandis que le fil de tungstène allié, avec des compositions sur mesure, répond mieux aux exigences des conditions de charge élevées et extrêmes.

Tableau 2.2.1 Comparaison du fil de tungstène pur et du fil de tungstène allié

Type	Composition	Avantages	Limitations
Tungstène pur	>99,95 % W	Point de fusion élevé, densité	Mauvaise ductilité, recristallisation
Tungstène-rhénium	W + 3 %-26 % Re	Haute ténacité, résistance	Coût plus élevé
Tungstène-Molybdène	W + Mo	Résistance accrue à la corrosion	Résistance légèrement inférieure

2.2.2 Microstructure et structure cristalline

La microstructure du fil de tungstène est considérablement influencée par son processus de production. Le tungstène pur a une structure cristalline BCC avec une constante de réseau de 3,165 Å. Au cours du tréfilage, il développe des grains fibreux allongés, généralement d'une taille de 0,1 à 10 µm, alignés le long de la direction de l'étrirage. Cette structure fibreuse améliore la résistance à la traction mais augmente l'anisotropie.

Le fil de tungstène dopé (par exemple, dopé au potassium) forme des bulles de potassium stables (10 à 100 nm de diamètre) aux joints de grains pendant le traitement à haute température, inhibant la croissance et la recristallisation des grains, améliorant ainsi la stabilité à haute température. La microstructure du fil de tungstène allié varie avec les éléments ajoutés ; Par exemple, dans les alliages tungstène-rhénium, le renforcement en solution solide du rhénium provoque une distorsion du réseau, améliorant ainsi la ténacité. Ces caractéristiques structurelles ont un impact direct sur les performances et la durée de vie du fil de tungstène résistant aux coupures.

Tableau 2.2.2 Caractéristiques microstructurelles du fil de tungstène

Type	Structure cristalline	Caractéristiques du grain	Structure spéciale
Tungstène pur	BCC, 3.165 Å	Fibreux, 0,1-10 µm	Aucun
Tungstène dopé (K)	BCC	Fibreux	Bulles de potassium, 10-100 nm
Tungstène-rhénium	BCC	Grains raffinés	Distorsion du réseau (solution solide)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2.3 Effets du dopage et de l'alliage sur la performance

Le dopage et l'alliage sont des méthodes essentielles pour améliorer les performances du fil de tungstène résistant aux coupures. Le dopage potassique (0,01 % à 0,05 %) forme des bulles de potassium qui inhibent la migration des joints de grains, maintenant la résistance à l'affaissement au-dessus de 2000 °C, ce qui est idéal pour la coupe à haute température ou les éléments chauffants. Des traces de silicium et d'aluminium améliorent la dureté de surface et la résistance à l'usure, ce qui convient aux applications à forte usure.

Dans l'alliage, le rhénium (3 % à 26 %) améliore la ténacité et la résistance à la traction grâce au renforcement de la solution solide et à l'affinement des grains, les alliages tungstène-rhénium atteignant des résistances allant jusqu'à 700 MPa à 2500 °C. Le dopage au thorium (Th) ou au lanthane (La) (1 à 2 %) améliore les propriétés d'émission d'électrons, ce qui est bénéfique pour les fils d'électrodes. Ces modifications permettent au fil de tungstène résistant aux coupures de répondre aux exigences spécifiques de l'application.

Tableau 2.2.3 Effets du dopage et de l'alliage sur la performance

Élément	Contenu	Effet primaire	Exemple d'application
Potassium (K)	0.01%-0.05%	Résistance à l'affaissement, suppression de la recristallisation	Découpe à haute température, éléments chauffants
Silicium (Si), Aluminium (Al)	Trace	Augmentation de la dureté, de la résistance à l'usure	Fil de coupe résistant l'usure
Rhénium (Re)	3%-26%	Ténacité et résistance améliorées	Composants aérospatiaux
Thorium (Thi) et Lanthan (La)	1%-2%	Amélioration de l'émission d'électrons	Fil d'électrode EDM



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3 Comparaison du fil de tungstène résistant aux coupures avec d'autres matériaux

Les propriétés uniques du fil de tungstène résistant aux coupures le distinguent parmi divers matériaux. Cette section compare le fil de tungstène avec des matériaux courants comme le fil d'acier et la fibre de carbone, en analysant ses avantages dans des applications spécifiques.

2.3.1 Comparaison des performances du fil de tungstène avec du fil d'acier, de la fibre de carbone, etc.

Par rapport au fil d'acier, le fil de tungstène offre une résistance à la traction (4000 MPa contre 2000 MPa pour l'acier à haute résistance) et un point de fusion (3422 °C contre ~1500 °C pour l'acier), bien que sa ductilité soit plus faible (<5 % contre 20 % à 30 % pour l'acier). Le fil d'acier est plus facile à traiter à température ambiante, tandis que le fil de tungstène excelle dans les environnements à haute température et à forte contrainte.

La fibre de carbone possède une résistance spécifique exceptionnelle (résistance à la traction ~3500 MPa, densité 1,8 g/cm³), ce qui la rend beaucoup plus légère que le fil de tungstène, mais sa résistance à la température est médiocre (se décomposant à ~500°C), ce qui la rend inadaptée à la découpe à haute température. La conductivité du fil de tungstène surpasse également celle de la fibre de carbone, ce qui lui donne un avantage dans l'EDM.

Par rapport au fil de cuivre (résistance à la traction 200-400 MPa, point de fusion 1085 °C), le fil de tungstène dépasse de loin en termes de résistance et de résistance à la température, bien que sa conductivité soit légèrement inférieure (résistivité du cuivre 1,7 μΩ·cm). Ces différences dictent leurs scénarios d'application respectifs.

Tableau 2.3.1 Comparaison des performances du fil de tungstène avec d'autres matériaux

Matériel	Résistance à la traction (MPa)	Point de fusion (°C)	Densité (g/cm ³)	Résistivité (μΩ·cm)	Ductilité
Fil de tungstène	4000	3422	19.25	5.6	<5 %
Acier à haute résistance	2000	~1500	7.8	~15	20%-30%
Fibre de carbone	3500	~500 (se décompose)	1.8	Non conducteur	Haut
Fil de cuivre	200-400	1085	8.96	1.7	>30 %

2.3.2 Avantages du fil de tungstène résistant aux coupures dans des applications spécifiques

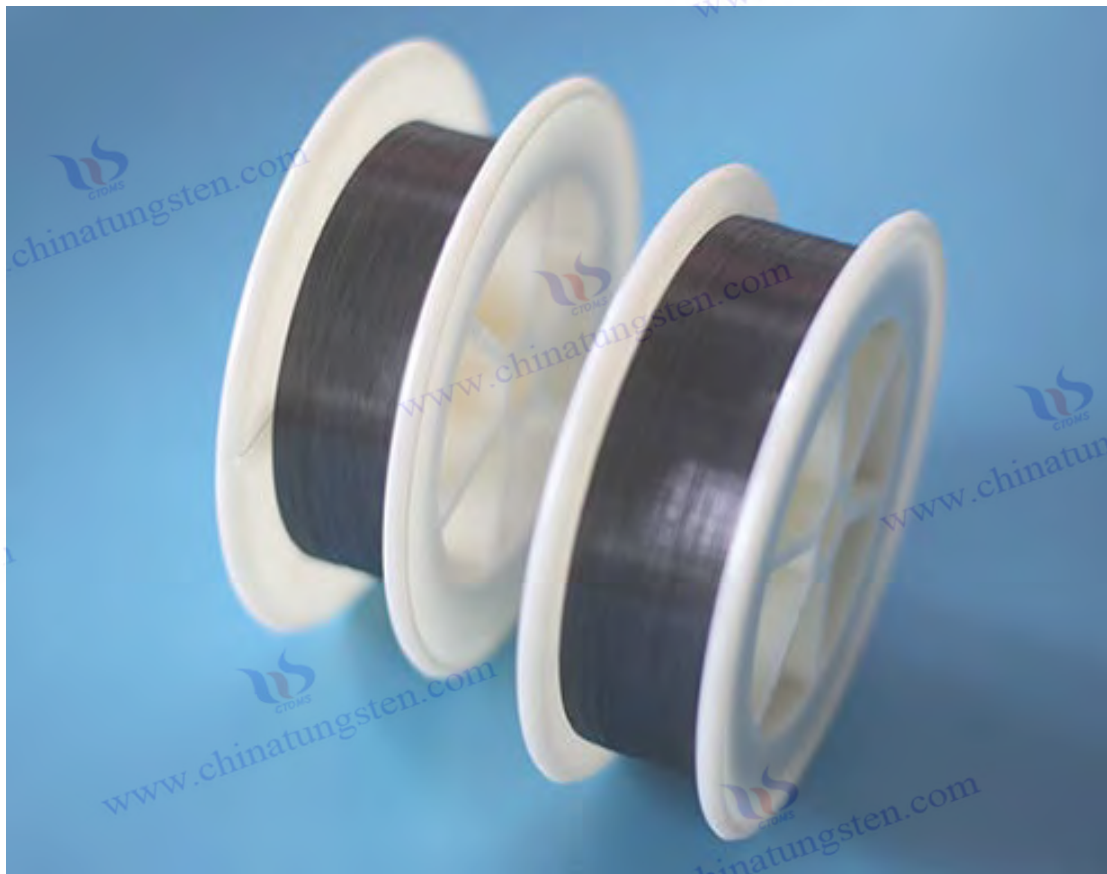
Dans l'usinage par électroérosion (EDM), la haute résistance et la résistance à l'usure du fil de tungstène résistant aux coupures lui permettent de résister à des densités de courant élevées et à l'usure par décharge, offrant une précision de coupe supérieure par rapport au fil de cuivre ou d'acier. Dans les scies à fil diamanté, la durabilité du fil de tungstène en tant que substrat surpasse celle du fil d'acier, assurant la stabilité dans la coupe de plaquettes de semi-conducteurs et de pierres.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dans les environnements à haute température (par exemple, les buses aérospatiales, >2000°C), la stabilité thermique du fil de tungstène surpasse celle de la fibre de carbone et de l'acier, ce qui en fait le matériau de prédilection. Sa haute densité offre également un avantage de masse irremplaçable dans les applications de défense (par exemple, les noyaux de projectiles perforants). Ces propriétés positionnent le fil de tungstène résistant aux coupures de manière unique dans les applications de haute précision, à haute température et à forte charge.

Tableau 2.3.2 Avantages d'application du fil de tungstène résistant aux coupures

Application	Exigence clé	Avantage du fil de tungstène	Limites des matériaux de comparaison
Découpe de fil EDM	Haute résistance, résistance à l'usure	Résiste à une densité de courant de 10^6 A/m ²	Le cuivre manque de résistance, l'acier s'use rapidement
Scie à fil diamanté	Durabilité	Substrat à haute résistance	L'acier a une durée de vie plus courte
Composants haute température (>2000°C)	Stabilité thermique	Point de fusion 3422°C	La fibre de carbone se décompose, l'acier fond
Noyaux perforants	Haute densité	19,25 g/cm ³	L'acier a une densité plus faible



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 3 : Processus de fabrication du fil de tungstène résistant aux coupures de CTIA GROUP

3.1 Sélection des matières premières

La fabrication de fils de tungstène résistants aux coupures par [CTIA GROUP](#) commence par une sélection minutieuse de matières premières de haute qualité, dont les performances reposent sur la pureté du tungstène et la composition optimisée des éléments de dopage. L'extraction et la purification du minerai de tungstène, ainsi que la sélection et le rôle des éléments dopants, constituent le cœur de ce processus.

3.1.1 Extraction et purification du minerai de tungstène

CTIA GROUP utilise de la [wolframite \(Fe,MnWO₄\)](#) et de la [scheelite \(CaWO₄\) de haute qualité](#) comme matières premières primaires. L'extraction commence par l'exploitation minière, menée à ciel ouvert ou souterraine, suivie de processus d'enrichissement (p. ex., séparation par gravité, séparation magnétique et flottation) pour séparer les minéraux de tungstène des stériles. Des équipements tels que des gabarits et des séparateurs de fluides lourds assurent une séparation efficace. L'extraction chimique utilise la méthode de fusion alcaline, qui fait réagir le minerai avec du carbonate de sodium (Na₂CO₃) ou de l'hydroxyde de sodium (NaOH) à 800-1000°C pour produire [du tungstate de sodium \(Na₂WO₄\)](#), ou la méthode de lixiviation acide à l'aide d'acide chlorhydrique (HCl) ou d'acide sulfurique (H₂SO₄) pour extraire le tungstène.

Le processus de purification implique une précipitation et une filtration en plusieurs étapes pour éliminer les impuretés (par exemple, le molybdène, le phosphore, l'arsenic), ce qui donne du [paratungstate d'ammonium \(APT, \(NH₄\)₁₀\(H₂W₁₂O₄₂\)·4H₂O\)](#). L'APT est calciné à 600-800°C pour former [du trioxyde de tungstène \(WO₃\)](#), qui est ensuite réduit dans un four à hydrogène (900-1100°C, débit H₂ 20-50 m³/h) pour produire de [la poudre de tungstène de haute pureté](#) (pureté >99,97 %, taille des particules 1-3 μm). Ce processus reflète les exigences strictes de CTIA GROUP en matière de matières premières de haute pureté, fournissant une base de premier ordre pour le fil de tungstène résistant aux coupures.

Tableau 3.1.1 Procédé d'extraction et de purification du minerai de tungstène

Pas	Méthode/Condition	Produit	Paramètres clés
Valorisation	Gravité, magnétique, flottaison	Concentré de tungstène	Gabarits, supports lourds
Extraction chimique	Fusion alcaline, 800-1000°C	Na ₂ WO ₄	Na ₂ CO ₃ ou NaOH
	Lixiviation acide	Acide tungstique	HCl ou H ₂ SO ₄
Purification	Précipitations, filtration	APTE	Supprime Mo, P, As
Calcination	600 à 800 °C	WO ₃	-
Réduction de l'hydrogène	900 à 1100 °C	Poudre de tungstène (>99,97 %)	Débit H ₂ 20-50 m ³ /h

3.1.2 Sélection et rôle des éléments dopants

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP sélectionne des éléments de dopage en fonction des exigences de haute performance du fil de tungstène résistant aux coupures afin d'optimiser ses propriétés. Le potassium (K, 0,01 % à 0,03 %) forme des bulles de potassium (10 à 50 nm de diamètre) pour inhiber la recristallisation à haute température, améliorant ainsi la résistance à l'affaissement pour les applications de coupe à haute température. Le silicium (Si) et l'aluminium (Al, <0,005 %) améliorent la dureté de surface et la résistance à l'usure, ce qui est idéal pour la coupe de précision. Le rhénium (Re, 5 % à 20 %) améliore la ténacité et la résistance à haute température grâce au renforcement en solution solide, répondant ainsi aux exigences aérospatiales. Le thorium (Th, 1 % à 1,5 %) ou le lanthane (La, 1 % à 1,5 %) optimisent les propriétés d'émission d'électrons pour les fils d'électrodes EDM.

Des éléments de dopage sont incorporés pendant l'étape de préparation de la poudre de tungstène à l'aide d'équipements de mélange de haute précision (par exemple, des broyeurs à boulets planétaires) pour assurer une distribution uniforme. Ce processus démontre le contrôle précis de CTIA GROUP sur les propriétés des matériaux.

Tableau 3.1.2 Éléments antidopage et leurs rôles

Élément	Contenu	Rôle	Scénario d'application
Potassium (K)	0.01%-0.03%	Inhibe la recristallisation, résistance à l'affaissement	Fil de coupe à haute température
Silicium (Si)	<0,005 %	Améliore la dureté, la résistance à l'usure	Fil de coupe résistant à l'usure
Aluminium (Al)	<0,005 %	Améliore les propriétés de surface	Découpe de haute précision
Rhénium (Re)	5%-20%	Augmente la ténacité, la résistance	Composants aérospatiaux
Thorium (Th)	1%-1.5%	Améliore l'émission d'électrons	Fil d'électrode EDM
Lanthane (La)	1%-1.5%	Améliore l'émission, la durabilité	Électrodes hautes performances

3.2 Processus de production du fil de tungstène de CTIA GROUP

Le processus de production de fil de tungstène de CTIA GROUP est conçu pour une précision et des performances élevées, répondant aux exigences strictes du fil de tungstène résistant aux coupures. La métallurgie des poudres, le tréfilage, le traitement thermique, le traitement de surface et l'optimisation du processus sont des éléments clés de ce processus.

3.2.1 Méthode de métallurgie des poudres

CTIA GROUP utilise la métallurgie des poudres pour transformer la poudre de tungstène (granulométrie de 1 à 3 µm) en barres de tungstène. La poudre est mélangée à un liant (par exemple, de l'alcool polyvinylique) à l'aide d'un mélangeur à grande vitesse et pressée en tiges (diamètre 8-15 mm, longueur 150-300 mm) à 500-600 MPa à l'aide d'une presse hydraulique de précision. Le pré-frittage se produit dans une atmosphère d'hydrogène (1000-1200°C, 1-2 heures) pour éliminer le liant et réaliser une densification initiale. Le frittage complet est effectué dans un four à haute température (2300-2500°C, débit H₂ 40-60 m³/h, 5-6 heures), atteignant une densité de barre de 95 %-97 % de la valeur théorique.

Des éléments de dopage sont ajoutés pendant l'étape de mélange par séchage par atomisation pour

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

assurer l'uniformité microscopique, fournissant une base de tige ductile à haute résistance pour l'étirage ultérieur.

Tableau 3.2.1 Paramètres du procédé de métallurgie des poudres

Pas	Condition	But	Paramètres clés
Mélange	Poudre de tungstène + liant	Uniformité	Taille des particules 1-3 µm
Pressant	500 à 600 MPa	Formation des tiges	Diamètre 8-15 mm
Pré-frittage	1000-1200°C, H ₂	Enlèvement du liant	1 à 2 heures
Frittage complet	2300-2500°C, H ₂	Densification	Densité 95 %-97 %, 5-6 heures

3.2.2 Processus et équipement de tréfilage

Le tréfilage est une étape essentielle dans la production de fils de tungstène résistants aux coupures de CTIA GROUP. La dureté élevée (dureté Vickers 400-450 HV) et la fragilité du tungstène nécessitent plusieurs passes d'emboutissage pour réduire le diamètre (de quelques millimètres à 15 µm), chaque passe réduisant le diamètre de 10 à 15 %. Le recuit intermédiaire à l'hydrogène ou à l'argon (1300-1500°C, 10-20 secondes) rétablit la ductilité et soulage les contraintes après chaque passage.

CTIA GROUP utilise des machines d'étirage mono-matrice (emboutissage grossier, 1-5 mm) et des machines d'étirage continu multi-matrices (emboutissage fin, <0,3 mm), équipées de matrices diamantées de haute précision (tolérance ±0,3 µm) ou de matrices en carbure (étape grossière). La vitesse d'étirage est de 5 à 15 m/min, avec un lubrifiant à émulsion de graphite pour réduire la friction. La force d'étirage (<40 N), l'usure de la matrice et la température du fil (<250°C) sont surveillées. L'optimisation comprend le recuit tous les 2-3 passages et le calibrage laser pour la cohérence du diamètre (tolérance ±0,1 µm). Les tableaux suivants répertorient les paramètres et équipements clés.

Tableau 3.2.2a Paramètres du processus de tréfilage

Paramètre	Gamme	But	Équipement/État
Réduction du diamètre	Millimètres à 15 µm	Mise en forme progressive	10 % à 15 % par passage
Température de recuit	1300-1500°C	Restaurer la ductilité	H ₂ ou argon, 10-20 sec
Vitesse d'étirage	5 à 15 m/min	Contrôle qualité	Machines à une ou plusieurs matrices
La précision	Tolérance ±0,3 µm	Qualité de surface	Matrices en diamant ou en carbure
Force d'attraction	<40 N	Prévenir la casse	Capteur de force en ligne
Lubrifiant	Émulsion de graphite	Réduire les frictions	-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tableau 3.2.2b Liste de l'équipement de tréfilage

Nom de l'équipement	Description de la fonction	Stade applicable
Machine d'étirage grossier à matrice unique	Procédés de tiges grossières (1-5 mm), mise en forme initiale	Dessin grossier
Machine d'étirage fin multi-matrices	Emboutissage continu multi-passes (<0,3 mm)	Dessin fin
Matrice diamantée ultra-précise	Tréfilage de haute précision (tolérance $\pm 0,3\mu\text{m}$)	Mise en forme fine du fil
Matrice en carbure à haute usure	Grande durabilité pour l'étirage grossier (>1 mm)	Dessin grossier/moyen
Moniteur de force de dessin en temps réel	Force du moniteur (<40 N) pour éviter la casse	Tout au long de l
Jauge laser de haute précision	Mesure le diamètre (tolérance $\pm 0,1\mu\text{m}$)	Dessin fin
Système de pulvérisation d'émulsion de graphite	Application uniforme du lubrifiant	Tout au long de l

3.2.3 Traitement thermique et processus de recuit

Le traitement thermique optimise les performances du fil de tungstène résistant aux coupures. Le recuit se produit à 1300-1800°C dans une atmosphère d'hydrogène pendant 5 à 15 secondes (fil fin) ou jusqu'à 1 minute (fil grossier), soulageant les contraintes et ajustant la structure du grain. Le traitement de vieillissement (1600-2000°C, 15-30 minutes) stabilise davantage la microstructure, améliorant la résistance à haute température.

Pour le fil de tungstène dopé, le traitement thermique contrôle la taille des bulles de potassium (10-50 nm), à l'aide de fours tubulaires de haute précision (teneur en oxygène $\text{H}_2 < 5\text{ ppm}$) pour assurer la résistance à l'oxydation. Ce processus a un impact direct sur la durabilité et les performances de coupe du fil.

Tableau 3.2.3 Paramètres du procédé de traitement thermique

Type	Température	But	Condition
Recuit	1300-1800°C	Soulager le stress, ajuster les grains	Atmosphère H_2 , 5 sec-1 min
Traitement du vieillissement	1600-2000°C	Stabiliser la structure, améliorer la résistance	Atmosphère H_2 , 15-30 min

3.2.4 Traitement de surface et post-traitement

CTIA GROUP améliore la résistance à l'usure et à la corrosion grâce à des traitements de surface. Le polissage électrolytique (solution NaOH, densité de courant 60-100 A/m²) élimine les micro-défauts, obtenant une finition de surface de $R_a < 0,05\mu\text{m}$. Pour une résistance élevée à l'usure, le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) applique un revêtement en carbure de tungstène (WC) (2-4 μm d'épaisseur).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le post-traitement comprend une coupe de précision (tolérance de longueur $\pm 0,3$ mm) et un enroulement automatisé (tension 15-25 N) pour garantir des spécifications cohérentes. Ces étapes améliorent la praticité du fil.

Tableau 3.2.4 Paramètres de traitement de surface et de post-traitement

Processus	Condition	But	Paramètres clés
Polissage électrolytique	NaOH, 60-100A/m ²	Améliorer l'état de surface	Ra < 0,05 μ m
Revêtement (CVD)	WC, 2-4 μ m	Améliorer la dureté, la résistance à l'usure	-
Découpage	Tolérance $\pm 0,3$ mm	Cohérence des spécifications	Machine de découpe de précision
Sinueux	Tension 15-25 N	Facilité de transport/d'utilisation	Enrouleur

3.2.5 Optimisation du processus pour le fil de tungstène résistant aux coupures

CTIA GROUP optimise les processus pour des performances résistantes aux coupures. Le dopage au potassium est contrôlé avec précision à 0,02 % $\pm 0,002$ %, et les passes d'étirage sont augmentées à 25-35 pour une tolérance de diamètre de $\pm 0,1$ μ m. Le traitement thermique utilise un chauffage par gradient (1300-1800°C) pour améliorer la stabilité du grain.

De plus, le frittage par plasma d'étincelles (SPS, 2300°C, 60 MPa) augmente la densité des tiges (>98 %), réduisant ainsi les défauts internes. Ces optimisations améliorent considérablement la résistance et la fiabilité du fil de tungstène résistant aux coupures.

Tableau 3.2.5 Optimisation du procédé pour le fil de tungstène résistant aux coupures

Mesure d'optimisation	Condition	But	Effet
Ajustement du dopage	K 0,02 % $\pm 0,002$ %	Équilibre, force, ductilité	Amélioration de la résistance à l'affaissement
Augmentation du nombre de passes de dessin	25-35 passes	Uniformité du diamètre	Tolérance $\pm 0,1$ μ m
Traitement thermique à gradient	1300-1800°C	Améliorer la stabilité du grain	Résistance accrue à haute température
Frittage par plasma d'étincelles	2300°C, 60 MPa	Réduire les défauts	Densité >98 %

3.3 Contrôle de la qualité et essais du fil de tungstène résistant aux coupures

Le contrôle de la qualité de CTIA GROUP couvre l'ensemble du processus de production, garantissant des normes élevées pour le fil de tungstène résistant aux coupures. Le suivi en cours de production et les méthodes d'analyse du produit fini garantissent collectivement la qualité.

3.3.1 Surveillance de la qualité pendant la production

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La taille des particules de poudre de tungstène (1-3 μm) et la pureté (>99,97 %) sont vérifiées à l'aide de l'analyse granulométrique laser et de la spectroscopie ICP. Le frittage contrôle la température ($\pm 5^\circ\text{C}$) et le débit de H_2 (40-60 m^3/h). Le dessin surveille la force (<40 N) et la qualité de surface (pas de fissures) à l'aide de microscopes et de capteurs de force, garantissant ainsi la stabilité intermédiaire du produit.

Tableau 3.3.1 Surveillance de la qualité pendant la production

Étape	Paramètre de surveillance	Cible	Méthode d'essai
Poudre de tungstène	Taille 1-3 μm , >99,97 %	Uniformité, pureté	Dimensionnement laser, spectroscopie ICP
Frittage	2300-2500°C, 40-60 m^3/h	Sans défaut, densifié	Thermomètre, débitmètre
Dessin	Force <40 N	Surface sans fissures	Capteur de force, microscope

3.3.2 Normes et méthodes d'essai pour le fil de tungstène fini

Les tests du produit fini comprennent la composition chimique (spectroscopie ICP, pureté >99,97 %), les propriétés mécaniques (résistance à la traction 3500-4500 MPa, dureté 400-450 HV), la précision dimensionnelle (tolérance $\pm 0,5 \mu\text{m}$, jauge laser) et la qualité de surface (pas de fissures, inspection MEB). La résistance aux coupures est validée par des tests d'usure (taux d'usure <0,05 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$). Ces normes garantissent que le fil répond aux besoins des applications haut de gamme.

Tableau 3.3.2 Normes et méthodes d'essai pour les produits finis

Élément de test	Standard	Méthode	Cible
Composition chimique	Pureté >99,97 %	Spectroscopie ICP	Confirmer les niveaux d'impuretés
Traction	3500 à 4500 MPa	Essai de traction	Conformité à la résistance
Dureté	400 à 450 HV	Essai de dureté Vickers	Résistance à l'usure
Précision dimensionnelle	Tolérance $\pm 0,5 \mu\text{m}$	Jauge laser	Consistance
Qualité de surface	Pas de fissures	SEM	Sécurité d'utilisation
Résistance aux coupures	Taux d'usure <0,05 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$	Test d'usure	Durabilité de coupe



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Introduction

1. Overview of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Cut-Resistant Tungsten Wire is a high-performance industrial material made from high-purity tungsten powder through advanced powder metallurgy and precision wire-drawing processes. With outstanding high strength, wear resistance, and high-temperature stability, it is widely used in photovoltaic, semiconductor, aerospace, and electronic equipment industries. It excels particularly in high-precision wire-cutting applications.

3. Production Process of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Raw Material Selection: Uses high-purity tungsten powder.

Powder Metallurgy: High-temperature sintering and multiple forging processes produce dense tungsten rod billets.

Precision Wire Drawing: Multi-stage wire drawing with diamond dies ensures high-precision dimensional control.

Heat Treatment: Optimized grain structure through precise annealing processes enhances tungsten wire toughness and strength.

Surface Treatment: Electrolytic polishing technology ensures a defect-free, highly smooth tungsten wire surface.

4. CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Specifications

Item	Standard
Diameter (μm)	15-35 (Customizable)
Density (g/cm^3)	19.3
Tensile Strength (N/mm^2)	3600-4000
Vickers Hardness (HV)	800-850
Elongation	1%-3%
Tensile Force (N)	0.67-3.65

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel.: +86 592 5129595, 5129696

For more information on cut-resistant tungsten wire, please visit website: www.tungsten.com.cn.

For market updates and real-time information, scan the following QR code to follow our WeChat official account: "chinatungsten".



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 4 : Performances et essais du fil de tungstène résistant aux coupures

4.1 Essais de performance mécanique du fil de tungstène résistant aux coupures

Les propriétés mécaniques du fil de tungstène résistant aux coupures offrent un soutien exceptionnel dans les environnements à forte contrainte. La résistance à la traction et la résistance à la rupture, la dureté, les performances en fatigue et la durabilité sont les paramètres de base pour évaluer son comportement mécanique.

4.1.1 Résistance à la traction et ténacité à la rupture

La résistance à la traction reflète la capacité du fil de tungstène à résister aux charges de traction, généralement optimisée par un tréfilage précis et un traitement thermique pour atteindre 3000-4500 MPa, surpassant considérablement le fil d'acier ordinaire (environ 2000 MPa). Les essais sont effectués à l'aide d'une machine d'essai universelle (taux de charge de 0,5 mm/min, conforme aux normes ASTM E8), avec des diamètres d'échantillon allant de 20 μm à 300 μm . L'allongement à la rupture reste entre 2 % et 5 %, ce qui indique une ténacité équilibrée.

La ténacité à la rupture (K_{IC}) est mesurée par l'essai de poutre entaillée à un seul bord (SENB), avec des valeurs typiques allant de 5 à 10 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Les éléments dopants tels que le potassium ou le rhénium régulent la microstructure (par exemple, la formation de bulles de potassium ou le renforcement d'une solution solide), inhibant efficacement la propagation des fissures aux joints de grains et assurant la fiabilité dans les scénarios de coupe à haute contrainte.

Tableau 4.1.1 Essais de résistance à la traction et de ténacité à la rupture

Paramètre	Valeur	Méthode d'essai	Avantage en termes de performance
Traction	3000 à 4500 MPa	ASTM E8, Essai de traction	Excellente capacité de charge
Allongement à la rupture	2%-5%	Machine d'essai universelle	Ductilité équilibrée
Résistance à la rupture (K_{IC})	5-10 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	SENB Test	Résistance supérieure aux fissures

4.1.2 Essai de dureté

La dureté est une propriété fondamentale qui permet au fil de tungstène résistant aux coupures de résister à l'usure et à la déformation. Après l'emboutissage des armatures et les traitements de surface (par exemple, les revêtements), la dureté Vickers (HV) varie généralement de 350 à 450 HV, mesurée à l'aide d'un testeur de dureté Vickers (charge 500 g, temps d'indentation 10 secondes, conforme aux normes ISO 6507). La dureté augmente avec l'affinement du grain, les fils fins (<50 μm) approchant la limite supérieure de 450 HV.

Cette propriété garantit une excellente durabilité et stabilité lors de la découpe de matériaux durs tels que la céramique et les plaquettes de silicium.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tableau 4.1.2 Essai de dureté

Paramètre	Valeur	Méthode d'essai	Avantage en termes de performance
Dureté Vickers	350 à 450 HV	ISO 6507, charge de 500 g	Résistance exceptionnelle à l'usure
Variation de dureté	Augmente avec un diamètre plus petit	Testeur de microdureté	Répond aux besoins de haute résistance des fils fins

4.1.3 Performance en fatigue et durabilité

Les performances en fatigue indiquent l'endurance du fil de tungstène sous des charges répétées. Les essais de fatigue en flexion tournante (fréquence 50 Hz, rapport de contrainte 0,1, conforme aux normes ASTM E466) révèlent une limite de fatigue de 1200-1800 MPa, avec une durée de vie allant jusqu'à 10^7 cycles. Le dopage au rhénium réduit l'initiation des microfissures grâce au renforcement de la solution solide, améliorant ainsi la résistance à la fatigue.

Les tests de durabilité simulent des conditions de coupe réelles (par exemple, des cycles de décharge EDM), montrant une durée de vie de 300 à 600 heures, selon le diamètre et la composition de dopage, adaptée aux opérations prolongées à forte charge.

Tableau 4.1.3 Essais de résistance à la fatigue et de durabilité

Paramètre	Valeur	Méthode d'essai	Avantage en termes de performance
Limite de fatigue	1200 à 1800 MPa	ASTM E466, 50 Hz	Excellente durabilité cyclique
Durée de vie	300 à 600 heures	Conditions de coupe simulées	Stabilité opérationnelle à long terme

4.2 Résistance à l'usure et résistance à la corrosion du fil de tungstène résistant aux coupures

La résistance à l'usure et à la corrosion détermine les performances du fil de tungstène dans des environnements abrasifs et chimiquement agressifs, servant de garanties essentielles de sa fiabilité.

4.2.1 Mécanismes d'usure et méthodes d'essai

L'usure du fil de tungstène résistant aux coupures résulte principalement de mécanismes abrasifs et adhésifs, particulièrement prononcés lors de la coupe de matériaux durs. Les tests d'usure par goupille sur disque (charge 10 N, vitesse 200 tr/min, conforme aux normes ASTM G99) montrent un taux d'usure de 0,05-0,1 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, bien inférieur à celui du fil d'acier (environ 0,2-0,3 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$). Les revêtements de surface (par exemple, carbure de tungstène, WC, 1-5 μm d'épaisseur) réduisent la profondeur d'usure à $<1 \mu\text{m}/1000 \text{ m}$.

Des études sur le mécanisme d'usure indiquent que l'affinement du grain et la protection du revêtement réduisent efficacement la perte de matériau et l'adhérence de surface, améliorant ainsi la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durabilité dans des conditions de frottement élevé.

Tableau 4.2.1 Essais de performance à l'usure

Paramètre	Valeur	Méthode d'essai	Avantage en termes de performance
Taux d'usure	0,05 à 0,1 mm ³ /N·m	ASTM G99, goupille sur disque	Résistance supérieure à l'usure
Profondeur d'usure	<1 µm/1000 m	Profilomètre de surface	Durée de vie considérablement prolongée

4.2.2 Évaluation du rendement dans les environnements corrosifs

La résistance à la corrosion est testée dans des environnements neutres au brouillard salin (5 % NaCl, 35°C, conforme aux normes ASTM B117) et acides (pH 2, solution H₂SO₄). Le fil de tungstène non revêtu présente un taux de perte de poids de 0,2 à 0,5 mg/cm² après 72 heures de brouillard salin, tandis que le fil traité en surface (par exemple, nitrure de tungstène, WN, 1-3 µm d'épaisseur) réduit ce taux à <0,1 mg/cm². Dans des conditions acides, le taux de corrosion varie de 0,02 à 0,05 mm/an, surpassant les échantillons non traités (0,1 à 0,2 mm/an). Cette performance garantit la stabilité dans les environnements humides ou chimiquement corrosifs, ce qui le rend adapté aux dispositifs médicaux et aux applications industrielles.

Tableau 4.2.2 Essais de résistance à la corrosion

Paramètre	Valeur	Méthode d'essai	Avantage en termes de performance
Perte de poids au brouillard salin	<0,1 mg/cm ² (72 h)	ASTM B117, 5 % NaCl	Excellente résistance à la corrosion
Taux de corrosion acide	0,02 à 0,05 mm/an	pH 2, H ₂ SO ₄ Trempage	Stabilité chimique supérieure

4.3 Performance à haute température du fil de tungstène résistant aux coupures

Les performances à haute température du fil de tungstène résistant aux coupures sous-tendent son utilité dans des conditions extrêmes. La stabilité thermique, la résistance à l'oxydation et les modifications des propriétés mécaniques à des températures élevées sont des critères d'évaluation clés.

4.3.1 Stabilité thermique et résistance à l'oxydation

Les tests de stabilité thermique sous vide ou sous atmosphère inerte (Ar, 10⁻⁵ Pa) montrent que le fil de tungstène conserve sa résistance avec moins de 15 % de perte après 100 heures à 2500°C, grâce à des éléments dopants (par exemple, le potassium) qui suppriment la croissance des grains et la recristallisation. La résistance à l'oxydation est évaluée à l'aide d'essais d'exposition à haute température (1000°C, air), où le fil non revêtu perd 5-10 mg/cm²/h en raison de la formation de WO₃ volatils, tandis que le fil revêtu (par exemple, WN, 1-3 µm) réduit cette perte à <0,5-1 mg/cm²/h. Ces propriétés permettent d'obtenir des performances exceptionnelles dans les fours à haute température et les composants aérospatiaux.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tableau 4.3.1 Essais de stabilité thermique et de résistance à l'oxydation

Paramètre	Valeur	Méthode d'essai	Avantage en termes de performance
Perte de résistance à haute température	<15 % (2500°C, 100 h)	Test de vide à haute température	Excellente stabilité thermique
Perte de poids par oxydation	<0,5-1mg/cm ² /h (1000°C)	Test d'exposition à l'air	Résistance supérieure à l'oxydation

4.3.2 Modifications des propriétés mécaniques à haute température

Les propriétés mécaniques à haute température sont mesurées par des essais de traction (1000-2000°C, atmosphère Ar, conforme aux normes ASTM E21). Le fil dopé au rhénium (3 % à 26 %) maintient une résistance à la traction de 500 à 700 MPa à 2000 °C, surpassant le fil de tungstène pur (environ 300 à 400 MPa). La dureté diminue à 300-400 HV à 1500°C, ce qui reste suffisant pour les besoins de coupe à haute température.

Les essais de fluage à haute température (1800°C, charge de 50 MPa) montrent un taux de fluage inférieur à 10⁻⁶ s⁻¹, avec des traitements de stabilisation des grains (par exemple, un traitement thermique de gradient) réduisant davantage la déformation, garantissant l'intégrité structurelle dans les environnements à haute température.

Tableau 4.3.2 Essais de performance mécanique à haute température

Paramètre	Valeur	Méthode d'essai	Avantage en termes de performance
Résistance à la traction à haute température	500-700MPa (2000°C)	ASTM E21, Essai de traction	Excellente rétention de la résistance
Dureté à haute température	300-400 HV (1500°C)	Testeur de dureté haute température	Durabilité soutenue
Taux de fluage	<10 ⁻⁶ s ⁻¹ (1800°C)	Test de fluage	Résistance supérieure à la déformation



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 5 : Normes relatives au fil de tungstène résistant aux coupures

Le fil de tungstène résistant aux coupures, en tant que matériau haute performance, nécessite le respect d'une série de normes internationales et nationales dans sa production, son contrôle de la qualité et son application pour garantir la cohérence des performances, la conformité de l'industrie et la compétitivité du marché. Ce chapitre passe systématiquement en revue le cadre réglementaire applicable aux fils de tungstène résistant aux coupures, englobant l'Organisation internationale de normalisation (ISO), l'American Society for Testing and Materials (ASTM), les normes nationales chinoises (GB/T) et les réglementations spécifiques à l'industrie, en détaillant leurs rôles et applications dans l'industrie du fil de tungstène.

5.1 Normes internationales

Les normes internationales fournissent un cadre unifié pour le commerce mondial, les échanges techniques et la gestion de la qualité des fils de tungstène résistants aux coupures, couvrant les systèmes de gestion de la qualité, les tests de performance des matériaux, la sécurité environnementale et les exigences d'applications spécifiques.

5.1.1 Normes ISO

Les normes ISO sont largement appliquées dans la production de fils de tungstène, dans les domaines de la qualité, de l'environnement, de la sécurité et des tests de performance.

- **ISO 9001:2015**

Nom français : Système de Management de la Qualité

Nom anglais : Quality Management Systems

Nom chinois : 质量管理体系

Année de sortie/révision : 2015

Champ d'application : Gestion du processus de production

Exigences spécifiques : Exige des entreprises qu'elles mettent en place un système de gestion des processus complets, de l'approvisionnement en matières premières à la livraison des produits, garantissant la traçabilité. Les fabricants de fils de tungstène doivent se soumettre à des audits annuels, avec des coûts de certification allant de 200 000 à 500 000 RMB et un délai de 6 à 12 mois.

Scénario d'application : Le fil de tungstène résistant aux coupures exporté vers l'Europe et l'Amérique du Nord nécessite souvent une certification ISO 9001 pour renforcer la confiance des clients.

- **ISO 14001:2015**

Nom français : Systèmes de gestion environnementale

Nom anglais : Environmental Management Systems

Nom chinois : 环境管理体系

Année de sortie/révision : 2015

Champ d'application : Exigences environnementales

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Exigences spécifiques : Favorise la production verte, exigeant la surveillance et la réduction des émissions lors du frittage et de l'étirage (par exemple, émissions de CO₂ <500 kg par tonne de fil de tungstène, teneur en métaux lourds dans les eaux usées <0,1 mg/L).

Scénario d'application : S'aligne sur les tendances en matière de durabilité, particulièrement strictes dans les industries photovoltaïque et électronique.

- **ISO 45001:2018**

Nom français : Systèmes de gestion de la santé et de la sécurité au travail

Nom anglais : Occupational Health and Safety Management Systems

Nom chinois : 职业健康安全管理体系

Année de sortie/révision : 2018

Champ d'application : Sécurité de la production

Exigences spécifiques : Réglemente les opérations à haut risque telles que le frittage à haute température (2200-2500°C) et le dessin, dans le but de réduire les taux d'accidents de 30 %, avec une formation régulière à la sécurité et la maintenance de l'équipement. Les coûts de certification varient de 100 000 à 300 000 RMB.

Scénario d'application : Assure la sécurité des travailleurs et améliore la stabilité de la production.

- **ISO 6892-1:2019**

Nom français : Matériaux métalliques - Essais de traction

Nom anglais : Metallic Materials - Tensile Testing

Nom chinois : 金属材料拉伸试验

Année de sortie/révision : 2019

Champ d'application : Essais de performances mécaniques

Exigences spécifiques : S'applique aux essais de résistance à la traction et de ductilité du fil de tungstène à des températures ambiantes et élevées (par exemple, 2000°C), garantissant que les propriétés mécaniques répondent aux normes (résistance à la traction du fil de tungstène résistant aux coupures : 2000-2500 MPa).

Scénario d'application : Exigences de résistance élevées dans les applications de découpe photovoltaïque et aérospatiales.

- **ISO 22489:2016**

Nom français : Analyse par microfaisceaux - Microanalyse par sonde électronique

Nom anglais : Microbeam Analysis - Electron Probe Microanalysis

Nom chinois : 微束分析 - 电子探针显微分析

Année de sortie/révision : 2016

Domaine d'application : Essais de composition

Exigences spécifiques : Détecte la composition microscopique à la surface et à l'intérieur du fil de tungstène, nécessitant des niveaux d'impuretés (par exemple, oxygène, azote) <20 ppm.

Scénario d'application : Assure la cohérence de la qualité dans les applications électroniques et médicales haut de gamme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ISO 10993-1:2018**

Nom français : Évaluation biologique des dispositifs médicaux

Nom anglais : Biological Evaluation of Medical Devices

Nom chinois : 医疗器械生物相容性评价

Année de sortie/révision : 2018

Champ d'application : Fil de tungstène médical

Exigences spécifiques : Pour le fil de tungstène revêtu à usage médical, évalue la toxicité, l'irritation et l'allergénicité, garantissant l'absence de libération de substances nocives. Les coûts de certification varient de 400 000 à 800 000 RMB.

Scénario d'application : Applicable aux dispositifs médicaux implantables.

- **ISO/AWI 24370-2 (Under Development)**

Nom français : Fil fin de tungstène - Partie 2 (en cours de développement)

Nom anglais : Fine Wire of Tungsten - Part 2 (Under Development)

Nom chinois : 细线钨丝第 2 部分（在研）

Année de sortie/révision : 2026 prévue

Champ d'application : Fil de tungstène à l'échelle nanométrique

Exigences spécifiques : Cible le fil de tungstène à l'échelle nanométrique (diamètre <1 µm), nécessitant une tolérance dimensionnelle ±0,2 µm et une finition de surface Ra <0,05 µm.

Scénario d'application : Semi-conducteurs et capteurs de nouvelle génération.

5.1.2 Normes ASTM et autres normes internationales

Les normes ASTM fournissent des spécifications détaillées pour les propriétés des matériaux et les processus de production du fil de tungstène, largement adopté sur le marché nord-américain.

- **ASTM B760-07 (Revised 2019)**

Nom français : Spécification standard pour les plaques, les feuilles et les feuilles de tungstène

Nom anglais : Standard Specification for Tungsten Plate, Sheet, and Foil

Nom chinois : 钨板、片和箔

Année de sortie/révision : 2019

Champ d'application : Exigences de pureté et de performance

Exigences spécifiques : Spécifie la pureté du matériau en tungstène >99,95 %, avec des impuretés (par exemple, Fe, Mo) <50 ppm, souvent étendue à la production de fils de tungstène.

Scénario d'application : Garantit la qualité des matières premières pour la production de fils de tungstène résistants aux coupures.

- **ASTM B777-20**

Nom français : Spécification standard pour la base de tungstène, métal haute densité

Nom anglais : Standard Specification for Tungsten Base, High-Density Metal

Nom chinois : 钨基高密度合金

Année de sortie/révision : 2020

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Champ d'application : Fil de tungstène composite

Exigences spécifiques : Nécessite une densité $>17 \text{ g/cm}^3$ et une résistance à la traction $>1500 \text{ MPa}$.

Scénario d'application : Composites renforcés de fils de tungstène dans les applications aérospatiales et militaires.

- **ASTM E8/E8M-21**

Nom français : Méthodes d'essai normalisées pour les essais de traction des matériaux métalliques

Nom anglais : Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

Nom chinois : 金属材料拉伸试验方法

Année de sortie/révision : 2021

Champ d'application : Performance à haute température

Exigences spécifiques : Affine les essais de vitesse de déformation et de ténacité à la rupture à différentes températures, nécessitant une déformation par fluage $<0,005 \text{ %/h}$ à 1000 °C .

Scénario d'application : Environnements à haute température comme les aubes de turbine à gaz.

- **ASTM F1925-17**

Nom français : Spécification standard pour les matériaux semi-conducteurs en tungstène

Nom anglais : Standard Specification for Semiconductor Tungsten Materials

Nom chinois : 半导体用钨材料规范

Année de sortie/révision : 2017

Champ d'application : Découpe de semi-conducteurs

Exigences spécifiques : Nécessite une pureté $>99,999 \text{ %}$, une consistance de diamètre $\pm 0,5 \text{ }\mu\text{m}$ et une résistivité $<5,0 \text{ }\mu\Omega \cdot \text{cm}$.

Scénario d'application : Découpe microfine dans la fabrication de copeaux.

- **AMS 7880**

Nom français : Propriétés à haute température du fil de tungstène

Nom anglais : Tungsten Wire High-Temperature Properties

Nom chinois : 钨丝高温性能规范

Année de sortie/révision : Non spécifiée

Champ d'application : Applications aérospatiales à haute température

Exigences spécifiques : Nécessite un taux de fluage de $<0,01 \text{ %/h}$ à 2500 °C , la certification prenant 1 à 2 ans et coûtant 500 000 à 1 000 000 RMB.

Scénario d'application : Tuyères de fusée et pales de turbine.

- **JIS H 4461:2002**

Nom français : Fil de tungstène (norme industrielle japonaise)

Nom anglais : Tungsten Wire (Japanese Industrial Standard)

Nom chinois : 钨丝（日本工业标准）

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Année de sortie/révision : 2002

Champ d'application : Instruments de précision

Exigences spécifiques : Nécessite des surfaces exemptes de fissures et une résistance à la traction >2200 MPa.

Scénario d'application : Instruments et équipements d'éclairage de précision, complétant les normes ISO.

- **EN 10204:2004**

Nom français : Produits métalliques - Types de documents d'inspection

Nom anglais : Metallic Products - Types of Inspection Documents

Nom chinois : 金属产品检验文件

Année de sortie/révision : 2004

Champ d'application : Certification de la qualité

Exigences spécifiques : Exige que le fil de tungstène soit expédié avec un certificat de matériau de type 3.1 pour la traçabilité de la qualité.

Scénario d'application : Exportations vers le marché de l'UE.

5.2 Normes nationales chinoises et réglementations de l'industrie

Les normes chinoises s'alignent sur les besoins de l'industrie nationale, couvrant les matières premières, la production, les tests de performance et les applications émergentes du fil de tungstène.

5.2.1 Normes GB/T

Les normes GB/T fournissent des spécifications fondamentales pour le fil de tungstène résistant aux coupures, adapté à la production à grande échelle et au contrôle de la qualité.

- **GB/T 3459-2017**

Nom français : Poudre de tungstène

Nom anglais : Tungsten Powder

Nom chinois : 钨粉

Année de sortie/révision : 2017

Champ d'application : Pureté de la matière première

Exigences spécifiques : Nécessite une pureté de poudre de tungstène >99,95 %, taille des particules 10-50 µm.

Scénario d'application : Frittage de la matière première pour fil de tungstène, impactant directement les coûts de production (450-1 100 RMB/kg).

- **GB/T 4181-2017**

Nom français : Barres de tungstène

Nom anglais : Tungsten Bars

Nom chinois : 钨棒

Année de sortie/révision : 2017

Champ d'application : Qualité et pureté de surface

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Exigences spécifiques : Surface exempte d'oxydes et de fissures, pureté >99,95 %.

Scénario d'application : S'étend à la production de fil de tungstène, applicable dans la découpe photovoltaïque.

- **GB/T 4197-2017**

Nom français : Tungsten Wire

Nom anglais : Tungsten Wire

Nom chinois : 钨丝

Année de sortie/révision : 2017

Champ d'application : Découpe de fils et électronique

Exigences spécifiques : tolérance de diamètre $\pm 1 \mu\text{m}$, résistance à la traction 2000-2500 MPa, allongement à la rupture >2 %.

Scénario d'application : Industries de la découpe de fil et de l'électronique.

- **GB/T 17492-2019**

Nom français : Méthodes d'analyse chimique du tungstène et des alliages de tungstène

Nom anglais : Chemical Analysis Methods for Tungsten and Tungsten Alloys

Nom chinois : 钨及钨合金化学分析方法

Année de sortie/révision : 2019

Champ d'application : Contrôle des impuretés

Exigences spécifiques : Teneur en fer <30 ppm, molybdène <10 ppm.

Scénario d'application : Stabilité du fil de tungstène dans les applications de haute pureté.

- **GB/T 43293-2023**

Nom français : Méthode d'essai des propriétés à haute température du fil de tungstène

Nom anglais : Test Method for High-Temperature Properties of Tungsten Wire

Nom chinois : 钨丝高温性能测试方法

Année de sortie/révision : 2023

Champ d'application : Applications de la fusion nucléaire

Exigences spécifiques : Teste la résistance à l'oxydation et les propriétés de fluage à 2000-2500°C, taux de perte de poids <0,5 mg/cm²/h.

Scénario d'application : Composants à base de tungstène dans les dispositifs de fusion nucléaire.

- **GB/T 41319-2022**

Nom français : Spécification pour le fil de tungstène dans les applications photovoltaïques

Nom anglais : Specification for Tungsten Wire in Photovoltaic Applications

Nom chinois : 光伏用钨丝规范

Année de sortie/révision : 2022

Champ d'application : Découpe photovoltaïque

Exigences spécifiques : Diamètre 20-50 μm , taux de casse <0,8 %, rugosité de surface Ra <0,08 μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Scénario d'application : Améliore l'efficacité de coupe des plaquettes de silicium photovoltaïque de 10 %.

5.2.2 Règlements et certifications de l'industrie

Les réglementations industrielles, formulées par des entités telles que l'Association chinoise de l'industrie des métaux non ferreux, les secteurs militaire et nucléaire, complètent les normes nationales par des dispositions détaillées.

- **YS/T 1356-2020**

Nom français : Conditions techniques pour le fil de tungstène

Nom anglais : Technical Conditions for Tungsten Wire

Nom chinois : 钨丝技术条件

Année de sortie/révision : 2020

Champ d'application : Photovoltaïque et traitement du verre

Exigences spécifiques : La résistance à l'usure garantit une durée de vie de coupe >120 heures, une profondeur de défaut de surface <0,5 µm.

Scénario d'application : Domaines du traitement du photovoltaïque et du verre.

- **GJB 9001C-2017**

Nom français : Exigences du système de gestion de la qualité pour les produits militaires

Nom anglais : Quality Management System Requirements for Military Products

Nom chinois : 军用产品质量管理体系

Année de sortie/révision : 2017

Champ d'application : Applications militaires

Exigences spécifiques : Nécessite des systèmes de contrôle de qualité stricts pour la production de fil de tungstène, avec des produits finis accompagnés de certificats d'inspection militaire.

Scénario d'application : Missiles et composants blindés.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3 Tableau récapitulatif des normes relatives aux fils de tungstène résistants aux coupures

Pour faciliter la consultation, le tableau suivant résume de manière exhaustive les normes relatives aux fils de tungstène résistant aux coupures, y compris les chinois et les noms anglais, les années de sortie/révision, les portées et les exigences spécifiques.

Tableau 5.1 Normes relatives au fil de tungstène résistant aux coupures

Numéro standard	Nom français	Nom anglais	Libérer/ Année de révision	Portée	Exigences spécifiques
ISO 9001:2015	Systèmes de gestion de la qualité	Quality Management Systems	2015	Processus de production	Enregistrements complets, traçabilité
ISO 14001:2015	Systèmes de gestion environnementale	Environmental Management Systems	2015	Environnemental	Émissions de CO ₂ <500 kg/tonne
ISO 45001:2018	Systèmes de gestion de la santé et de la sécurité au travail	Occupational Health and Safety Management Systems	2018	Sécurité de la production	Taux d'accidents réduit de 30 %
ISO 6892-1:2019	Matériaux métalliques - Essais de traction	Metallic Materials - Tensile Testing	2019	Essais mécaniques	Résistance à la traction 2000-2500 MPa
ISO 22489:2016	Analyse par microfaisceaux - Microanalyse par sonde électronique	Microbeam Analysis - Electron Probe Microanalysis	2016	Test de composition	Impuretés <20 ppm
ISO 10993-1:2018	Évaluation biologique des dispositifs médicaux	Biological Evaluation of Medical Devices	2018	Fil de tungstène médical	Non toxique, non irritant
ASTM B760-07	Spécification standard pour les plaques, les feuilles et les feuilles de tungstène	Standard Specification for Tungsten Plate, Sheet, and Foil	2019	Pureté, performance	Pureté >99,95 %, impuretés <50 ppm
ASTM B777-20	Spécification standard pour la base de tungstène, métal haute densité	Standard Specification for Tungsten Base, High-Density Metal	2020	Fil de tungstène composite	Densité >17 g/cm ³
ASTM E8/E8M-21	Méthodes d'essai normalisées pour les essais de traction des matériaux métalliques	Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials	2021	Performances à haute température	Déformation lente <0,005 %/h
ASTM F1925-17	Spécification standard pour les matériaux semi-conducteurs en tungstène	Standard Specification for Semiconductor Tungsten Materials	2017	Découpe de semi-conducteurs	Pureté >99,999 %, résistivité <5,0 μΩ·cm

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

AMS 7880	Propriétés à haute température du fil de tungstène	Tungsten Wire High-Temperature Properties	-	Aérospatiale haute température	Taux de fluage <0,01 %/h à 2500°C
JIS H 4461:2002	Fil de tungstène (norme industrielle japonaise)	Tungsten Wire (Japanese Industrial Standard)	2002	Instruments de précision	Résistance à la traction >2200 MPa
EN 10204:2004	Produits métalliques - Types de documents d'inspection	Metallic Products - Types of Inspection Documents	2004	Certification de la qualité	Certificat de matériau de type 3.1
GB/T 3459-2017	Poudre de tungstène	Tungsten Powder	2017	Pureté de la matière première	Pureté >99,95 %, taille des particules 10-50 µm
GB/T 4181-2017	Barres de tungstène	Tungsten Bars	2017	Qualité de surface, pureté	Sans oxyde, pureté >99,95 %
GB/T 4197-2017	Fil de tungstène	Tungsten Wire	2017	Découpe de fil, électronique	Résistance à la traction 2000-2500 MPa
GB/T 17492-2019	Méthodes d'analyse chimique du tungstène et des alliages de tungstène	Chemical Analysis Methods for Tungsten and Tungsten Alloys	2019	Contrôle des impuretés	Fe <30 ppm, Mo <10 ppm
GB/T 43293-2023	Méthode d'essai des propriétés à haute température du fil de tungstène	Test Method for High-Temperature Properties of Tungsten Wire	2023	Fusion nucléaire	Taux de perte de poids <0,5 mg/cm²/h
GB/T 41319-2022	Spécification pour le fil de tungstène dans les applications photovoltaïques	Specification for Tungsten Wire in Photovoltaic Applications	2022	Découpe photovoltaïque	Diamètre 20-50 µm, taux de casse <0,8 %
YS/T 1356-2020	Conditions techniques pour le fil de tungstène	Technical Conditions for Tungsten Wire	2020	Photovoltaïque, verre	Durée de vie de coupe >120 h, défauts <0,5 µm
GJB 9001C-2017	Exigences du système de gestion de la qualité pour les produits militaires	Quality Management System Requirements for Military Products	2017	Applications militaires	Certificat d'inspection militaire

5.4 Application et perspectives des normes

Ces normes jouent plusieurs rôles dans l'industrie du fil de tungstène résistant aux coupures. Les normes ISO 9001 et GB/T 4197 garantissent la cohérence de la production, les normes AMS 7880 et ISO 10993 répondent aux exigences haut de gamme dans les domaines de l'aérospatiale et de la médecine, tandis que les normes EN 10204 et YS/T 1356 renforcent la crédibilité sur le marché. À

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mesure que les technologies progressent (par exemple, le fil de tungstène imprimé en 3D, les applications à l'échelle nanométrique) et que les domaines interdisciplinaires se développent (par exemple, l'informatique quantique, l'exploration de l'espace lointain), de nouvelles normes se concentreront sur le contrôle dimensionnel ultra-fin (diamètre $<0,5 \mu\text{m}$), la résistance à la fragilité à basse température, les performances de vide ultra-élevé et la gestion de l'empreinte carbone.

- **Tendances futures :**

D'ici 2027, des normes internationales pour le fil de tungstène à l'échelle nanométrique pourraient émerger, exigeant une tolérance de diamètre $\pm 0,1 \mu\text{m}$ et des surfaces atomiquement lisses, ce qui stimulera les applications dans les dispositifs quantiques.

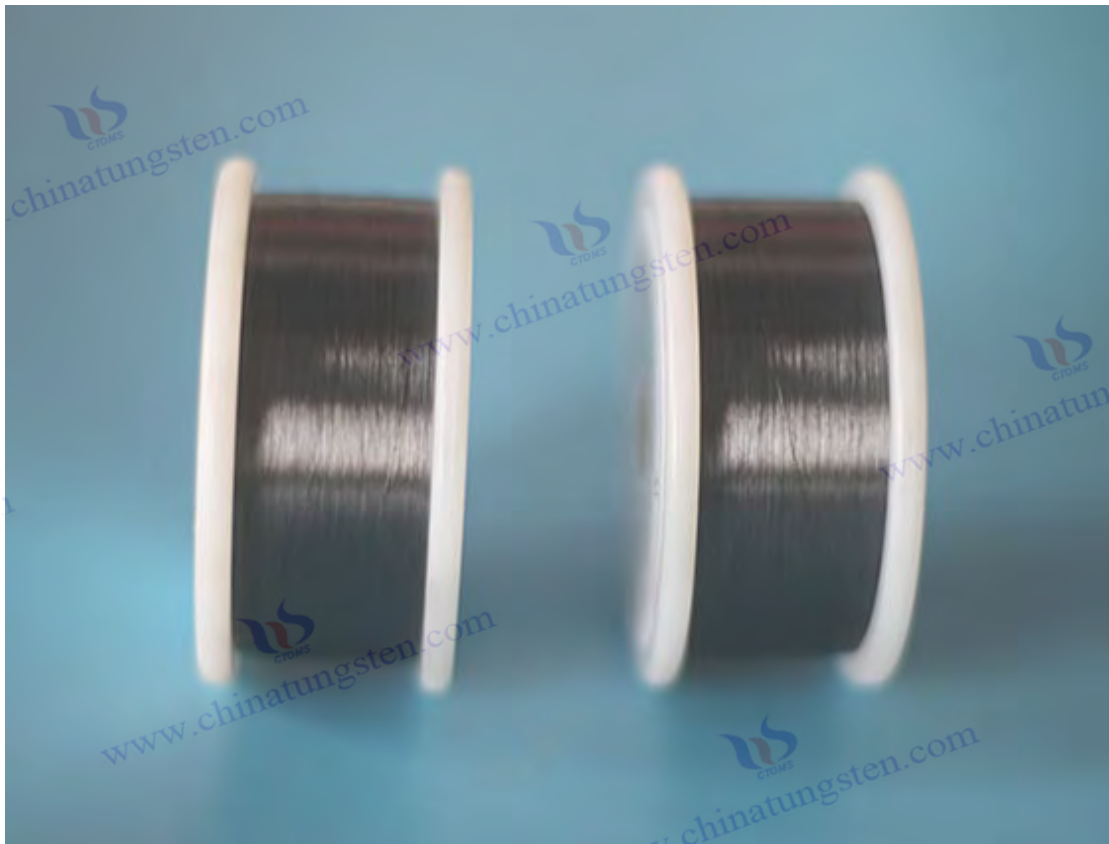
L'industrie photovoltaïque pourrait exiger une augmentation de 15 % de l'efficacité de coupe du fil de tungstène et une réduction des pertes de plaquettes de silicium, ce qui a entraîné des révisions de la norme GB/T 41319.

Les secteurs militaire et de la fusion nucléaire mettront l'accent sur la résistance aux radiations et la stabilité à haute température, en visant une dégradation des performances $<3 \%$.

- **Coûts et avantages :**

Les coûts de certification (200 000 à 1 200 000 RMB) augmentent les charges de production mais améliorent la qualité des produits et l'accès au marché, réduisant indirectement les coûts de reprise (environ 500 000 à 600 000 RMB par an).

Le développement parallèle de normes internationales et locales propulsera l'industrie du fil de tungstène vers des niveaux technologiques plus élevés et des domaines d'application plus larges.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Introduction

1. Overview of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Cut-Resistant Tungsten Wire is a high-performance industrial material made from high-purity tungsten powder through advanced powder metallurgy and precision wire-drawing processes. With outstanding high strength, wear resistance, and high-temperature stability, it is widely used in photovoltaic, semiconductor, aerospace, and electronic equipment industries. It excels particularly in high-precision wire-cutting applications.

3. Production Process of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Raw Material Selection: Uses high-purity tungsten powder.

Powder Metallurgy: High-temperature sintering and multiple forging processes produce dense tungsten rod billets.

Precision Wire Drawing: Multi-stage wire drawing with diamond dies ensures high-precision dimensional control.

Heat Treatment: Optimized grain structure through precise annealing processes enhances tungsten wire toughness and strength.

Surface Treatment: Electrolytic polishing technology ensures a defect-free, highly smooth tungsten wire surface.

4. CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Specifications

Item	Standard
Diameter (μm)	15-35 (Customizable)
Density (g/cm^3)	19.3
Tensile Strength (N/mm^2)	3600-4000
Vickers Hardness (HV)	800-850
Elongation	1%-3%
Tensile Force (N)	0.67-3.65

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel.: +86 592 5129595, 5129696

For more information on cut-resistant tungsten wire, please visit website: www.tungsten.com.cn.

For market updates and real-time information, scan the following QR code to follow our WeChat official account: "chinatungsten".



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 6 : Domaines d'application du fil de tungstène résistant aux coupures

6.1 Procédés de coupe de fil

Le fil de tungstène résistant aux coupures excelle dans les applications de coupe de fil en raison de sa résistance, de sa résistance à l'usure et de sa conductivité exceptionnelles, ce qui le rend indispensable dans la fabrication de précision, en particulier dans l'usinage par électroérosion (EDM) et la découpe à la scie à fil diamantée.

6.1.1 Usinage par électroérosion (EDM)

6.1.1.1 Rôle essentiel du fil de tungstène résistant aux coupures en tant qu'électrode dans l'électroérosion

L'usinage par électroérosion (EDM) enlève de la matière par des décharges d'étincelles, ce qui permet d'usiner des métaux de haute dureté ou des géométries complexes. Le fil de tungstène résistant aux coupures, qui sert d'électrode, tire parti de son excellente conductivité et de sa résistance aux hautes températures pour maintenir un fonctionnement stable sous des décharges pulsées à haute fréquence. Contrairement aux fils de cuivre ou de laiton traditionnels, le fil de tungstène résiste à la fusion ou à la rupture lors de la décharge, ce qui le rend idéal pour couper des matériaux difficiles comme l'acier moulé, les alliages de titane et les carbures cémentés. Son diamètre fin et sa précision permettent d'usiner des caractéristiques minuscules, telles que des fentes étroites ou des arêtes vives, répondant ainsi aux exigences de précision strictes de la fabrication moderne.

6.1.1.2 Avantages de la fabrication de moules de haute précision

Dans la fabrication de moules, le fil de tungstène résistant aux coupures offre des avantages inégalés. L'industrie exige des surfaces lisses et une grande précision géométrique, ce que le fil de tungstène atteint grâce à sa durabilité et sa stabilité. Comparé à d'autres matériaux d'électrode, le fil de tungstène présente une usure minimale sur plusieurs cycles de décharge, réduisant ainsi les interruptions de production dues au remplacement de l'électrode. De plus, sa finition de surface améliore la qualité des moules finis, couramment utilisés dans les moules d'emboutissage automobile, les moules d'injection et les moules de composants aérospatiaux. Par exemple, dans la production de matrices d'emboutissage de précision, le fil de tungstène coupe des contours complexes, maintenant la netteté et la cohérence des bords, prolongeant ainsi la durée de vie du moule et améliorant les taux de rendement des pièces embouties.

6.1.1.3 Études de cas sur l'usinage de pièces métalliques complexes

Le fil de tungstène résistant aux coupures a de nombreuses applications dans l'usinage de pièces complexes. Dans l'aérospatiale, il est utilisé pour produire des moules d'aubes de turbine, où le contrôle précis des paramètres de décharge permet de couper des surfaces de fond de pale complexes avec une précision de l'ordre du micron, réduisant ainsi le temps de polissage ultérieur d'environ 20 %. Dans la fabrication de dispositifs médicaux, le fil de tungstène facilite la production d'implants orthopédiques, tels que des micro-trous et des fentes dans les composants de remplacement du genou. En optimisant la fréquence et le courant de décharge, elle excelle dans

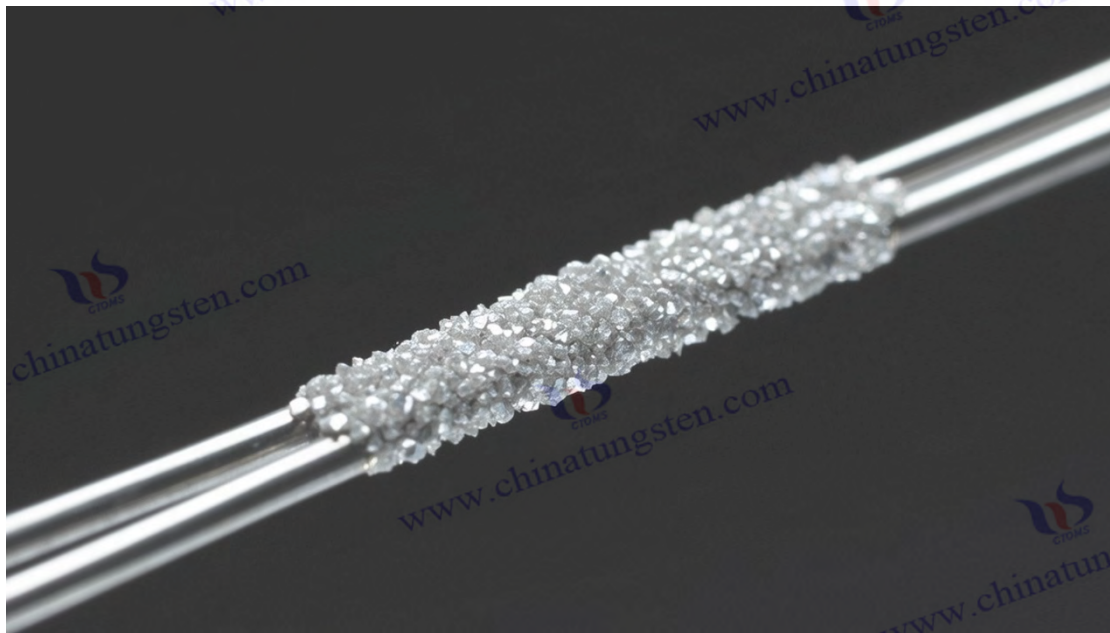
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'usinage des alliages de titane, atteignant un taux de rendement supérieur à 98 % et réduisant considérablement les taux de rebut. Ces exemples mettent en évidence la flexibilité et la fiabilité du fil de tungstène dans les domaines de haute technologie.

6.1.2 Découpe à la scie à fil diamanté

6.1.2.1 Fil de tungstène comme substrat pour les scies à fil diamanté

Les scies à fil diamanté, fabriquées en fixant des particules de diamant sur des surfaces de fil de tungstène, sont utilisées pour couper des matériaux durs. Le fil de tungstène résistant aux coupures, en tant que substrat, résiste à la tension et au frottement de la coupe à grande vitesse, assurant une fixation sûre du diamant et des performances efficaces. Par rapport aux substrats en fil d'acier, la ténacité et la résistance à la corrosion élevées du fil de tungstène offrent une plus grande stabilité lors d'un fonctionnement prolongé, en particulier dans des environnements humides ou acides. Son diamètre fin et son uniformité améliorent la flexibilité des scies à fil, permettant de découper des formes complexes ou des matériaux ultra-minces, ce qui en fait un composant essentiel de la technologie de coupe moderne.



6.1.2.2 Découpe de haute précision de plaquettes de semi-conducteurs et de plaquettes de silicium photovoltaïque

Dans les industries des semi-conducteurs et du photovoltaïque, les scies à fil diamanté avec des substrats en fil de tungstène sont largement utilisées pour couper les plaquettes de silicium. L'épaisseur de la plaquette de silicium doit être contrôlée avec précision au niveau du micron pour répondre aux exigences de performance de la fabrication de puces et de cellules solaires. La haute résistance à l'usure du fil de tungstène assure la stabilité lors de la coupe à grande vitesse, produisant des surfaces planes et sans fissures. Par exemple, dans la production de cellules

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

photovoltaïques, les scies à fil de tungstène découpent des lingots de silicium polycristallin en plaquettes de 150 microns d'épaisseur, traitant plus de 500 plaquettes par heure avec un taux de déchets inférieur à 5 %. Cette coupe efficace stimule l'utilisation des matériaux et pousse l'industrie photovoltaïque vers des coûts plus bas et une efficacité accrue. Dans la découpe de plaquettes de semi-conducteurs, les scies à fil de tungstène prennent en charge des diamètres de plaquettes de 150 mm à 300 mm, atteignant des taux de rendement supérieurs à 95 %, offrant un support fiable pour la fabrication de puces.

6.1.2.3 Applications de coupe dans la pierre, la céramique et d'autres matériaux durs

Les scies diamantées à fil de tungstène sont indispensables dans le traitement de la pierre et de la céramique. Lors de la coupe de marbre ou de granit, la haute résistance du fil de tungstène empêche la rupture sous tension, atteignant des vitesses de coupe de 15 à 20 mètres par minute et une épaisseur de dalle uniforme, idéale pour la décoration architecturale et la sculpture. Par exemple, dans les carrières de marbre de Carrare en Italie, les scies à fil de tungstène sont utilisées pour l'extraction et le traitement, coupant plus de 1 000 mètres carrés par session avec une efficacité dépassant de loin celle des scies à fil d'acier traditionnelles. Dans le traitement de la céramique, les scies à fil de tungstène coupent des matériaux de haute dureté comme l'alumine ou le nitrure de silicium, produisant des bords lisses et sans copeaux, souvent pour les substrats céramiques électroniques. Dans la production d'équipements 5G, les scies à fil de tungstène créent des micro-trous dans des substrats aussi petits que 0,1 mm, répondant ainsi aux exigences strictes de transmission du signal haute fréquence. Ces applications démontrent la polyvalence et l'efficacité du fil de tungstène dans le traitement des matériaux durs.

6.2 Composants fonctionnels dans des environnements à haute température

En raison de ses performances supérieures à haute température, le fil de tungstène résistant aux coupures est un matériau privilégié pour les composants fonctionnels dans des conditions extrêmes, en particulier dans les fours à haute température, la projection thermique, le soudage et les applications aérospatiales.

6.2.1 Éléments chauffants dans les fours à haute température

6.2.1.1 Applications du fil de tungstène dans les fours à gaz sous vide ou inerte

Dans les fours à haute température sous vide ou sous protection contre les gaz inertes (par exemple, l'argon), le fil de tungstène résistant aux coupures sert d'élément chauffant, fonctionnant de manière stable à des températures allant jusqu'à 2500 ° C. Sa conductivité thermique élevée permet un chauffage rapide, ce qui le rend idéal pour le recuit de plaquettes de semi-conducteurs, le frittage de métal et le durcissement de la céramique. Par rapport aux alliages traditionnels de nichrome, la faible pression de vapeur et la résistance à l'oxydation du fil de tungstène améliorent la durabilité dans les environnements sous vide, empêchant la volatilisation à haute température de contaminer le four. Par exemple, dans les fours de recuit de plaquettes de silicium, les éléments chauffants en fil de tungstène élèvent les températures à plus de 2000 ° C en quelques secondes, assurant une réparation rapide de la structure cristalline et améliorant les performances des puces.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2.1.2 Durabilité dans le recuit à haute température et le frittage

Lors du recuit et du frittage à haute température, la résistance à l'affaissement du fil de tungstène ne est un avantage clé. Le dopage potassique inhibe la croissance des grains, ce qui permet au fil de conserver sa forme après un fonctionnement prolongé à haute température, assurant ainsi une excellente uniformité du champ thermique. Ceci est essentiel dans le frittage de céramique, comme la production de céramiques dentaires en zircone, où les éléments chauffants en fil de tungstène supportent des centaines d'heures de fonctionnement continu, atteignant des densités frittées proches de 99 % de la valeur théorique, avec une résistance mécanique et une transparence répondant aux normes médicales. Dans la métallurgie des poudres, le fil de tungstène chauffe les pièces en alliage de tungstène pendant le frittage, garantissant des intérieurs sans porosité qui répondent aux normes de fiabilité aérospatiale. Ces applications soulignent la durabilité et la stabilité du fil de tungstène dans les processus à haute température.

6.2.2 Projection thermique et support de soudage

6.2.2.1 Composants en fil de tungstène dans la pulvérisation au plasma

La pulvérisation plasma utilise des arcs plasma à haute température pour déposer des revêtements résistants à l'usure ou à la corrosion, avec des fils de tungstène résistants aux coupures servant d'électrodes ou de supports, supportant des températures localisées supérieures à 3000° C. Sa durabilité et sa résistance à l'oxydation assurent la continuité du processus, couramment utilisée pour l'amélioration de la surface des aubes de moteurs d'avion et des moules industriels. Par exemple, dans le revêtement des aubes de turbine, les composants en fil de tungstène facilitent le dépôt uniforme de la couche de céramique (0,2 à 0,5 mm d'épaisseur), améliorant ainsi la résistance à la corrosion à haute température de plus de 30 %. Par rapport à d'autres matériaux, le point de fusion élevé et la stabilité du fil de tungstène réduisent la fréquence de remplacement des composants, ce qui réduit considérablement les coûts de production.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2.2.2 Fils-électrodes de tungstène dans le soudage au gaz inerte de tungstène (TIG)

Dans le soudage TIG, le fil de tungstène résistant aux coupures sert d'électrode, fournissant un arc stable à haute température pour le soudage de l'acier inoxydable, des alliages d'aluminium et des alliages de titane. Le fil de tungstène dopé au thorium ou au lanthane améliore l'efficacité de l'émission d'électrons, permettant une initiation rapide de l'arc et une grande précision de soudage. Ceci est crucial dans la fabrication de récipients sous pression et de pièces aérospatiales. Par exemple, dans la production de pipelines hydrauliques aérospatiaux, les fils-électrodes en tungstène ne réalisent des soudures sans soudure jusqu'à 10 mètres de long, avec une résistance de soudure proche de 98 % du matériau de base et des défauts minimes. Dans l'industrie de la construction navale, le fil de tungstène supporte le soudage de plaques d'acier inoxydable épaisses, avec des soudures résistantes à la corrosion répondant aux exigences de l'environnement marin, démontrant ainsi sa fiabilité dans les applications de soudage exigeantes.

6.2.3 Composants aérospatiaux à haute température

6.2.3.1 Matériaux renforcés de fil de tungstène dans les tuyères de moteurs de fusée

Les tuyères des moteurs-fusées résistent à l'érosion des gaz à haute température et à des contraintes thermiques extrêmes, tandis que le fil de tungstène résistant aux coupures, renforcé par le dopage au rhénium, renforce les composites qui conservent d'excellentes propriétés mécaniques au-dessus de 2000° C. Les revêtements résistants à l'oxydation prolongent encore la durée de vie de la buse, résistant à des centaines de cycles d'allumage. Dans les moteurs-fusées à propergol solide, les tuyères renforcées de fil de tungstène ne montrent aucune fissuration ou ablation après plusieurs essais au sol, avec des changements de diamètre de gorge inférieurs à 0,1 mm, assurant la stabilité de la poussée. Cette grande fiabilité en fait un composant essentiel dans les missions dans l'espace lointain.

6.2.3.2 Cathodes à fil de tungstène dans les propulseurs électriques

Dans les propulseurs électriques (par exemple, les propulseurs à effet Hall ou ioniques), le fil de tungstène résistant aux coupures sert de cathode, fournissant une émission efficace d'électrons pour l'orbite de l'engin spatial et le contrôle d'attitude. L'efficacité d'émission élevée du fil de tungstène dopé au lanthane et sa résistance au bombardement ionique permettent un fonctionnement au-dessus de 2000 ° C pendant plus de 1 000 heures. Dans les satellites de communication géosynchrone, les cathodes à fil de tungstène soutiennent les systèmes de propulseurs grâce à 10 000 allumages par impulsions, améliorant ainsi l'efficacité de la propulsion de 15 % et prolongeant la durée de vie des satellites. Dans les sondes de l'espace lointain, les cathodes à fil de tungstène assurent un fonctionnement stable du propulseur dans le vide, contribuant ainsi au succès des missions d'exploration planétaire.

6.3 Applications électroniques et électriques

Le fil de tungstène résistant aux coupures est prisé dans les applications électroniques et électriques pour sa conductivité, ses performances à haute température et sa stabilité, largement

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

utilisé dans les dispositifs à faisceau d'électrons, les systèmes de vide et l'éclairage.

6.3.1 Faisceaux d'électrons et appareils à rayons X

6.3.1.1 Filaments de fil de tungstène dans les microscopes électroniques et les tubes à rayons X

Les microscopes électroniques et les tubes à rayons X s'appuient sur des filaments de fil de tungstène comme sources d'émission d'électrons, tirant parti de leur point de fusion élevé et de leur efficacité d'émission. Fonctionnant de manière stable à 2500° C pendant des milliers d'heures, ils sont idéaux pour la science des matériaux et l'imagerie médicale. Dans les microscopes électroniques à balayage (MEB), les filaments de tungstène dopés au thorium prennent en charge l'imagerie à une résolution de 10 nanomètres, ce qui facilite l'analyse de la morphologie de surface des nanomatériaux. Dans les tubes à rayons X des scanners CT, les filaments de tungstène produisent des rayons X puissants et clairs, largement utilisés dans le diagnostic des maladies pulmonaires, améliorant considérablement la précision du diagnostic.

6.3.1.2 Sources à haute température dans le soudage par faisceau d'électrons

Le soudage par faisceau d'électrons utilise du fil de tungstène pour générer des faisceaux à haute température, offrant une profondeur et une précision supérieures à celles des méthodes traditionnelles. Sa stabilité assure une focalisation précise du faisceau, couramment utilisée dans les industries aérospatiale et automobile. Par exemple, dans la fabrication de disques de turbine d'avion, les faisceaux d'électrons en fil de tungstène soudent des plaques épaisses en alliage de titane à une profondeur de 50 mm, avec une résistance de soudure à 95 % du matériau de base. Dans la production automobile, le fil de tungstène prend en charge le soudage du corps en alliage d'aluminium, produisant des soudures sans pores qui répondent aux besoins de conception légère, soulignant son caractère indispensable dans le soudage de précision.

6.3.2 Équipement d'aspirateur

6.3.2.1 Bateaux d'évaporation en fil de tungstène en dépôt sous vide

Dans le dépôt sous vide, les bateaux d'évaporation de fil de tungstène vaporisent les métaux pour le dépôt de couches minces, largement utilisé dans l'optique et l'électronique. Leur résistance aux hautes températures et leur faible pression de vapeur assurent un revêtement efficace et uniforme. Dans le revêtement des lentilles optiques, les bateaux en tungstène déposent des films antireflets multicouches, réduisant la réflectivité en dessous de 1 % et améliorant la transmission de la lumière. Dans la fabrication de semi-conducteurs, le fil de tungstène prend en charge le dépôt de films de cuivre ou d'aluminium avec une uniformité d'épaisseur de ± 2 %, répondant aux exigences de performance des circuits intégrés, ce qui en fait un composant clé de la technologie de revêtement sous vide.

6.3.2.2 Sources d'ions en fil de tungstène dans les spectromètres de masse

Dans les spectromètres de masse, les sources d'ions à fil de tungstène génèrent des flux d'ions

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

stables pour l'analyse de masse moléculaire, leur résistance à haute température et leur stabilité d'émission permettant une détection précise. Dans le cadre de la surveillance de l'environnement, les sources d'ions tungstène analysent les composés organiques volatils (COV) dans l'atmosphère à une sensibilité en ppb, ce qui facilite l'identification des sources de pollution. Dans le domaine de la sécurité alimentaire, ils détectent les résidus de pesticides à des niveaux ng, garantissant ainsi le respect des normes de sécurité, démontrant leur fiabilité dans les tests scientifiques et industriels.

6.3.3 Éclairage et affichage

6.3.3.1 Électrodes en tungstène dans les lampes à décharge à haute intensité (DHI)

Les lampes HID (par exemple, les lampes au xénon) utilisent des électrodes en tungstène pour l'éclairage à haute luminosité, largement utilisées dans l'automobile et les systèmes de projection. Fonctionnant à 2000 ° C pendant plus de 2 000 heures, ils atteignent une luminosité allant jusqu'à 100 lumens par watt. Dans les phares de voiture, les électrodes en tungstène permettent un démarrage rapide et une sortie stable, améliorant la visibilité nocturne de 50 % et améliorant la sécurité de conduite. Dans les projecteurs de film, ils fournissent une lumière intense pour des images lumineuses et aux couleurs précises.

6.3.3.2 Filaments de fil de tungstène dans les lampes à incandescence et halogènes

Dans les lampes à incandescence et halogènes, les filaments de fil de tungstène sont réputés pour leurs performances à haute température et leur durabilité. Le cycle halogène réduit l'évaporation du tungstène, prolongeant la durée de vie du filament à des milliers d'heures. Dans les lampes halogènes haut de gamme, le tungstène fonctionne à 2600° C avec une température de couleur stable de 3200K, largement utilisé dans l'éclairage de studio pour une lumière douce et continue. Dans les ampoules à incandescence domestiques, le tungstène prend en charge un éclairage prolongé, restant un choix classique dans l'éclairage traditionnel.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4 Instruments médicaux et scientifiques

Le fil de tungstène résistant aux coupures répond aux besoins spécialisés dans les domaines médicaux et scientifiques grâce à sa précision et sa stabilité, largement utilisées dans les outils chirurgicaux et les instruments analytiques.

6.4.1 Outils chirurgicaux

6.4.1.1 Électrodes à fil de tungstène en électrochirurgie

En électrochirurgie, les électrodes en fil de tungstène résistantes aux coupures coupent et coagulent les tissus avec une résistance et une résistance à la température élevées, garantissant des procédures précises et efficaces, souvent dans la résection de tumeurs et la chirurgie cardiaque. Dans l'élimination du cancer du foie, les électrodes en tungstène séparent les tissus sous un courant à haute fréquence, réduisant les traumatismes de 30 % et le temps de récupération de 20 %. Leurs surfaces lisses minimisent l'adhérence des tissus, ce qui améliore la sécurité. Dans le cadre d'un pontage coronarien, ils permettent une manipulation précise des micro-vaisseaux, réduisant considérablement les risques de saignement.

6.4.1.2 Couper les fils de haute précision en chirurgie mini-invasive

En chirurgie mini-invasive, le fil de tungstène sert de ligne de coupe pour la neurochirurgie et l'ophtalmologie, avec son diamètre fin et sa résistance à la corrosion excellent dans les procédures complexes. Dans la chirurgie de la cataracte, le fil de tungstène divise les lentilles troubles, raccourcissant la chirurgie à 10 minutes avec un taux de récupération de la vision de 95 %. En neurochirurgie, il crée des micro-incisions dans le tissu cérébral avec une précision de 0,1 mm, évitant ainsi d'endommager les zones saines, soutenant des techniques peu invasives.

6.4.2 Instruments d'analyse

6.4.2.1 Détecteurs à fil de tungstène dans les spectromètres de masse

Dans les spectromètres de masse, les détecteurs à fil de tungstène offrent une résistance aux hautes températures et une réponse rapide pour une analyse précise. Dans le développement de médicaments, ils détectent les métabolites au niveau du picogramme, ce qui facilite l'identification des voies métaboliques. En géologie, ils prennent en charge l'analyse isotopique (par exemple, les rapports uranium-plomb dans les roches) avec une précision de 0,01 %, fournissant des données fiables pour la détermination de l'âge de la Terre, ce qui en fait un élément central dans les domaines analytiques.

6.4.2.2 Porte-échantillons à fil de tungstène à haute température dans les analyseurs thermogravimétriques

Dans les analyseurs thermogravimétriques, les porte-échantillons à fil de tungstène fonctionnent à 2500° C avec une forte capacité de charge et une stabilité de masse, garantissant des tests précis à haute température. Dans les études de pyrolyse des polymères, ils chauffent des é

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chantillons à 2000° C, enregistrant les courbes de perte de poids avec un écart de <0,5 %, analysant la stabilité thermique. Dans le domaine de la R&D céramique, ils prennent en charge le frittage d'échantillons à haute température, avec des résultats d'essais de performance alignés à 98 % sur les valeurs théoriques.

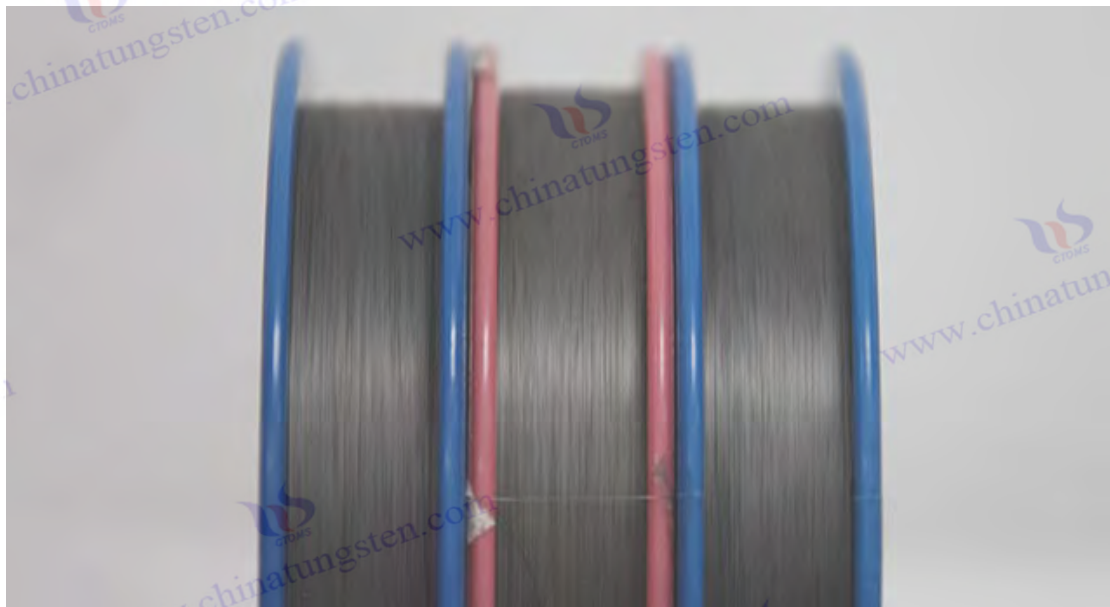
6.4.3 Recherche biomédicale

6.4.3.1 Électrodes à fil de tungstène dans l'électroporation de cellule

Dans l'électroporation cellulaire pour la transfection de gènes, les électrodes à fil de tungstène utilisent des impulsions à haute tension pour pénétrer les membranes cellulaires, leur conductivité et leur stabilité soutenant des expériences répétées. Dans l'édition de gènes CRISPR, ils atteignent une efficacité de transfection de 85 %, ce qui augmente le succès de l'insertion du gène. Dans la recherche sur les cellules souches, ils manipulent de grands lots de cellules, améliorant la cohérence de 20 %, ce qui facilite la médecine régénérative.

6.4.3.2 Réseaux de microélectrodes à fil de tungstène en neurosciences

En neurosciences, les réseaux de microélectrodes à fil de tungstène enregistrent les signaux neuronaux avec une grande précision et un faible bruit, leur taille fine permettant l'enregistrement d'un seul neurone dans les tissus cérébraux profonds. Dans des études sur le cortex de souris, ils capturent des signaux de décharge avec une résolution améliorée de 20 %, élucidant les mécanismes d'apprentissage et de mémoire. Dans des essais d'interface cerveau-ordinateur humain, ils enregistrent les signaux du cortex moteur pour le contrôle du bras robotique avec une précision de 90 %, faisant progresser la neuroadaptation.



6.5 Soutien à la fabrication et à la transformation industrielles

Le fil de tungstène résistant aux coupures améliore l'efficacité du traitement et la durabilité des

composants dans la fabrication industrielle, couvrant les textiles, la transformation des aliments et le verre/céramique.

6.5.1 Fabrication des textiles et du papier

6.5.1.1 Guide-fils en tungstène résistant à l'usure dans les machines textiles

Dans les machines textiles, les guide-fils de tungstène réduisent la perte de friction des fibres grâce à leur dureté et à leur résistance à l'usure. Dans les métiers à tisser à grande vitesse (5 000 tr/min), leurs surfaces lisses empêchent l'enchevêtrement et la rupture des fibres. Dans la filature du coton, ils durent plus de 1 000 heures, ce qui réduit les temps d'arrêt de 50 % et améliore la douceur du tissu. Dans la filature de la laine, ils réduisent les bavures, améliorant ainsi la qualité des textiles haut de gamme.

6.5.1.2 Composants auxiliaires en fil de tungstène dans les machines à papier

Dans les machines à papier, les composants en fil de tungstène (par exemple, les bagues de guidage) fonctionnent de manière stable dans des conditions humides et chaudes avec une forte résistance à la corrosion. Dans les machines à grande vitesse, ils améliorent la planéité du papier à 99 %, réduisant ainsi les temps d'arrêt liés à l'usure. Dans la production de papier journal, ils maintiennent leurs performances pendant plus de six mois, réduisant ainsi la fréquence d'entretien de 30 %. Dans la production de papier d'art, ils garantissent des surfaces impeccables pour une impression haut de gamme.

6.5.2 Transformation des aliments

6.5.2.1 Fil de tungstène résistant à la corrosion dans les lignes de découpe d'aliments

Dans la transformation des aliments, les lignes de coupe de fil de tungstène offrent une résistance à la corrosion et une précision pour le tranchage de la viande, du fromage et des légumes. Ils fonctionnent de manière fiable dans des conditions acides ou humides, assurant des coupes constantes. Dans les trancheuses automatisées, ils coupent 200 tranches de viande par minute avec une épaisseur uniforme et un rendement de 98 %, ce qui augmente l'efficacité. Dans la production de fromage, ils créent des formes complexes, réduisant les déchets de 10 % tout en répondant aux besoins d'emballage et d'esthétique.

6.5.2.2 Éléments chauffants en fil de tungstène dans les équipements de cuisson à haute température

Dans les équipements de cuisson à haute température, les éléments chauffants en fil de tungstène fournissent des champs de chaleur uniformes pour la production alimentaire à l'échelle industrielle, leur résistance à la température garantissant une fiabilité à long terme. Dans les lignes de production de pain, ils maintiennent une texture constante avec un écart de température minimal, améliorant l'efficacité de 15 %. Dans l'affinage de la viande, ils fonctionnent à 2000° C, ce qui accélère la transformation de 20 % et améliore la capacité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.5.3 Traitement du verre et de la céramique

6.5.3.1 Fil de tungstène à haute résistance dans la découpe du verre

Dans la découpe du verre, la résistance du fil de tungstène prend en charge les plaques épaisses et le traitement de précision, utilisé dans le verre optique et architectural. Il coupe du verre de 10 mm d'épaisseur avec des bords lisses et sans fissures. Dans la production d'écrans de smartphones, elle traite 1 000 pièces par heure avec un taux de défauts de <2 %, répondant ainsi aux exigences de qualité des écrans tactiles. Dans le verre des murs-rideaux, il assure une coupe précise à grande échelle, améliorant ainsi l'efficacité de l'installation.

6.5.3.2 Fil de tungstène pour la découpe et le perçage de substrats céramiques

Dans le traitement des substrats céramiques, le fil de tungstène coupe des matériaux de haute dureté (par exemple, le nitrure de silicium) avec des bords lisses et une longue durée de vie. En électronique, il perce des trous de 0,1 mm dans les substrats céramiques 5G, répondant ainsi aux besoins de signaux haute fréquence. Dans les pièces céramiques aérospatiales, il découpe des formes complexes comme des substrats de revêtement d'aubes de turbine, atteignant des normes de température et de résistance élevées, soulignant sa valeur dans le traitement avancé de la céramique.

6.6 Applications énergétiques et environnementales

Le fil de tungstène résistant aux coupures favorise l'utilisation efficace des ressources et la protection de l'environnement dans les domaines de l'énergie et de l'environnement, y compris l'énergie nucléaire, les énergies renouvelables et la gestion des déchets.

6.6.1 Énergie nucléaire

6.6.1.1 Composants de commande du fil de tungstène dans les réacteurs nucléaires

Dans les réacteurs nucléaires, les composants de contrôle du fil de tungstène régulent le flux de neutrons grâce à leur résistance aux températures élevées et aux radiations, fonctionnant à 2500° C avec une perte de résistance minimale pour un contrôle précis. Dans les réacteurs à neutrons rapides, ils améliorent la stabilité du flux de neutrons de 10 % au fil des ans, améliorant ainsi la sécurité. Dans les réacteurs refroidis au gaz à haute température, ils résistent aux radiations et aux contraintes thermiques pendant plus de cinq ans, servant de support critique.

6.6.1.2 Treillis métallique en tungstène dans le blindage contre les rayonnements

Le treillis métallique en tungstène, avec sa haute densité, protège les radiations, protégeant le personnel et l'équipement. Des fils de diamètre fin forment des filets légers et efficaces. En médecine nucléaire, ils bloquent plus de 90 % des rayons gamma, soit 20 % de moins que le plomb. Dans le stockage des déchets nucléaires, ils réduisent les fuites en tant que couches protectrices, garantissant ainsi la sécurité environnementale.

6.6.2 Énergie renouvelable

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.6.2.1 Découpe de fils de tungstène dans la fabrication de cellules solaires

Dans la production de cellules solaires, le fil de tungstène coupe les plaquettes de silicium, soutenant ainsi l'efficacité photovoltaïque. Sa résistance à l'usure assure une coupe stable et à haut rendement. Dans le tranchage de lingots de silicium monocristallin, il traite 600 plaquettes par heure, réduisant les coûts de 15 % grâce à un contrôle précis de l'épaisseur. Dans les cellules solaires à couche mince, il améliore la consistance du substrat de 10 %, faisant progresser l'adoption des énergies renouvelables.

6.6.2.2 Composants en fil de tungstène résistants à l'usure dans les éoliennes

Dans les éoliennes, les composants en fil de tungstène résistent à l'usure pour un fonctionnement à long terme, excellant dans des conditions difficiles. Dans les parcs éoliens offshore, ils supportent le sable et les embruns salins dans des mécanismes de réglage des pales, qui durent plus de 10 ans. À terre, ils prolongent les cycles de maintenance à cinq ans, ce qui améliore la fiabilité.

6.6.3 Gestion des déchets

6.6.3.1 Éléments chauffants en fil de tungstène dans les incinérateurs à haute température

Dans les incinérateurs à haute température, les éléments chauffants en fil de tungstène permettent une élimination efficace des déchets, fonctionnant à 2500° C pour une combustion complète dans le traitement des déchets médicaux et industriels. Dans l'incinération des déchets médicaux, ils atteignent une efficacité de >90 %, réduisant ainsi les émissions de 50 %. Dans les déchets chimiques dangereux, ils augmentent leur capacité de 20 %, ce qui témoigne de leur valeur environnementale.

6.6.3.2 Fils-électrodes en tungstène dans le traitement des eaux usées

Dans le traitement des eaux usées, les fils-électrodes en tungstène résistent à la corrosion lors de l'électrolyse, éliminant ainsi les métaux lourds et les polluants organiques. Dans les eaux usées industrielles, ils purifient l'eau contaminée au plomb avec une efficacité de 98 %. Dans les eaux usées municipales, ils éliminent l'azote ammoniacal avec une longue durée de vie, réduisant ainsi les coûts et favorisant le recyclage de l'eau.

6.7 Défense et sécurité

Le fil de tungstène résistant aux coupures répond aux exigences extrêmes de la défense et de la sécurité grâce à sa densité et sa résistance élevées, couvrant les matériaux perforants, la détection et les communications.

6.7.1 Matériaux perforants

6.7.1.1 Armure composite renforcée de fil de tungstène

Le blindage composite renforcé de fil de tungstène résiste aux projectiles à grande vitesse grâce

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à sa densité et à sa résistance aux chocs, utilisé dans les chars et les véhicules blindés. Sa ténacité absorbe l'énergie d'impact, améliorant ainsi la durabilité. À bord des chars de combat principaux, il augmente la protection de 30 % contre les obus perforants, réduisant ainsi le poids de 10 %. Dans les véhicules légers, il prend en charge des conceptions modulaires équilibrant mobilité et sécurité.

6.7.1.2 Noyaux de projectiles perforants à base de fil de tungstène

Les noyaux de projectiles à base de fil de tungstène offrent une dureté et une pénétration élevées pour les armes antichars, leur densité augmentant l'énergie cinétique. Avec les canons de char de 125 mm, ils pénètrent des plaques d'acier de 500 mm avec des taux de réussite de >90 %. Dans les armes antichars portables, ils permettent des conceptions compactes avec une pénétration robuste, vitale sur les champs de bataille modernes.

6.7.2 Détection et détection

6.7.2.1 Composants en fil de tungstène dans les capteurs à haute température

Dans les capteurs haute température, les composants en fil de tungstène offrent une réponse rapide et une durabilité pour la surveillance d'environnements extrêmes. Lors des essais de moteurs de missiles, ils mesurent la température en <0,1 seconde avec une grande précision. Dans les études volcaniques, ils enregistrent les changements de température de la lave à 2000° C, aidant à la prédiction de l'éruption, démontrant leur valeur dans la détection fiable.

6.7.2.2 Déclencheurs à fil de tungstène dans les dispositifs de détection d'explosifs

Dans la détection d'explosifs, les gâchettes à fil de tungstène offrent résistance et stabilité pour une détection rapide. Dans les aéroports, ils détectent des traces de TNT à des niveaux de ppm avec <1 % de faux positifs. Dans les zones de combat, ils permettent d'installer des détecteurs portables avec des temps de déclenchement courts, ce qui améliore l'efficacité et la sécurité.

6.7.3 Équipement de communication

6.7.3.1 Fil de tungstène à haute température dans les antennes de communication militaires

Dans les antennes militaires, le fil de tungstène résiste à des températures élevées pour la transmission du signal dans des conditions extrêmes. Dans les opérations dans le désert, ils fonctionnent à 1500° C pendant plus de cinq ans avec de faibles taux d'erreur. Dans les drones à haute altitude, ils résistent aux charges de vent, assurant le succès de la mission.

6.7.3.2 Réseaux réflecteurs en fil de tungstène dans les communications par satellite

Dans les communications par satellite, les réseaux réflecteurs en fil de tungstène améliorent la qualité du signal grâce à une densité et une réflectivité élevées. Les fils fins forment des filets légers et efficaces. Dans les satellites géosynchrones, ils augmentent le gain du signal de 10 dB, prenant en charge la vidéo HD. Dans les communications dans l'espace lointain, ils résistent aux radiations, ce qui facilite les missions interstellaires.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tableau 6.1 Vue d'ensemble des domaines d'application du fil de tungstène résistant aux coupures

Champ	Sous-champ	Application typique	Caractéristiques de performance	Avantages
Découpe de fil	EDM	Moules aubes de turbine	Haute résistance, conductivité	Haute précision, longue durée de vie
	Scie à fil diamanté	Plaquettes de silicium, pierre	Résistance à l'usure, ténacité	Haut rendement, grande surface de coupe
Composants haute température	Éléments chauffants	Fours à haute température	Conductivité thermique élevée, résistance à l'affaissement	Champ de chaleur uniforme, durabilité
	Projection thermique/soudage	Soudage TIG	Point de fusion élevé, efficacité des émissions	Soudures de haute qualité, longue durée de vie
	Aérospatial	Tuyères de fusée	Haute résistance à haute température	Résiste à plusieurs allumages
Électronique	Faisceau d'électrons/rayons X	Tubes à rayons X	Émission élevée, résistance à la chaleur	Imagerie claire, soudures profondes
	Équipement d'aspirateur	Bateaux d'évaporation	Faible pression de vapeur, uniformité	Revêtement efficace
	Éclairage/Affichage	Lampes HID	Haute luminosité, résistance à la corrosion	Longue durée de vie, sortie stable
Médical/Scientifique	Outils chirurgicaux	Chirurgie mini-invasive	Haute précision, résistance à la corrosion	Traumatisme minimal, haute sécurité
	Instruments d'analyse	Spectromètres de masse	Haute sensibilité, stabilité	Détection précise
	Recherche biomédicale	Électroporation	Stabilité de la tension, longue durée de vie	Efficacité de transfection élevée
Fabrication industrielle	Textiles/Papeterie	Guides de fil	Résistance à l'usure, surface lisse	Faible défaillance, grande planéité
	Traitement des aliments	Lignes de coupe	Résistance aux acides, précision	Sortie constante
	Verre/Céramique	Découpe du verre	Haute résistance, durabilité	Efficacité de traitement élevée
Énergie/Environnement	Énergie nucléaire	Composants de commande	Résistance aux rayonnements, haute densité	Longue durée de vie, blindage efficace
	Énergie renouvelable	Découpe de plaquettes de silicium	Résistance à l'usure, rendement élevé	Rentable
	Gestion des déchets	Incinérateurs	Résistance aux hautes températures, efficacité	Faibles émissions
Défense/Sécurité	Perforation d'armure	Noyaux de projectiles	Dureté élevée, pénétration	Protection renforcée
	Détection/Détection	Capteurs haute température	Réponse rapide, haute précision	Haute fiabilité
	Communications	Filets réflecteurs	Réflexivité élevée, résistance à la chaleur	Qualité de signal supérieure

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Introduction

1. Overview of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Cut-Resistant Tungsten Wire is a high-performance industrial material made from high-purity tungsten powder through advanced powder metallurgy and precision wire-drawing processes. With outstanding high strength, wear resistance, and high-temperature stability, it is widely used in photovoltaic, semiconductor, aerospace, and electronic equipment industries. It excels particularly in high-precision wire-cutting applications.

3. Production Process of CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire

Raw Material Selection: Uses high-purity tungsten powder.

Powder Metallurgy: High-temperature sintering and multiple forging processes produce dense tungsten rod billets.

Precision Wire Drawing: Multi-stage wire drawing with diamond dies ensures high-precision dimensional control.

Heat Treatment: Optimized grain structure through precise annealing processes enhances tungsten wire toughness and strength.

Surface Treatment: Electrolytic polishing technology ensures a defect-free, highly smooth tungsten wire surface.

4. CTIA GROUP LTD Cut-Resistant Tungsten Wire Specifications

Item	Standard
Diameter (μm)	15-35 (Customizable)
Density (g/cm^3)	19.3
Tensile Strength (N/mm^2)	3600-4000
Vickers Hardness (HV)	800-850
Elongation	1%-3%
Tensile Force (N)	0.67-3.65

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com Tel.: +86 592 5129595, 5129696

For more information on cut-resistant tungsten wire, please visit website: www.tungsten.com.cn.

For market updates and real-time information, scan the following QR code to follow our WeChat official account: "chinatungsten".

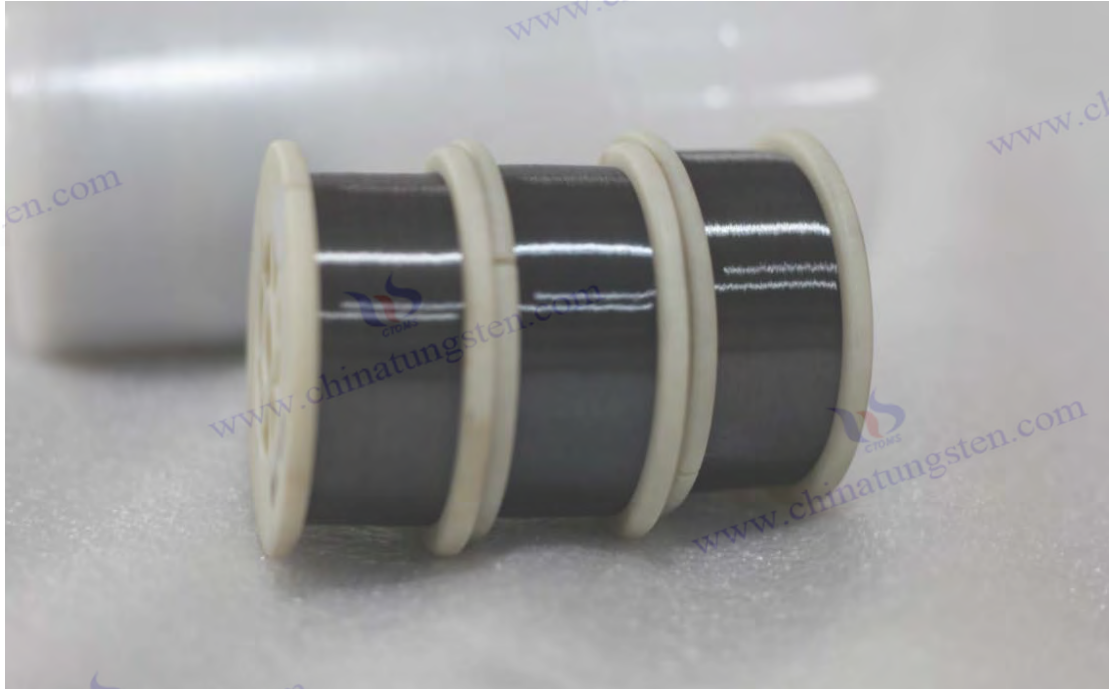


COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 7 : Sujets avancés et tendances futures du fil de tungstène résistant aux coupures

7.1 Nanotechnologie et fil de tungstène

Les progrès rapides de la nanotechnologie ont revitalisé le fil de tungstène résistant aux coupures, les propriétés uniques du fil de tungstène à l'échelle nanométrique ouvrant de vastes perspectives dans les domaines de haute technologie.



7.1.1 Préparation et propriétés du fil de tungstène à l'échelle nanométrique

Le fil de tungstène à l'échelle nanométrique fait référence au fil de tungstène d'un diamètre allant de 1 à 100 nanomètres, principalement préparé à l'aide de techniques avancées telles que le dépôt chimique en phase vapeur (CVD), le dépôt électrochimique ou le broyage à billes à haute énergie combiné au recuit. Par rapport au fil de tungstène traditionnel à l'échelle micronique, les versions à l'échelle nanométrique présentent une énergie de surface et une résistance mécanique nettement plus élevées en raison de la taille réduite des grains, tout en conservant une excellente conductivité et conductivité thermique à l'échelle microscopique. De plus, ils offrent une flexibilité et une résistance à la fatigue améliorées. Par exemple, le fil de tungstène à l'échelle nanométrique préparé par CVD présente une résistance à la rupture supérieure d'environ 20 % à celle du fil à l'échelle du micron, ce qui est attribué à l'augmentation de la densité des limites de grain et à un contrôle efficace des défauts, ce qui en fait un matériau idéal pour les dispositifs électroniques flexibles. Lors de la préparation, il est essentiel de contrôler avec précision le taux de dépôt des précurseurs de tungstène (par exemple, WF_6) et la température de recuit. Des études montrent que le recuit à 800-1000°C forme une structure monocristalline stable, améliorant encore les performances à haute température. Cependant, la réactivité de surface élevée du fil de tungstène à l'échelle nanométrique le rend sujet à l'oxydation en WO_3 dans l'air, limitant ainsi les conditions de stockage et d'utilisation.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les recherches actuelles se concentrent sur l'optimisation des processus de préparation pour améliorer le rendement et la cohérence. Par exemple, le CVD amélioré par plasma (PECVD) permet un dépôt à des températures plus basses (environ 600 °C), réduisant ainsi la consommation d'énergie et l'usure des équipements. De plus, l'utilisation de nanotubes de carbone ou de graphène comme modèles permet de créer des réseaux de fils de tungstène ordonnés, augmentant la conductivité d'environ 15 % et ouvrant la voie à des conducteurs haute performance. Les propriétés mécaniques du fil de tungstène à l'échelle nanométrique sont également influencées par l'orientation des grains, une analyse récente de diffraction des rayons X (XRD) indiquant que les fils orientés <110> présentent une plus grande ductilité lors des essais de traction, fournissant une base théorique pour la conception ultérieure du processus. Ces progrès suggèrent que les techniques de préparation du fil de tungstène à l'échelle nanométrique mûrissent, jetant une base solide pour ses applications.

Tableau 7.1 Comparaison des méthodes de préparation et des propriétés du fil de tungstène à l'échelle nanométrique

Méthode de préparation	Conditions du processus	Gamme de diamètres	Amélioration clé des performances	Défis
CVD	Précurseur WF ₆ , recuit 800-1000°C	10 à 50 nm	Résistance à la rupture jusqu'à 20 %	Sensibilité à l'oxydation, coût élevé
Le PECVD	Dépôt à basse température à 600 °C	5 à 30 milles marins	Conductivité jusqu'à 15 %	Équipement complexe, faible rendement
Dépôt électrochimique	Dépôt d'électrolyte, température ambiante	20 à 80 milles marins	Flexibilité accrue	Mauvaise consistance
Broyage à billes à haute énergie + recuit	Meulage mécanique, recuit à 900°C	50 à 100 NM	Augmentation de l'énergie de surface	L'agglomération de particules, processus complexe

7.1.2 Applications potentielles et défis

Les applications potentielles du fil de tungstène à l'échelle nanométrique couvrent l'électronique flexible, le stockage d'énergie et la catalyse. Dans l'électronique flexible, il peut être tissé dans des réseaux conducteurs pour des capteurs et des écrans portables, sa grande flexibilité assurant un fonctionnement stable en cas de flexion répétée. Par exemple, dans les tissus intelligents, des couches conductrices de fil de tungstène à l'échelle nanométrique surveillent la fréquence cardiaque et la température en temps réel, avec des temps de réponse inférieurs à 1 milliseconde et une précision de ±0,5 %. Dans le stockage d'énergie, sa grande surface en fait un matériau d'électrode prometteur pour les batteries lithium-ion ou les supercondensateurs, augmentant la densité de stockage de 15 à 30 % et doublant les taux de charge. En catalyse, ses propriétés photocatalytiques permettent la séparation de l'eau pour la production d'hydrogène, doublant ainsi l'efficacité par rapport aux matériaux traditionnels en tungstène, faisant progresser les technologies d'énergie propre.

Son potentiel s'étend également aux systèmes biomédicaux et nanomécaniques. En biomédecine, le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fil de tungstène nanométrique modifié en surface peut servir de support d'administration de médicaments, sa grande surface permettant une plus grande charge de médicaments, par exemple pour les médicaments de chimiothérapie dans le traitement ciblé contre le cancer, améliorant l'efficacité de libération d'environ 25 %. Dans les systèmes nanomécaniques, sa résistance et sa conductivité élevées en font un composant essentiel pour les micro-actionneurs, tels que l'entraînement de minuscules bras robotiques dans les nanorobots avec une précision submicronique. Cependant, des défis restent importants. Les coûts de préparation élevés, dus aux équipements PECVD et aux dépenses liées aux précurseurs, entravent la production à grande échelle. De plus, sa stabilité dans des environnements à haute température ou oxydatifs est limitée, ce qui nécessite des revêtements antioxydants ou un dopage aux terres rares (par exemple, le lanthane) pour améliorer la durabilité. La sécurité environnementale est une autre préoccupation, car les nanoparticules peuvent présenter des risques de toxicité par inhalation ou par contact avec la peau ; Des études récentes suggèrent que la passivation de surface réduit la bioactivité. Il est essentiel de résoudre ces problèmes par la conception des matériaux, l'optimisation des processus et les évaluations de la sécurité pour faire passer le fil de tungstène à l'échelle nanométrique du laboratoire à l'industrie.

Tableau 7.2 Applications potentielles et défis techniques du fil de tungstène à l'échelle nanométrique

Domaine d'application	Application typique	Avantage en termes de performance	Défis techniques	Solutions
Électronique flexible	Capteurs portables	Temps de réponse <1 ms	Coût de préparation élevé	Optimiser le processus PECVD
Stockage de l'énergie	Électrodes de batterie Li-ion	Densité de stockage en hausse de 15 % à 30 %	Faible stabilité à haute température	Dopage aux terres rares
Catalyse	Production d'hydrogène photocatalytique	Efficacité doublée	Sensibilité à l'oxydation	Revêtements antioxydants
Biomédical	Transporteur d'administration de médicaments	Efficacité de relâchement en hausse de 25 %	Toxicité potentielle	Surface passivation
Nanomécanique	Micro-actionneurs	Précision submicronique	Mauvaise consistance	Préparation assistée par modèle

7.2 Matériaux composites et technologies de revêtement

Les progrès réalisés dans le domaine des matériaux composites et des technologies de revêtement fournissent un support solide pour optimiser les performances du fil de tungstène résistant aux coupures, élargissant ainsi ses applications dans des conditions extrêmes.

7.2.1 Composites renforcés de fils de tungstène

Les composites renforcés de fil de tungstène intègrent du fil de tungstène résistant aux coupures dans des matrices de céramique, de métal ou de polymère, améliorant ainsi considérablement les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

propriétés globales du matériau. La résistance et la ténacité élevées du fil compensent la fragilité ou les basses limites de température de la matrice. Par exemple, dans les composites à matrice céramique (CMC) renforcés de fils de tungstène, le fil augmente la résistance à la rupture de 30 à 50 % et augmente la limite de température au-delà de 2000 °C. Ce matériau excelle dans l'aérospatiale, comme dans la fabrication d'aubes de turbines à gaz, supportant un flux d'air à grande vitesse et des contraintes thermiques avec une durée de vie deux fois supérieure à celle des céramiques traditionnelles. Dans les composites à matrice métallique (MMC), la combinaison de fils de tungstène avec des alliages à base de nickel ou de titane crée des composants à haute densité et à haute résistance, tels que des connecteurs de moteurs d'avion, améliorant la résistance à la fatigue de 40 % et réduisant le poids de 10 %.

Les progrès des techniques de préparation améliorent encore ces composites. Le pressage isostatique à chaud (HIP) à haute pression et température (par exemple, 200 MPa, 1800°C) assure une liaison interfaciale étroite, réduisant la porosité en dessous de 1 % et augmentant la fiabilité. La métallurgie des poudres avec infiltration convient aux formes complexes, telles que les tuyères de fusée, où les composites de tungstène renforcés de fils de tungstène atteignent des structures à gradient - résistance aux hautes températures à l'intérieur et résistance à l'oxydation à l'extérieur - performances d'équilibrage. Cependant, les déséquilibres de dilatation thermique entre le fil et la matrice peuvent induire des contraintes interfaciales et des microfissures. Des études récentes proposent l'ajout de couches de transition (par exemple, le molybdène ou le niobium) ou le dopage par gradient pour atténuer cela. Par exemple, dans les alliages de nickel renforcés de fils de tungstène, une couche de transition en molybdène réduit le risque de délamination interfaciale de 30 %, offrant des solutions pour des applications de haute fiabilité. Ces avancées signalent des progrès vers des performances plus élevées et une utilisation plus large.

Tableau 7.3 Types de matrices et améliorations des performances des composites renforcés de fil de tungstène

Type de matrice	Application typique	Amélioration des performances	Technique de préparation	Optimisation interfaciale
Céramique (CMC)	Pales de turbine à gaz	Résistance à la rupture jusqu'à 30 % à 50 %	Pressage isostatique à chaud (HIP)	Dopage par gradient
Métal (MMC)	Connecteurs aérodynamiques	Résistance à la fatigue jusqu'à 40 %	Métallurgie des poudres + Infiltration	Couche de transition Mo/Nb
Polymère	Joint haute température	Résistance à la température jusqu'à 500°C	Pressage à chaud	Activation de surface

7.2.2 Amélioration du rendement grâce aux revêtements de surface

Les technologies de revêtement de surface déposent des couches fonctionnelles sur le fil de tungstène, améliorant considérablement la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la résistance à l'oxydation. Les revêtements courants comprennent le carbure de tungstène (WC), le nitride de tungstène (WN) et l'alumine (Al₂O₃), appliqués par dépôt physique en phase vapeur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(PVD), dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ou pulvérisation plasma. Par exemple, les revêtements WC via CVD augmentent la résistance à l'usure de 2 à 3 fois, ce qui est idéal pour les outils de coupe à fort frottement. Dans l'aérospatiale, les revêtements WN réduisent la perte de poids par oxydation à 1000°C dans l'air à un dixième des niveaux non revêtus, prolongeant ainsi la durée de vie des composants à haute température. Dans les applications médicales, le fil de tungstène recouvert d'hydroxyapatite améliore la biocompatibilité des implants.

Les récentes avancées en matière de revêtement ajoutent des fonctionnalités supplémentaires. Dans l'électronique, les revêtements de graphène, collés via les forces de van der Waals, augmentent la conductivité d'environ 20 % tout en maintenant la flexibilité, ce qui convient aux conducteurs flexibles. Des études montrent que le graphène agit également comme une barrière thermique, réduisant les gradients de température de surface de 15 % à 2000 °C, prolongeant ainsi la durée de vie à haute température. En génie maritime, les revêtements composites (par exemple, WN+Ni) doublent la résistance à la corrosion par brouillard salin, s'adaptant aux équipements en haute mer. Cependant, la force de liaison revêtement-substrat doit être améliorée, car le délaminage à haute température persiste. Les conceptions multicouches, telles que les couches de base WC avec des couches supérieures Al₂O₃, réduisent le délaminage de 40 % grâce à la mise en tampon des contraintes. L'épaisseur du revêtement doit être contrôlée avec précision (1-5 µm) : trop épais réduit la flexibilité, trop mince offre une protection insuffisante. Ces améliorations orientent la technologie de revêtement vers une fiabilité et une multifonctionnalité accrues.

Tableau 7.4 Effets des revêtements de surface sur la performance des fils de tungstène

Type de revêtement	Méthode de dépôt	Amélioration des performances	Domaine d'application	Défis techniques
Carbure de tungstène (WC)	CVD	Résistance à l'usure jusqu'à 2-3x	Outils de coupe	Contrôle de l'épaisseur
Nitride de tungstène (WN)	PVD	Perte par oxydation réduite de 90 %	Aérospatial	Délamination à haute température
Graphène	Déposition de Van der Waals	Conductivité jusqu'à 20 %	Électronique flexible	Force d'adhérence
WN+Al ₂ O ₃ Multicouche	CVD+PVD	Délamination en baisse de 40 %	Composants haute température	Complexité du processus

7.3 Tendances futures

L'avenir du fil de tungstène résistant aux coupures sera façonné par l'innovation technologique, les exigences environnementales et les applications interdisciplinaires, ce qui promet des perspectives passionnantes.

7.3.1 Mise au point de nouveaux matériaux pour fils de tungstène

La recherche sur de nouveaux matériaux de fil de tungstène vise à dépasser les limites de performance actuelles dans les environnements extrêmes. Le dopage est un objectif clé, les éléments de terres rares (par exemple, le lanthane, le cérium) ou les métaux de transition (par exemple, le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rhénium, le molybdène) améliorant la résistance aux hautes températures et la résistance à l'oxydation. Des études montrent que le fil de tungstène dopé au rhénium réduit les taux de fluage de 50 % à 2500 °C, offrant de nouvelles options pour les composants aérospatiaux à haute température. Le développement de fils de tungstène nanostructurés pousse vers des tailles plus petites et des performances plus élevées, telles que le fil de tungstène poreux auto-assemblé avec une surface 2 à 3 fois plus grande, idéal comme support de catalyseur.

La recherche sur le fil de tungstène allié s'accélère. Les alliages ternaires tungstène-molybdène-rhénium combinent le point de fusion élevé du tungstène, la ductilité du molybdène et la résistance à la corrosion du rhénium, prolongeant la durée de vie en fatigue de 60 % par rapport au tungstène pur, avec un potentiel dans la fusion nucléaire et les sondes de l'espace lointain. La fabrication additive (impression 3D) révolutionne le formage des fils de tungstène. La fusion laser sur lit de poudre (LPBF) imprime des structures complexes telles que des grilles de fil de tungstène poreux avec un contrôle de porosité de 10 à 30 %, adaptées à la gestion thermique. Les alliages à haute entropie (HEA) comme le tungstène-niobium-molybdène-tantale conservent leur résistance à 2000°C grâce à une synergie multi-éléments. L'équilibre coût-performance reste un défi : les coûts des matières premières du fil de tungstène imprimé en 3D sont 50 % plus élevés que ceux du dessin traditionnel, ce qui nécessite une optimisation des processus pour une adoption industrielle.

Tableau 7.5 Orientations de développement et objectifs de rendement pour les nouveaux matériaux de fil de tungstène

Type de matériau	Technique de développement	Rendement cible	Domaine d'application	Progrès actuels
Tungstène dopé au rhénium	Dopage + Dessin	Taux de fluage en baisse de 50 %	Aérospatial	Production en petites séries
Tungstène nanoporeux	Auto-assemblage + recuit	Superficie multipliée par 2 à 3	Prise en charge du catalyseur	Validation en laboratoire
Alliage W-Mo-Re	Métallurgie des poudres	Durée de vie en fatigue jusqu'à 60 %	Fusion nucléaire	Tests de performance
Tungstène imprimé en 3D	LPBF	Porosité 10 %-30 %	Gestion thermique	Optimisation des processus

7.3.2 Considérations relatives à la durabilité et à l'environnement

La durabilité et les exigences environnementales remodelent la technologie du fil de tungstène. L'extraction et le raffinage du tungstène sont énergivores et polluants, nécessitant une métallurgie verte comme la biolixiviation, qui utilise des microbes pour extraire le tungstène, réduisant ainsi l'utilisation de produits chimiques et les eaux usées de ~70 %. Le recyclage et la réutilisation du fil de tungstène sont une priorité, la fusion à haute température ou la dissolution acide récupérant jusqu'à 80 % des déchets de fil. Dans le secteur de la découpe de fils, les taux de recyclage actuels sont de 30 %, mais la séparation électromagnétique et la purification chimique pourraient porter ce chiffre à 70 %, ce qui réduirait les besoins d'extraction primaire de tungstène.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le contrôle des émissions de carbone dans la production est essentiel. L'utilisation d'énergies renouvelables (par exemple, solaire, éolienne) pour le dessin et le traitement thermique réduit l'empreinte carbone de 40 à 50 %. Une usine européenne de fil de tungstène, dont 80 % de production est alimentée par l'énergie solaire, réduit les émissions de CO₂ de ~5 000 tonnes par an. Du côté de l'application, des alternatives à faible toxicité comme le fil dopé au lanthane remplacent le fil dopé au thorium, minimisant ainsi les risques de rayonnement pour une utilisation médicale et électronique. Les analyses du cycle de vie (ACV) montrent que l'optimisation des chaînes d'approvisionnement et l'allongement de la durée de vie réduisent l'impact environnemental de 30 %. Ces technologies vertes nécessitent un soutien politique et une collaboration industrielle pour le développement durable du fil de tungstène.

Tableau 7.6 Améliorations et effets de la durabilité du fil de tungstène

Mesure d'amélioration	Technique	Effet attendu	Défi de mise en œuvre	Situation actuelle
Métallurgie verte	Biolithiation	Baisse de 70 % des eaux usées	Mise à l'échelle du processus	Phase expérimentale
Recyclage de la ferraille	Séparation électromagnétique + purification	Recyclage jusqu'à 70 %	Coût élevé	Utilisation à petite échelle
Utilisation de l'énergie renouvelable	Énergie solaire	Empreinte carbone en baisse de 40 à 50 %	Investissement initial élevé	Adoption partielle en usine
Alternatives à faible toxicité	Dopage au lanthane	Réduction du risque de rayonnement	Validation des performances	Déploiement progressif

7.3.3 Exploration des applications interdisciplinaires

Les applications interdisciplinaires élargissent le potentiel du fil de tungstène dans les domaines émergents. En biomédecine, la combinaison du fil de tungstène et de l'ingénierie tissulaire (par exemple, un fil biodégradable avec des revêtements d'acide polylactique pour les stents vasculaires temporaires) est prometteuse. Des études indiquent une dégradation complète en six mois, ce qui favorise la régénération des cuves et réduit les risques à long terme. Dans la technologie quantique, le fil de tungstène ultra-fin sert de conducteur quantique pour les connexions à basse température dans l'informatique quantique, surpassant le cuivre avec une perte de transmission inférieure de 20 % à la 4K, comme dans les interconnexions de qubits.

Dans le domaine de l'énergie, le fil de tungstène pourrait servir à la fusion nucléaire, comme les composants de confinement du plasma dans le réacteur thermonucléaire expérimental international (ITER). Son point de fusion élevé et sa résistance aux radiations résistent à des impacts plasma de 5000 °C, avec des composites renforcés de fil de tungstène prolongeant la durée de vie de 50 % dans les environnements de fusion. Dans la fabrication intelligente, l'intégration du fil de tungstène avec des capteurs crée des outils de coupe adaptatifs, ajustant les paramètres en fonction de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

surveillance de l'usure en temps réel, augmentant l'efficacité de ~20 %. Par exemple, dans l'usinage de pièces aérospatiales, les outils adaptatifs ajustent la vitesse du fil de manière dynamique, réduisant ainsi la casse de 30 %. Dans l'exploration spatiale, le fil de tungstène soutient les systèmes de protection thermique des sondes planétaires, comme les atterrisseurs martiens, grâce à sa densité et à sa résistance à la chaleur garantissant l'intégrité structurelle dans des conditions extrêmes. Ces applications exigent une intégration profonde de la science des matériaux, de la physique et de l'ingénierie, propulsant la technologie du fil de tungstène vers de nouveaux sommets.

Tableau 7.7 Domaines d'application interdisciplinaires et performances clés du fil de tungstène

Domaine d'application	Application typique	Performance clé	Besoins techniques	Phase de développement
Biomédical	Endoprothèses dégradables	Se dégrade en 6 mois	Biocompatibilité	Recherche en laboratoire
Technologie quantique	Conducteurs quantiques	Perte de 20 % à basse température	Taille ultra-fine	Validation initiale
Fusion nucléaire	Plasma confinement	Vie en hausse de 50 %	Résistance aux radiations	Essais expérimentaux
Fabrication intelligente	Outils de coupe adaptatifs	Efficacité en hausse de 20 %	Intégration des capteurs	Développement de prototypes
Exploration spatiale	Protection thermique	Haute densité, résistance à la chaleur	Optimisation structurelle	Conception



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 8 : Analyse économique et industrielle du fil de tungstène résistant aux coupures

8.1 Analyse des coûts

En tant que matériau haute performance, les coûts de production et les avantages économiques du fil de tungstène résistant aux coupures ont un impact direct sur sa compétitivité sur le marché et son champ d'application.



8.1.1 Composition des coûts de production

Les coûts de production du fil de tungstène résistant aux coupures se composent principalement des matières premières, des techniques de traitement et de la consommation d'énergie.

Les matières premières en tungstène sont l'élément de coût de base. Selon les données de [Chinatungsten Online](#) pour 2024, le prix moyen du concentré de tungstène (65 % WO_3) est d'environ 137 000 RMB/tonne, le paratungstate d'ammonium (APT) est en moyenne de 203 000 RMB/tonne et la poudre de tungstène coûte environ 304,5 RMB/kg. Les calculs montrent que les matières premières représentent 40 à 50 % du coût total du fil de tungstène résistant aux coupures. Les techniques de traitement, y compris la métallurgie des poudres, le tréfilage et le traitement de surface, contribuent à hauteur de 25 à 30 %, le processus d'étirage étant coûteux en raison des multiples passes et des moules de précision (par exemple, les moules diamantés). La consommation d'énergie, principalement due au frittage à haute température (2200-2500°C) et au recuit, représente 15 à 20 % des coûts totaux, les dépenses d'électricité étant particulièrement importantes dans les régions où les prix de l'énergie sont élevés. De plus, l'utilisation d'éléments dopants (par exemple, rhénium, potassium) et de revêtements fonctionnels (par exemple, WC, WN) augmente encore les coûts, ajoutant 10 à 15 % dans la production de fils de tungstène haute performance.

La maîtrise des coûts est un enjeu majeur de la production. Par exemple, l'adoption de fours de frittage efficaces et d'énergies renouvelables peut réduire les dépenses énergétiques d'environ 20 %, tandis que le recyclage des déchets de fil de tungstène (augmentant les taux de récupération à 70 %) peut réduire la dépendance au tungstène primaire, économisant ainsi 15 à 25 % sur les coûts des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

matières premières. Cependant, l'amortissement des équipements et les coûts de main-d'œuvre ne peuvent être négligés, en particulier dans les petites et moyennes entreprises avec des niveaux d'automatisation plus faibles, où ces coûts indirects peuvent dépasser 10 % du total.

Dans l'ensemble, le coût de production du fil de tungstène résistant aux coupures varie de 450 à 1 100 RMB/kg, selon les spécifications et les exigences de performance. Les coûts des fils de tungstène nanométriques ou composites haute performance pourraient doubler, pour atteindre 1 500 à 2 200 RMB/kg. Le tableau ci-dessous détaille les principaux éléments de coût :

Tableau 8.1 Composition des coûts de production du fil de tungstène résistant aux coupures (estimation de 2025)

Catégorie de coût	Plage de proportions	Coût/KG (RMB)	Facteurs d'influence
Matières premières tungstène	40%-50%	180-550	Prix du minerai de tungstène, stabilité de l'approvisionnement
Techniques de traitement	25%-30%	110-330	Passes d'étirage, usure du moule
Consommation d'énergie	15%-20%	70-220	Température de frittage, prix de l'énergie
Matériaux supplémentaires	10%-15%	50-165	Éléments de dopage, type de revêtement
Autres (amortissements, etc.)	10%-15%	40-165	Automatisation des équipements, coûts de main-d'œuvre
Total	100%	450-1 100 (standard)	Produits haute performance : 1 500-2 200

Avis de non-responsabilité : Les données sont basées sur les informations sur le marché China Tungsten Online 2024 et les projections de tendances pour 2025, sous réserve des fluctuations dues aux prix des matières premières, aux facteurs géopolitiques et aux changements technologiques. À titre indicatif seulement.

8.1.2 Équilibre entre les coûts et le rendement

Dans la production réelle, l'équilibre entre les coûts et les performances est au cœur des décisions commerciales. Le fil de tungstène haute performance (par exemple, dopé au rhénium ou nanostructuré) offre une résistance, une résistance à l'usure et une stabilité thermique supérieures, améliorant considérablement la durée de vie et l'efficacité du produit en aval, mais à un coût élevé. Par exemple, le fil de tungstène dopé au rhénium coûte environ 1 500 à 1 700 RMB/kg, soit 50 à 100 % de plus que le fil standard, tout en doublant la durée de vie des composants aérospatiaux à haute température, réduisant indirectement les coûts de maintenance et de remplacement. À l'inverse, les options à faible coût comme le fil de tungstène pur conviennent aux applications moins exigeantes (par exemple, la coupe générale du fil) mais n'ont pas la durabilité et la précision requises pour les marchés haut de gamme.

Cet équilibre est également évident dans l'optimisation des processus. La réduction des passes d'emboutissage ou l'affinement des paramètres de recuit peuvent réduire les coûts de traitement de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10 à 15 %, mais peuvent compromettre la tolérance de diamètre ou l'état de surface, limitant ainsi l'utilisation dans les applications haut de gamme. Les entreprises doivent peser ces facteurs en fonction des marchés cibles, par exemple, l'industrie photovoltaïque privilégie le contrôle des coûts, tandis que l'aérospatiale met l'accent sur la performance.

8.2 L'offre et la demande du marché

La dynamique de l'offre et de la demande de fil de tungstène résistant aux coupures est influencée par le progrès technologique, la distribution industrielle et les conditions économiques mondiales, présentant des tendances en évolution.

8.2.1 Tendances de la demande sur le marché mondial

La demande de fil de tungstène résistant aux coupures provient principalement de l'aérospatiale, de la fabrication électronique, du photovoltaïque et des dispositifs médicaux. D'ici 2025, la demande mondiale devrait atteindre 5 000 à 6 000 tonnes par an, soit une augmentation de 30 % par rapport à 2020, avec un taux de croissance annuel composé (TCAC) de 5 % à 7 %. L'aérospatiale est le principal moteur, représentant 25 à 30 % de la demande, en raison de sa dépendance à l'égard de matériaux à haute température et résistants à l'usure - par exemple, la production de tuyères de fusée et de pales de turbine consomme ~1 500 tonnes par an. L'industrie photovoltaïque suit à 20 % à 25 %, stimulée par la croissance rapide de la découpe de plaquettes de silicium de cellules solaires, la découpe de lingots de silicium monocristallin nécessitant ~1 200 tonnes par an. La fabrication de produits électroniques et de dispositifs médicaux contribue à hauteur de 15 à 20 %, alimentée par la demande croissante de fil à l'échelle nanométrique dans l'électronique flexible et les outils chirurgicaux peu invasifs.

L'innovation technologique stimule encore la demande. Par exemple, l'équipement 5G augmente le besoin de découpe précise de substrats céramiques, entraînant une augmentation annuelle de 10 à 15 % de la demande de fil de tungstène de scie à fil diamanté. Au niveau régional, l'Asie-Pacifique (en particulier la Chine) domine avec plus de 50 % de la demande mondiale, grâce à ses pôles photovoltaïques et électroniques ; L'Amérique du Nord et l'Europe représentent respectivement 25 % et 20 %, en se concentrant sur les applications haut de gamme. À l'avenir, la croissance de la fabrication intelligente et des énergies renouvelables devrait faire grimper la demande, en particulier dans les marchés émergents (par exemple, l'Inde, l'Asie du Sud-Est), où la croissance de la demande pourrait dépasser 10 % d'ici 2030.

8.2.2 Chaîne d'approvisionnement et principaux producteurs

La chaîne d'approvisionnement en fil de tungstène résistant aux coupures est dominée par la Chine, qui produit plus de 80 % de l'approvisionnement mondial. China Tungsten Intelligent Manufacturing (CTIA GROUP), avec près de 30 ans d'expérience dans l'industrie du tungstène-molybdène, se spécialise dans la personnalisation mondiale flexible des produits en tungstène-molybdène, en adaptant les spécifications, les performances, les dimensions et les qualités aux besoins des clients. Pour toute question sur l'achat ou la personnalisation du fil de tungstène, y compris des informations détaillées, les tendances du marché et les derniers prix, contactez CTIA

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GROUP. Visitez notre site Web professionnel sur le fil de tungstène pour plus d'informations et de détails sur le produit.

8.3 Défis et possibilités industriels

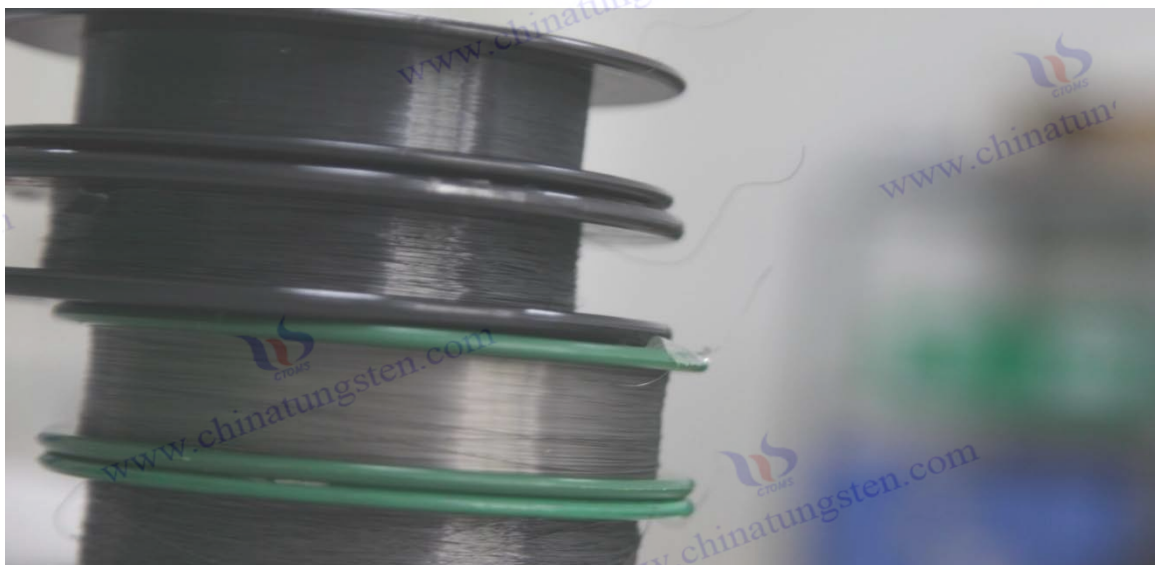
L'industrie du fil de tungstène résistant aux coupures est confrontée à la fois à des défis et à des opportunités dans un contexte de croissance rapide.

8.3.1 Défis de la technologie et de la concurrence sur le marché

Les obstacles techniques dissuadent les nouveaux entrants, car la production de fil de tungstène à l'échelle nanométrique nécessite des équipements coûteux (par exemple, des systèmes PECVD coûtant plus de 7 millions de RMB) et des certifications (par exemple, les normes AMS). Les marges bénéficiaires du marché bas de gamme sont tombées à 5 % à 8 % en raison de la concurrence, tandis que le marché haut de gamme est dominé par quelques géants. Les réglementations environnementales gonflent les coûts, les dépenses de conformité de la Chine devant augmenter de 15 à 20 % d'ici 2025. La dépendance de la chaîne d'approvisionnement vis-à-vis de la Chine, associée aux restrictions à l'exportation de 2024, a fait grimper les prix mondiaux des matières premières de 10 à 15 %, ce qui a eu un impact sur la stabilité.

8.3.2 Opportunités et perspectives d'avenir

Les progrès technologiques offrent des opportunités, par exemple, le fil de tungstène imprimé en 3D réduit de 30 % les coûts des composants complexes, ce qui ouvre de nouveaux marchés. La métallurgie verte (p. ex., la biolixiviation), si elle était mise à l'échelle, pourrait réduire les coûts par tonne de 10 à 15 %. Les domaines émergents comme la fusion nucléaire pourraient connaître une croissance de la demande de 50 %, avec une valeur marchande potentiellement supérieure à 19 milliards de RMB. Les collaborations entre les entreprises photovoltaïques et les producteurs de tungstène pour développer des fils à faible coût mettent en évidence le potentiel technique et commercial. L'industrie entre dans une phase de transformation axée sur la technologie.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 9 Annexe

9.1 Glossaire des termes

(1) Aerospace Material Specification (AMS)

A material standard established by the Society of Automotive Engineers (SAE) for high-performance materials in the aerospace industry, such as AMS 7880, which specifies the high-temperature performance of tungsten wire.

AMS（航空材料规范）

由美国航空航天学会制定的材料标准，适用于航空航天领域的高性能材料，如 AMS 7880 规范钨丝的高温性能。

Spécification des matériaux aérospatiaux (AMS)

Norme de matériau établie par la Society of Automotive Engineers (SAE) pour les matériaux haute performance dans l'industrie aérospatiale, tels que l'AMS 7880, qui spécifie les performances à haute température du fil de tungstène.

(2) American Society for Testing and Materials (ASTM)

An international organization that develops standards for material testing and specifications, such as ASTM B760-07, which defines the purity and performance requirements for tungsten materials.

ASTM（美国材料与试验协会）

制定材料测试和规范的国际组织，其标准如 ASTM B760-07 规定钨材料的纯度和性能要求。

Société américaine d'essais et de matériaux (ASTM)

Une organisation internationale qui élabore des normes pour les essais et les spécifications des matériaux, telles que la norme ASTM B760-07, qui définit les exigences de pureté et de performance des matériaux en tungstène.

(3) Compound Annual Growth Rate (CAGR)

A measure of the average annual growth rate of a market or demand over a specific period, such as the CAGR of demand for cut-resistant tungsten wire.

CAGR（年复合增长率）

用于衡量市场或需求在特定时期内的平均增长率，如耐切割钨丝需求的年复合增长率。

Taux de croissance annuel composé (TCAC)

Mesure du taux de croissance annuel moyen d'un marché ou d'une demande sur une période donnée, comme le TCAC de la demande de fil de tungstène résistant aux coupures.

(4) Electrical Discharge Machining (EDM)

A technology that uses the principle of electrical discharge to perform high-precision metal processing, where cut-resistant tungsten wire is often used as the electrode wire.

EDM（电火花线切割）

一种利用电火花放电原理进行高精度金属加工的技术，耐切割钨丝常作为电极丝使用。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Usinage par électroérosion (EDM)

Une technologie qui utilise le principe de la décharge électrique pour effectuer un traitement des métaux de haute précision, où le fil de tungstène résistant aux coupures est souvent utilisé comme fil d'électrode.

(5) Chinese National Standard (GB/T)

A national standard established by China, such as GB/T 4197-2017, which specifies the performance and quality requirements for tungsten wire.

GB/T（中国国家标准）

中国制定的国家标准，如 GB/T 4197-2017 规定钨丝的性能和质量要求。

Norme nationale chinoise (GB/T)

Une norme nationale établie par la Chine, telle que GB / T 4197-2017, qui spécifie les exigences de performance et de qualité pour le fil de tungstène.

(6) Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)

A highly sensitive chemical analysis technique used to detect trace impurities in tungsten wire.

ICP-MS（电感耦合等离子体质谱）

一种高灵敏度的化学分析技术，用于检测钨丝中的微量杂质元素。

Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS)

Technique d'analyse chimique très sensible utilisée pour détecter les traces d'impuretés dans le fil de tungstène.

(7) International Organization for Standardization (ISO)

An organization that develops international standards, such as ISO 9001:2015, which regulates quality management systems.

ISO（国际标准化组织）

制定国际标准的机构，如 ISO 9001:2015 规范质量管理体系。

Organisation internationale de normalisation (ISO)

Une organisation qui élabore des normes internationales, telles que ISO 9001:2015, qui régleme les systèmes de gestion de la qualité.

(8) Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)

An advanced technology for preparing nanoscale tungsten wire or coatings, which deposits thin films on substrates through plasma-enhanced chemical reactions.

PECVD（等离子体增强化学气相沉积）

一种制备纳米级钨丝或涂层的先进技术，通过等离子体增强化学反应在基材上沉积薄膜。

Dépôt chimique en phase vapeur amélioré par plasma (PECVD)

Technologie avancée de préparation de fils ou de revêtements de tungstène à l'échelle nanométrique, qui dépose des films minces sur des substrats par des réactions chimiques améliorées par plasma.

(9) Surface Roughness (Ra)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

A measure of the surface finish of a material, in micrometers (μm), with the Ra of cut-resistant tungsten wire typically controlled below $0.1 \mu\text{m}$.

Ra (表面粗糙度)

衡量材料表面光洁度的指标，单位为微米 (μm)，耐切割钨丝的 Ra 通常需控制在 $0.1 \mu\text{m}$ 以下。

Rugosité de surface (Ra)

Mesure de l'état de surface d'un matériau, en micromètres (μm), avec le Ra d'un fil de tungstène résistant aux coupures généralement contrôlé en dessous de $0,1 \mu\text{m}$.

(10) Scanning Electron Microscope (SEM)

A microscopy technique used to observe the surface morphology and microstructure of tungsten wire, with magnification up to 100,000 times.

SEM (扫描电子显微镜)

用于观察钨丝表面形貌和微观结构的显微镜技术，放大倍数可达 10 万倍。

Microscope électronique à balayage (MEB)

Technique de microscopie utilisée pour observer la morphologie de surface et la microstructure du fil de tungstène, avec un grossissement allant jusqu'à 100 000 fois.

(11) Six Sigma

A quality management methodology aimed at reducing production defect rates to 3 parts per million (PPM), widely used in high-end tungsten wire production.

Six Sigma (六西格玛)

一种质量管理方法，旨在将生产缺陷率降至百万分之三 (3 PPM)，广泛应用于高端钨丝生产。

Six Sigma

Une méthodologie de gestion de la qualité visant à réduire les taux de défauts de production à 3 parties par million (PPM), largement utilisée dans la production de fils de tungstène haut de gamme.

(12) Tungsten Inert Gas Welding (TIG Welding)

A welding technology that uses a tungsten electrode, where cut-resistant tungsten wire is often used as the electrode material.

TIG 焊 (钨极惰性气体保护焊)

一种使用钨电极进行焊接的技术，耐切割钨丝常作为电极材料。

Soudage sous gaz inerte au tungstène (soudage TIG)

Une technologie de soudage qui utilise une électrode de tungstène, où le fil de tungstène résistant aux coupures est souvent utilisé comme matériau d'électrode.

(13) Nano Tungsten Wire

Ultrafine tungsten wire with a diameter ranging from 1-100 nm, possessing excellent mechanical properties and conductivity, suitable for flexible electronics and biomedical fields.

纳米钨丝

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

直径在 1-100 nm 范围内的超细钨丝，具有优异的力学性能和导电性，适用于柔性电子和生物医学领域。

Fil nano tungstène

Fil de tungstène ultrafin d'un diamètre allant de 1 à 100 nm, possédant d'excellentes propriétés mécaniques et conductivité, adapté à l'électronique flexible et aux domaines biomédicaux.

(14) Doped Tungsten Wire

Alloyed tungsten wire with improved performance through the addition of trace elements (such as rhenium, potassium), commonly used in high-temperature and wear-resistant applications.

掺杂钨丝

通过添加微量元素（如铼、钾）改善钨丝性能的合金化钨丝，常用于高温和耐磨应用。

Fil de tungstène dopé

Fil de tungstène allié aux performances améliorées grâce à l'ajout d'oligo-éléments (tels que le rhénium, le potassium), couramment utilisé dans les applications à haute température et résistantes à l'usure.

(15) Grain Refinement

A process that reduces the internal grain size of tungsten wire through controlled production techniques, thereby enhancing its strength and toughness.

晶粒细化

通过控制生产工艺使钨丝内部晶粒尺寸减小，从而提升其强度和韧性。

Raffinement du grain

Un processus qui réduit la taille des grains internes du fil de tungstène grâce à des techniques de production contrôlées, améliorant ainsi sa résistance et sa ténacité.

(16) Heat Treatment

A process that alters the microstructure and properties of tungsten wire through heating and cooling, such as annealing to eliminate internal stress.

热处理

通过加热和冷却改变钨丝微观结构和性能的过程，如退火可消除内应力。

Traitement thermique

Un processus qui modifie la microstructure et les propriétés du fil de tungstène par le chauffage et le refroidissement, comme le recuit pour éliminer les contraintes internes.

(17) Biocompatibility

The ability of a material to not cause adverse reactions when in contact with biological organisms, with coated tungsten wire in medical devices required to meet ISO 10993 standards.

生物相容性

材料与生物体接触时不引起不良反应的能力，涂层钨丝在医疗器械中需满足 ISO 10993 标准。

Biocompatibilité

La capacité d'un matériau à ne pas provoquer d'effets indésirables lorsqu'il est en contact avec

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

des organismes biologiques, avec un fil de tungstène revêtu dans les dispositifs médicaux requis pour répondre aux normes ISO 10993.

(18) Carbon Footprint

The amount of greenhouse gas emissions produced during manufacturing, with the production of cut-resistant tungsten wire needing to consider its environmental impact and comply with ISO 14001 requirements.

碳足迹

生产过程中产生的温室气体排放量，耐切割钨丝生产需关注其环境影响，符合 ISO 14001 要求。

Empreinte carbone

La quantité d'émissions de gaz à effet de serre produites lors de la fabrication, la production de fils de tungstène résistant aux coupures devant tenir compte de son impact environnemental et être conforme aux exigences de la norme ISO 14001.

(19) 3D Printed Tungsten Wire

Tungsten wire prepared using additive manufacturing technology, featuring complex shapes and customized performance, with broad future application prospects.

3D 打印钨丝

利用增材制造技术制备的钨丝，具有复杂形状和定制化性能，未来应用前景广阔。

Fil de tungstène imprimé en 3D

Fil de tungstène préparé à l'aide de la technologie de fabrication additive, présentant des formes complexes et des performances personnalisées, avec de larges perspectives d'applications futures.

9.2 References

- [1] ASTM International. (2019). ASTM B760-07(2019): Standard specification for tungsten plate, sheet, and foil. West Conshohocken, PA: ASTM International.
ASTM 国际. (2019). ASTM B760-07(2019): 钨板、片和箔的标准规范. 西康舍霍肯, PA: ASTM 国际.
ASTM International. (2019). ASTM B760-07 (2019) : Spécification standard pour les plaques, les feuilles et les feuilles de tungstène. West Conshohocken, Pennsylvanie : ASTM International.
- [2] China National Standardization Administration. (2017). GB/T 4197-2017: Tungsten wire. Beijing: Standards Press of China.
中国国家标准化管理委员会. (2017). GB/T 4197-2017: 钨丝. 北京: 中国标准出版社.
China National Standardization Administration. (2017). GB/T 4197-2017: Tungsten wire. Beijing: Standards Press of China.
- [3] International Organization for Standardization (ISO). (2015). ISO 9001:2015: Quality management systems - Requirements. Geneva: ISO.
国际标准化组织 (ISO). (2015). ISO 9001:2015: 质量管理体系 - 要求. 日内瓦: ISO.
Organisation internationale de normalisation (ISO). (2015). ISO 9001:2015 : Systèmes de management de la qualité - Exigences. Genève : ISO.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- [4] International Organization for Standardization (ISO). (2018). ISO 10993-1:2018: Biological evaluation of medical devices - Part 1: Evaluation and testing within a risk management process. Geneva: ISO.
国际标准化组织 (ISO). (2018). ISO 10993-1:2018: 医疗器械的生物学评价 - 第 1 部分: 风险管理过程中的评价和测试. 日内瓦: ISO.
Organisation internationale de normalisation (ISO). (2018). ISO 10993-1:2018 : Évaluation biologique des dispositifs médicaux - Partie 1 : Évaluation et essais dans le cadre d'un processus de gestion des risques. Genève : ISO.
- [5] International Organization for Standardization (ISO). (2019). ISO 6892-1:2019: Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature. Geneva: ISO.
国际标准化组织 (ISO). (2019). ISO 6892-1:2019: 金属材料 - 拉伸试验 - 第 1 部分: 室温试验方法. 日内瓦: ISO.
Organisation internationale de normalisation (ISO). (2019). ISO 6892-1:2019 : Matériaux métalliques - Essais de traction - Partie 1 : Méthode d'essai à température ambiante. Genève : ISO.
- [6] Japan Industrial Standards Committee. (2002). JIS H 4461:2002: Tungsten wire. Tokyo: Japanese Standards Association.
日本工业标准委员会. (2002). JIS H 4461:2002: 钨丝. 东京: 日本标准协会.
Comité japonais des normes industrielles. (2002). JIS H 4461:2002 : Fil de tungstène. Tokyo : Association japonaise de normalisation.
- [7] Lassner, E., & Schubert, W. D. (1999). Tungsten: Properties, chemistry, technology of the element, alloys, and chemical compounds. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
Lassner, E., & Schubert, W. D. (1999). 钨: 元素的性质、化学、技术、合金和化合物. 纽约: 克鲁维尔学术/普伦纳姆出版社.
Lassner, E., et Schubert, W. D. (1999). Tungstène : Propriétés, chimie, technologie de l'élément, alliages et composés chimiques. New York : Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- [8] Society of Automotive Engineers (SAE). (n.d.). AMS 7880: Tungsten wire high-temperature properties. Warrendale, PA: SAE International.
汽车工程师学会 (SAE). (无日期). AMS 7880: 钨丝高温性能. 沃伦代尔, PA: SAE 国际.
Société des ingénieurs automobiles (SAE). (s.d.). AMS 7880 : Propriétés du fil de tungstène à haute température. Warrendale, Pennsylvanie : SAE International.
- [9] US Geological Survey (USGS). (2024). Mineral commodity summaries 2024: Tungsten. Reston, VA: USGS.
美国地质调查局 (USGS). (2024). 2024 年矿产商品概要: 钨. 雷斯顿, VA: USGS.
US Geological Survey (USGS). (2024). Résumés des produits minéraux 2024 : Tungstène. Reston, VA : USGS.
- [10] Chinatungsten Online. (2024). Tungsten market report 2024. Retrieved from <http://news.chinatungsten.com/en/>
中钨在线. (2024). 钨市场报告 2024. 取自 <http://news.chinatungsten.com/cn/>
Chinatungsten en ligne. (2024). Rapport sur le marché du tungstène 2024. Tiré de <http://news.chinatungsten.com/en/>
- [11] China Nonferrous Metals Industry Association. (2020). YS/T 1356-2020: Technical conditions for tungsten wire. Beijing: China Nonferrous Metals Industry Association.
中国有色金属工业协会. (2020). YS/T 1356-2020: 钨丝技术条件. 北京: 中国有色金属工业协会.
Association chinoise de l'industrie des métaux non ferreux. (2020). YS/T 1356-2020 : Conditions techniques pour le fil de tungstène. Pékin : Association chinoise de l'industrie des métaux non ferreux.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT