

Encyclopédie du fil de molybdène pour l'éclairage

中钨智造科技有限公司
CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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.



Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire for Lighting Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire for Lighting

As one of the core materials in modern lighting technology, molybdenum wire is widely used in various light sources including incandescent lamps, halogen lamps, fluorescent lamps, and gas discharge lamps, due to its high melting point, high strength, excellent corrosion resistance, and superior electrical conductivity. It is an irreplaceable and critical component in the lighting industry.

2. Typical Applications of Molybdenum Wire for Lighting

Residential and Commercial Lighting: Used in incandescent and halogen lamps to provide warm light and long service life.

Automotive Lighting: Functions as electrodes in HID and xenon lamps, offering high brightness and vibration resistance.

Specialty Lighting: Utilized in projection lamps, ultraviolet (UV) lamps, and infrared (IR) lamps to meet high-temperature and high-precision requirements in medical, industrial, and scientific applications.

Emerging Fields: Serves as conductive leads for LED lamps and supports for phosphors in laser lighting, aligning with future lighting technology development.

3. Basic Data of Molybdenum Wire for Lighting (Reference)

Parameter	Pure Mo Wire	Mo-La Wire	Mo-Re Wire
Mo Content	≥99.95%	≥99.0%	52.5%–86.0%
Diameter Range	0.03–3.2 mm	0.03–1.5 mm	0.03–1.0 mm
Tolerance	±0.002 mm	±0.002 mm	±0.002 mm
Tensile Strength (Room Temp)	800–1200 MPa	900–1400 MPa	1000–1500 MPa
Tensile Strength (at 1500°C)	150–300 MPa	200–400 MPa	250–450 MPa
Elongation at Break	10%–25%	12%–20%	15%–25%
Electrical Resistivity (20°C)	$5.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
Main Applications	Incandescent, Halogen	Halogen, Auto Headlights	HID, Projection Lamps

4. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.molybdenum.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

Répertoire

Chapitre 1 Introduction

- 1.1 Définition et aperçu du fil de molybdène
 - 1.1.1 Composition chimique et propriétés physiques du fil de molybdène
 - 1.1.2 La fonction centrale du fil de molybdène dans le domaine de l'éclairage
 - 1.1.3 Comparaison du fil de molybdène avec d'autres matériaux métalliques
- 1.2 Histoire et développement du fil de molybdène
 - 1.2.1 Découverte et premières applications industrielles du molybdène
 - 1.2.2 L'évolution du fil de molybdène dans la technologie de l'éclairage
 - 1.2.3 Principales percées et jalons technologiques
- 1.3 L'importance du fil de molybdène dans l'industrie de l'éclairage moderne
 - 1.3.1 Comparaison des performances entre le fil de molybdène et le fil de tungstène traditionnel
 - 1.3.2 La position stratégique du fil de molybdène dans l'éclairage à haut rendement
 - 1.3.3 Le rôle du fil de molybdène dans les lampes à économie d'énergie
- 1.4 État de la recherche et de l'application du fil de molybdène
 - 1.4.1 Progrès de la recherche sur la technologie des fils de molybdène au pays et à l'étranger
 - 1.4.2 Taille du marché mondial et distribution des applications
 - 1.4.3 Goulets d'étranglement techniques et défis futurs

Chapitre 2 Classification du fil de molybdène pour l'éclairage

- 2.1 Classification selon la composition chimique
 - 2.1.1 Fil de molybdène pur
 - 2.1.2 Fil de molybdène lanthane
 - 2.1.3 Fil de mérium et de rhénium
 - 2.1.4 Autres fils de molybdène dopés
- 2.2 Classification par utilisation
 - 2.2.1 Fil de molybdène pour lampes à incandescence
 - 2.2.2 Fil de molybdène pour lampes halogènes
 - 2.2.3 Fil de molybdène pour lampes fluorescentes et lampes à décharge
 - 2.2.4 Fil de molybdène pour lampes spéciales
- 2.3 Classification par spécification
 - 2.3.1 Plage de diamètres et tolérance
 - 2.3.2 Type de traitement de surface
 - 2.3.3 Forme du fil

Chapitre 3 Caractéristiques du fil de molybdène pour l'éclairage

- 3.1 Caractéristiques physiques du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 3.1.1 Densité et point de fusion du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 3.1.2 Coefficient de dilatation thermique et dépendance à la température du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 3.1.3 Analyse de la conductivité thermique et de la conductivité du fil de molybdène pour l'éclairage
- 3.2 Caractéristiques chimiques du fil de molybdène pour l'éclairage

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

- 3.2.1 Résistance à l'oxydation et stabilité à haute température du fil de molybdène pour l'éclairage
- 3.2.2 Résistance à la corrosion du fil de molybdène pour l'éclairage
- 3.2.3 Interaction entre le fil de molybdène pour l'éclairage et l'environnement de gaz inerte et de vide
- 3.3 Caractéristiques mécaniques du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 3.3.1 Résistance à la traction à haute température et propriétés de fluage du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 3.3.2 Ductilité et ténacité du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 3.3.3 Résistance à la fatigue et à la rupture du fil de molybdène pour l'éclairage
- 3.4 Caractéristiques électriques du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 3.4.1 Résistivité et coefficient de température du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 3.4.2 Capacité de transport de courant du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 3.4.3 Stabilité de l'arc du fil de molybdène pour l'éclairage
- 3.5 Propriétés optiques du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 3.5.1 Finition de surface et réflectivité du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 3.5.2 Caractéristiques du rayonnement à haute température et analyse spectrale du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 3.5.3 Effet de l'oxydation superficielle du fil de molybdène pour l'éclairage sur les propriétés optiques
- 3.6 Fil de molybdène pour l'éclairage MSDS de CTIA GROUP LTD

Chapitre 4 Préparation et technologie de production du fil de molybdène pour l'éclairage

- 4.1 Sélection des matières premières et prétraitement du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 4.1.1 Exigences de pureté de la poudre de molybdène et contrôle de la taille des particules
 - 4.1.2 Sélection et rapport des matières dopantes (lanthane, rhénium, etc.)
 - 4.1.3 Prétraitement des matières premières (nettoyage, tamisage, mélange)
- 4.2 Fusion et formage du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 4.2.1 Procédé de métallurgie des poudres
 - 4.2.2 Frittage sous vide et technologie de frittage à haute température
 - 4.2.3 Procédés de pressage à chaud, de forgeage et de laminage
- 4.3 Processus d'étirage du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 4.3.1 Technique de l'emboutissage grossier, de l'emboutissage fin et de l'emboutissage ultra-fin
 - 4.3.2 Sélection du lubrifiant et optimisation de la conception du moule
 - 4.3.3 Procédés de recuit intermédiaire et de recuit final
- 4.4 Technologie de traitement de surface du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 4.4.1 Nettoyage chimique et électropolissage
 - 4.4.2 Différences de procédé entre le fil de molybdène noir et le fil de molybdène nettoyé
 - 4.4.3 Technologies de revêtement (p. ex. revêtements anti-oxydation)
- 4.5 Procédé de dopage du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 4.5.1 Méthodes de dopage du lanthane, du rhénium et d'autres éléments
 - 4.5.2 Contrôle de l'uniformité du dopage
 - 4.5.3 Mécanisme de dopage pour améliorer la performance à haute température
- 4.6 Contrôle de la qualité et optimisation du processus du fil de molybdène pour l'éclairage

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

- 4.6.1 Surveillance en ligne des paramètres du procédé
- 4.6.2 Contrôle des défauts (fissures, porosité, inclusions)
- 4.6.3 Productivité et optimisation des coûts

Chapitre 5 : Les utilisations du fil de molybdène pour l'éclairage

- 5.1 Lampes à incandescence
 - 5.1.1 Support de filament et fonction conductrice
 - 5.1.2 Stabilité et durée de vie dans un environnement à haute température
- 5.2 Lampes halogènes
 - 5.2.1 Le rôle clé du fil de molybdène dans le cycle halogène
 - 5.2.2 Résistance aux hautes températures et résistance à la corrosion chimique
- 5.3 Lampes à décharge de gaz
 - 5.3.1 Fil de molybdène pour lampes à décharge à haute intensité (HID)
 - 5.3.2 Matériaux des électrodes des lampes fluorescentes
- 5.4 Éclairage spécial
 - 5.4.1 Phares et phares antibrouillard
 - 5.4.2 Lampes de projection, éclairage de scène et éclairages photographiques
 - 5.4.3 Lampes ultraviolettes, lampes infrarouges et éclairage médical
- 5.5 Autres domaines d'application
 - 5.5.1 Électronique du vide (tubes, tubes à rayons X)
 - 5.5.2 Fil de molybdène pour l'usinage par électroérosion (EDM)
 - 5.5.3 Éléments chauffants et thermocouples des fours à haute température

Chapitre 6 Équipement de production de fil de molybdène pour l'éclairage

- 6.1 Équipement de traitement des matières premières en fil de molybdène pour lampes
 - 6.1.1 Équipement de broyage et de criblage de poudre de molybdène
 - 6.1.2 Équipement de mélange et d'homogénéisation du dopane
 - 6.1.3 Équipement de purification des matières premières
- 6.2 Équipement de fusion et de formage de fils de molybdène pour lampes
 - 6.2.1 Four de frittage sous vide et four de protection d'atmosphère
 - 6.2.2 Presse à chaud et équipement de forgeage multidirectionnel
 - 6.2.3 Laminoirs de précision
- 6.3 Équipement de tréfilage pour fil de molybdène pour l'éclairage
 - 6.3.1 Machine de tréfilage à plusieurs passes et équipement de tréfilage continu
 - 6.3.2 Moules et systèmes de lubrification de haute précision
 - 6.3.3 Four de recuit et système de contrôle de la température
- 6.4 Équipement de traitement de surface pour fil de molybdène pour l'éclairage
 - 6.4.1 Équipement de polissage électrolytique et de nettoyage chimique
 - 6.4.2 Équipement de dépôt de revêtement de surface
 - 6.4.3 Équipement d'essai de la qualité de surface
- 6.5 Équipement d'essai et de contrôle de la qualité du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 6.5.1 Microscopes (optiques, électroniques) et analyseurs de surface
 - 6.5.2 Machines d'essai de traction et appareils d'essai de dureté

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

6.5.3 Analyseurs de composition (ICP, XRF)

6.5.4 Équipement d'essai de simulation environnementale

Chapitre 7 Normes nationales et étrangères pour le fil de molybdène pour l'éclairage

7.1 Normes nationales pour le fil de molybdène pour l'éclairage

7.1.1 GB/T 3462-2017

7.1.2 GB/T 4191-2015

7.1.3 GB/T 4182-2000

7.1.4 Autres normes nationales pertinentes

7.2 Normes internationales pour le fil de molybdène pour l'éclairage

7.2.1 Spécification standard ASTM B387 pour les tiges, barres et fils en molybdène et en alliage de molybdène

7.2.2 ISO 22447 Articles en molybdène et en alliage de molybdène

7.2.3 JIS H 4461

7.2.4 Autres normes ISO

7.3 Comparaison et conversion entre différentes normes de fil de molybdène pour l'éclairage

7.3.1 Comparaison des paramètres techniques des normes nationales et étrangères

7.3.2 Méthodes de conversion standard

7.3.3 Analyse de la reconnaissance mutuelle entre les normes internationales et les normes nationales

7.4 Protection de l'environnement et réglementations RoHS du fil de molybdène pour l'éclairage

7.4.1 Exigences de la directive RoHS (UE 2011/65/UE) pour les matériaux en fil de molybdène

7.4.2 RoHS de la Chine (mesures de contrôle de la pollution par les produits d'information électroniques)

7.4.3 Conformité environnementale dans la production de fil de molybdène

7.4.4 Exigences en matière de fabrication écologique et de développement durable

7.5 Normes de l'industrie et spécifications d'entreprise pour le fil de molybdène pour l'éclairage

7.5.1 Normes de l'Association chinoise de l'industrie des métaux non ferreux

7.5.2 Spécifications internes de l'industrie de l'éclairage

Chapitre 8 Technologie de détection du fil de molybdène pour l'éclairage

8.1 Essai de composition chimique du fil de molybdène pour l'éclairage

8.1.1 Analyse par fluorescence X (XRF)

8.1.2 Spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES)

8.1.3 Spectroscopie d'absorption atomique (SAA)

8.2 Essai des propriétés physiques du fil de molybdène pour l'éclairage

8.2.1 Mesure dimensionnelle et de tolérance (micrométrie laser, microscopie)

8.2.2 Essais de masse volumique et analyse de la qualité

8.2.3 Essais de résistance à la traction, de ductilité et de dureté

8.3 Inspection de la qualité de surface du fil de molybdène pour l'éclairage

8.3.1 Microscope optique et rugosité de surface

8.3.2 Microscopie électronique à balayage (MEB) et spectroscopie d'énergie (EDS)

8.3.3 Technologie de détection des défauts de surface

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

- 8.4 Test de performance à haute température du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 8.4.1 Essai de résistance à l'oxydation à haute température et de stabilité thermique
 - 8.4.2 Essais de cyclage thermique et de résistance au fluage
 - 8.4.3 Essai de propriété mécanique à haute température
- 8.5 Test de performance électrique du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 8.5.1 Essais de résistivité et de conductivité
 - 8.5.2 Analyse du coefficient de température et de la stabilité de l'arc
 - 8.5.3 Essai de performance électrique à haute température
- 8.6 Essais non destructifs du fil de molybdène pour l'éclairage
 - 8.6.1 Technologie de détection des défauts par ultrasons
 - 8.6.2 Détection des défauts par rayons X et tomographie
 - 8.6.3 Magnétoscopie et courants de Foucault

Chapitre 9 La tendance future du développement du fil de molybdène pour l'éclairage

- 9.1 Nouveaux matériaux et technologies de dopage
 - 9.1.1 Exploration de nouveaux éléments dopés
 - 9.1.2 R&D et application du fil de molybdène à l'échelle nanométrique
 - 9.1.3 Composites et alliages à base de molybdène
- 9.2 Processus de production intelligent et écologique
 - 9.2.1 Fabrication intelligente et technologies de l'industrie 4.0
 - 9.2.2 Procédés de production écologiques et recyclage des déchets
 - 9.2.3 Optimisation énergétique et fabrication à faibles émissions de carbone
- 9.3 Matériaux alternatifs pour le fil de molybdène pour l'éclairage
 - 9.3.1 Matériaux à base de tungstène et nouveaux alliages
 - 9.3.2 Céramiques et matériaux à base de carbone
 - 9.3.3 Matériaux conducteurs à haute température émergents
- 9.4 Expansion du marché et des applications
 - 9.4.1 Applications potentielles dans l'éclairage LED et laser
 - 9.4.2 Expansion dans l'industrie aérospatiale et l'industrie des hautes températures
 - 9.4.3 Analyse de la demande du marché mondial et des marchés émergents

Appendice

- A. Glossaire des termes
- B. Références

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Chapitre 1 Introduction

1.1 Définition et aperçu du fil de molybdène

1.1.1 Composition chimique et propriétés physiques du fil de molybdène

Le fil de molybdène est un matériau métallique allongé dont le composant principal est le molybdène métallique, le molybdène (symbole chimique Mo, numéro atomique 42) est un métal réfractaire, en raison de ses propriétés physiques et chimiques uniques, il est largement utilisé dans les produits industriels à haute température. Le fil de molybdène est généralement produit sous une forme de haute pureté avec une pureté extrêmement élevée, garantissant ses performances constantes. Certains fils de molybdène sont dopés avec des oligo-éléments tels que le lanthane ou le rhénium pour améliorer des propriétés spécifiques afin de répondre aux besoins de différents scénarios d'application. La structure cristalline du molybdène est cubique centrée sur le corps, ce qui confère au fil de molybdène une excellente résistance mécanique et une résistance à la déformation à haute température, ce qui lui permet de résister à des conditions de fonctionnement extrêmes.

Le fil de molybdène a un point de fusion extrêmement élevé, ce qui est suffisant pour faire face aux environnements à haute température des appareils d'éclairage. Sa haute densité confère au matériau des propriétés physiques solides, tandis que ses performances de conductivité thermique et électrique sont excellentes, ce qui lui donne un avantage dans les applications électriques. Le fil de molybdène a une bonne stabilité chimique à température ambiante et peut résister à l'érosion des acides, des alcalis et d'autres produits chimiques, mais lorsqu'il est exposé à l'air à des températures élevées, il est facile de réagir avec l'oxygène pour former des oxydes, de sorte que la protection de l'environnement sous vide ou sous gaz inerte (comme l'argon ou l'azote) est généralement nécessaire dans les lampes et les lanternes pour empêcher les réactions d'oxydation d'endommager les propriétés des matériaux.

Les caractéristiques de dilatation thermique du fil de molybdène sont l'un des facteurs importants pour son application dans le domaine de l'éclairage. Son coefficient de dilatation thermique est fortement adapté à certains matériaux en verre, tels que le verre borosilicaté, ce qui fait du fil de molybdène un choix idéal dans les processus d'étanchéité verre-métal dans la fabrication de luminaires, garantissant l'étanchéité à l'air et la stabilité structurelle. De plus, les propriétés de surface du fil de molybdène ont un impact significatif sur ses propriétés. Grâce au polissage électrolytique ou au nettoyage chimique, la surface du fil de molybdène peut obtenir une finition élevée, réduisant les irrégularités lors de la décharge de l'arc, améliorant ainsi la stabilité et les performances optiques du luminaire. Fil de molybdène dopé (e.g. En ajoutant des terres rares ou d'autres éléments, la résistance au fluage et la température de recristallisation du matériau à haute température sont considérablement améliorées, ce qui le rend plus adapté aux scénarios d'application d'éclairage exigeants.

1.1.2 La fonction centrale du fil de molybdène dans le domaine de l'éclairage

L'application du fil de molybdène dans le domaine de l'éclairage couvre une variété de fonctions clés, y compris le support de filament, le matériau de l'électrode, les composants d'étanchéité et le

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

support pour le cyclage halogène, etc., qui sont détaillées ci-dessous :

Support de filament : Dans les lampes à incandescence et halogènes, le filament de molybdène est souvent utilisé comme matériau structurel pour soutenir le filament de tungstène. Le filament de tungstène est sujet à la déformation ou à l'affaissement lorsqu'il travaille à des températures élevées, tandis que le filament de molybdène, avec son excellente résistance à haute température et sa résistance au fluage, peut soutenir fermement le filament et maintenir sa géométrie, assurant ainsi l'efficacité lumineuse et la durée de vie de la lampe. Cette fonction de support est particulièrement importante dans les environnements à haute température, où le filament peut être proche du point de fusion pendant de longues périodes.

Matériau de l'électrode : Dans les lampes à décharge gazeuse (par exemple, les lampes à décharge à haute intensité, les lampes fluorescentes), le fil de molybdène agit comme le matériau de l'électrode, qui est responsable du guidage de l'arc et de la transmission du courant. Sa conductivité élevée et sa résistance à la corrosion par arc lui permettent de résister à l'impact d'arcs instantanés à haute tension et à haute température, en maintenant l'intégrité de la structure de l'électrode. Par exemple, dans les lampes au sodium ou aux halogénures métalliques haute pression, le fil-électrode en molybdène doit fonctionner de manière stable dans des conditions extrêmes pour garantir que le luminaire est allumé et continue d'émettre de la lumière.

Composants d'étanchéité : Le fil de molybdène correspond au coefficient de dilatation thermique du verre, ce qui en fait le matériau de choix pour l'étanchéité verre-métal dans la fabrication de luminaires. Les composants d'étanchéité doivent assurer l'étanchéité à l'air à l'intérieur du luminaire et empêcher les fuites de gaz inertes ou les infiltrations d'air extérieur, protégeant ainsi l'environnement à l'intérieur de la lampe et prolongeant la durée de vie. La stabilité chimique du fil de molybdène lui permet de résister à la corrosion dans l'environnement gazeux à haute température à l'intérieur de la lampe, assurant ainsi la fiabilité à long terme de la pièce d'étanchéité.

Assistance au cycle halogène : Dans les lampes halogènes, les filaments de molybdène sont impliqués dans le processus de cycle halogène avec les gaz halogènes (tels que l'iode ou le brome) dans la lampe. Le cycle halogène dépose le tungstène évaporé dans le filament par une réaction chimique, prolongeant considérablement la durée de vie du filament tout en augmentant l'efficacité lumineuse. La résistance chimique du fil de molybdène garantit qu'il n'est pas attaqué dans les environnements halogènes, maintenant ainsi la stabilité du processus cyclique et soutenant les hautes performances des lampes halogènes.

La polyvalence du fil de molybdène en fait un rôle indispensable dans l'éclairage traditionnel (par exemple, les lampes à incandescence, les lampes halogènes) et l'éclairage spécialisé (par exemple, les lampes automobiles, les lampes de scène, les lampes médicales). Son potentiel dans les technologies d'éclairage émergentes, telles que les lampes à décharge haute puissance, est également en train de devenir un pilier important de l'industrie de l'éclairage moderne.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

1.1.3 Comparaison du fil de molybdène avec d'autres matériaux métalliques

Les avantages uniques du fil de molybdène dans l'éclairage peuvent être démontrés par une comparaison détaillée avec des matériaux métalliques couramment utilisés tels que le tungstène, le cuivre, le nickel et le platine :

Contraste avec le tungstène : Le tungstène est le matériau de choix pour les filaments incandescents en raison de son point de fusion extrêmement élevé, ce qui le rend adapté à une utilisation directe en tant qu'élément électroluminescent. L'efficacité lumineuse du tungstène à haute température est meilleure que celle du molybdène, mais son coefficient de dilatation thermique est légèrement moins compatible avec celui du verre, et il est facile de recristalliser à haute température, ce qui entraîne la fragilisation du matériau. En revanche, le fil de molybdène a une meilleure résistance au fluage et une meilleure stabilité structurelle à haute température, ce qui le rend particulièrement adapté comme support de filament ou matériau d'électrode. De plus, le coût des matières premières et la difficulté de traitement du molybdène sont inférieurs à ceux du tungstène, ce qui le rend plus économique et largement utilisé dans les scénarios qui nécessitent une stabilité à haute température et des fonctions d'étanchéité.

Contraste avec le cuivre : Le cuivre a une conductivité électrique extrêmement élevée et une bonne ductilité, mais son faible point de fusion le rend incapable de résister aux températures élevées que l'on trouve dans les appareils d'éclairage. De plus, le coefficient de dilatation thermique du cuivre est très différent de celui du verre, ce qui le rend inadapté à l'étanchéité verre-métal. La stabilité à haute température du fil de molybdène et sa compatibilité avec le verre le rendent bien supérieur au cuivre dans la fabrication de luminaires, en particulier dans les applications qui nécessitent une résistance à haute température et une étanchéité à l'air.

Comparaison avec le nickel : Le nickel est utilisé comme matériau d'électrode dans certaines lampes de faible puissance en raison de sa résistance à la corrosion et de sa facilité de traitement. Cependant, le nickel a un point de fusion bas et une résistance insuffisante à haute température pour répondre aux exigences élevées des lampes à décharge à haute intensité ou halogènes. Les excellentes propriétés du fil de molybdène dans les arcs à haute température et les environnements chimiquement corrosifs en font un matériau plus adapté aux applications d'éclairage haute performance.

Contraste avec le platine : Le platine est parfois utilisé dans les lampes spécialisées haut de gamme en raison de sa grande stabilité chimique et de sa résistance à l'oxydation. Cependant, le platine a un point de fusion plus bas que le molybdène et son coût extrêmement élevé, ce qui limite son application à grande échelle dans l'industrie. Le fil de molybdène offre un bon équilibre entre performances et coût, ce qui le rend adapté à une large gamme d'applications d'éclairage et à haute température.

En résumé, le fil de molybdène occupe une position unique dans le domaine de l'éclairage en raison de sa combinaison de performances à haute température, de capacité d'étanchéité, de stabilité chimique et de rentabilité, en particulier dans les applications qui nécessitent une stabilité à haute

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

température et une connexion hermétiquement scellée.

1.2 Histoire et développement du fil de molybdène

1.2.1 Découverte et premières applications industrielles du molybdène

La découverte du molybdène remonte à la fin du 18^{ème} siècle. En 1778, le chimiste suédois Carl Wilhelm Scherer a isolé l'acide molybdène de la molybdénite par des expériences chimiques, jetant ainsi les bases de la recherche sur le molybdène. En 1781, Peter Jacob Hiyem a réussi à préparer le molybdène métal en réduisant l'acide molybdène, marquant la découverte officielle du molybdène. À la fin du 19^{ème} siècle, avec les progrès de la technologie métallurgique, le molybdène a commencé à entrer dans le domaine industriel, initialement principalement utilisé dans la fabrication d'alliages d'acier pour améliorer la résistance, la résistance à la chaleur et la résistance à la corrosion de l'acier. Au début du 20^e siècle, les propriétés réfractaires du molybdène ont été progressivement reconnues, et son point de fusion élevé et sa résistance à haute température ont conduit à son application dans les industries à haute température, telles que les éléments chauffants de fours électriques et les équipements de vide.

Dans le domaine de l'éclairage, l'application du molybdène a commencé avec le développement des lampes à incandescence à la fin du 19^{ème} siècle. Les premières lampes à incandescence utilisaient un filament de carbone ou un filament de platine comme filament, mais le filament de carbone avait une courte durée de vie et le coût du filament de platine était élevé, ce qui rendait difficile de répondre aux besoins de production à grande échelle. Le molybdène a été testé pour les supports de filaments et les matériaux d'électrode en raison de son point de fusion élevé et de ses bonnes propriétés mécaniques, en particulier dans des environnements sous vide ou sous gaz inerte. Au début du 20^{ème} siècle, le fil de molybdène a commencé à être utilisé dans les pièces d'étanchéité des lampes à incandescence, car il correspondait mieux à la dilatation thermique du verre que les autres métaux et améliorait considérablement l'étanchéité à l'air et la fiabilité des lampes.

1.2.2 L'évolution du fil de molybdène dans la technologie de l'éclairage

L'application du fil de molybdène dans la technologie de l'éclairage a connu plusieurs étapes d'évolution avec le développement de la technologie des luminaires :

L'ère des lampes à incandescence (fin du 19^e au début du 20^e siècle) : L'invention des lampes à incandescence a conduit à l'application précoce du fil de molybdène. Lorsque Thomas Edison et d'autres ont développé des lampes à incandescence, ils ont été confrontés au problème de la sélection du support de filament et des matériaux d'étanchéité. Le fil de molybdène a été utilisé pour soutenir les filaments de tungstène et former des joints hermétiquement scellés en raison de sa résistance à haute température et de sa compatibilité avec le verre. Dans les années 1900, le processus d'étrépage du fil de molybdène a progressivement mûri, produisant des fils de molybdène plus fins et plus uniformes, qui répondaient aux besoins de fabrication de précision des lampes à incandescence.

L'essor des lampes halogènes (milieu du 20^e siècle) : Dans les années 1950, l'invention des lampes halogènes a mis en avant des exigences plus élevées pour le fil de molybdène. Les lampes halogènes fonctionnent à des températures extrêmement élevées et sont remplies de gaz halogènes

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

chimiquement actifs. Le fil de molybdène est un choix idéal pour les électrodes et les matériaux de support en raison de sa résistance aux températures élevées et aux produits chimiques. Le fil de molybdène dopé (par exemple le fil de molybdène lanthane) a été développé au cours de cette période pour améliorer encore les performances à haute température.

Lampes à décharge de gaz et éclairage spécialisé (fin du 20e siècle) : Avec la popularité des lampes à décharge à haute intensité (HID), des lampes fluorescentes et de l'éclairage spécialisé (par exemple, les lampes automobiles, les lampes de projection), le domaine d'application du fil de molybdène a été encore élargi. Sa stabilité dans les environnements à décharge d'arc et la fiabilité de son étanchéité au verre en font le matériau de choix pour les électrodes de lampe à décharge de gaz et les composants d'étanchéité.

Technologie d'éclairage moderne (21e siècle) : Bien que l'éclairage LED remplace progressivement les luminaires traditionnels, le fil de molybdène reste indispensable sur le marché boursier de l'éclairage spécialisé à haute puissance (par exemple, les lumières de scène, les lampes médicales) et des luminaires traditionnels. En outre, le potentiel d'application du fil de molybdène dans les dispositifs électroniques sous vide, les composants aérospatiaux à haute température et d'autres domaines a été exploré plus avant, montrant son adaptabilité inter-domaines.

1.2.3 Principales percées et jalons technologiques

La large application du fil de molybdène dans le domaine de l'éclairage est due aux percées technologiques clés suivantes :

Maturité de la technologie de la métallurgie des poudres : Au début du 20e siècle, les progrès de la technologie de la métallurgie des poudres ont permis de produire à grande échelle du fil de molybdène de haute pureté. En pressant, frittant et forgeant la poudre de molybdène en une ébauche, elle fournit une matière première de haute qualité pour le processus d'étrépage ultérieur.

Amélioration du processus de tréfilage : Dans les années 1920, l'optimisation de la technologie de tréfilage multi-passes et de la conception des matrices a conduit à une réduction significative du diamètre du fil de molybdène, ce qui a permis de produire des filaments de taille micrométrique pour répondre aux besoins des lampes de précision. L'introduction du processus de recuit améliore la ductilité et la ténacité du fil de molybdène et réduit le taux de fracture pendant le traitement.

Développement de la technologie de dopage : Dans les années 1950, la résistance au fluage à haute température et la température de recristallisation du fil de molybdène ont été considérablement améliorées par des éléments dopants tels que l'oxyde de lanthane ou le rhénium. Par exemple, le fil de molybdène lanthane a une température de recristallisation de centaines de degrés Celsius supérieure à celle du fil de molybdène pur, ce qui lui permet d'être utilisé dans des conditions plus exigeantes.

Progrès dans la technologie de traitement de surface : Dans les années 1980, l'application de la technologie de polissage électrolytique et de nettoyage chimique a considérablement amélioré la

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

finition de surface du fil de molybdène, réduit l'inhomogénéité de la décharge d'arc et prolongé la durée de vie des luminaires.

L'introduction de la production automatisée : Au début du 21^e siècle, l'application généralisée des lignes de production automatisées a amélioré la cohérence et l'efficacité de la production de fil de molybdène, réduit les coûts de production et renforcé la compétitivité du fil de molybdène sur le marché mondial.

Ces percées technologiques favorisent non seulement l'application du fil de molybdène dans le domaine de l'éclairage, mais jettent également les bases de son expansion dans d'autres domaines industriels à haute température.

1.3 L'importance du fil de molybdène dans l'industrie de l'éclairage moderne

1.3.1 Comparaison des performances entre le fil de molybdène et le fil de tungstène traditionnel

Le fil de molybdène et le [fil de tungstène](#) sont les deux matériaux métalliques à haute température les plus couramment utilisés dans l'industrie de l'éclairage. Voici une comparaison détaillée sous plusieurs aspects :

Performance à haute température : Le point de fusion du tungstène est plus élevé que celui du molybdène, ce qui le rend plus adapté comme filament lumineux pour les lampes à incandescence et résiste directement aux tâches luminescentes à haute température. Cependant, le molybdène a une meilleure résistance au fluage et une meilleure stabilité structurelle à des températures élevées, ce qui le rend approprié comme matériau de support ou électrode, en particulier dans les scénarios où la conservation de la forme à long terme est requise.

Caractéristiques de dilatation thermique : Le coefficient de dilatation thermique du molybdène est fortement associé à des matériaux d'étanchéité tels que le verre borosilicaté, qui peuvent former un joint hermétique fiable. Le coefficient de dilatation thermique du tungstène est légèrement moins compatible avec le verre, et des matériaux de transition supplémentaires sont souvent nécessaires pour l'étanchéité, ce qui ajoute à la complexité de fabrication.

Stabilité chimique : Dans l'environnement des gaz halogènes des lampes halogènes, la résistance à la corrosion du fil de molybdène est meilleure que celle du tungstène, qui peut résister efficacement à l'attaque chimique du gaz halogène, soutenir le processus de cycle halogène et prolonger la durée de vie de la lampe.

Coût et aptitude au traitement : Le molybdène a des coûts de matière première et de traitement inférieurs à ceux du tungstène, et ses processus d'étirage et de formage sont relativement simples, ce qui le rend adapté à la production à grande échelle. Le tungstène est difficile à traiter, en particulier dans la production de fils ultrafins, et le rendement est faible.

Propriétés électriques : La résistivité du tungstène et du molybdène est similaire, mais le molybdène

[Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale](#)

a une meilleure stabilité de l'arc dans les lampes à décharge gazeuse et convient comme matériau d'électrode pour résister à l'impact d'une haute tension instantanée et d'un arc à haute température.

En résumé, le fil de molybdène et le fil de tungstène forment une relation complémentaire dans les appareils d'éclairage, le fil de molybdène est largement utilisé dans les fonctions de support, d'électrode et d'étanchéité en raison de ses excellentes performances d'étanchéité, de sa stabilité chimique et de son économie, tandis que le fil de tungstène est principalement utilisé pour les filaments électroluminescents.

1.3.2 La position stratégique du fil de molybdène dans l'éclairage à haut rendement

L'éclairage à haut rendement (par exemple, les lampes halogènes, les lampes à décharge à haute intensité) impose des exigences plus élevées en matière de performances à haute température, de stabilité chimique et de propriétés électriques des matériaux, et le fil de molybdène a montré sa position stratégique dans les aspects suivants :

Un rôle clé dans les lampes halogènes : les lampes halogènes atteignent une efficacité lumineuse plus élevée et une durée de vie plus longue grâce aux cycles halogènes. En tant qu'électrode et matériau de support, le fil de molybdène doit résister aux températures élevées et aux attaques chimiques du gaz halogène, et son excellente résistance à la corrosion et sa résistance à haute température garantissent le fonctionnement stable de la lampe, fournissant un support clé pour le rendement élevé de la lampe halogène.

Application des lampes à décharge à haute intensité : Dans les lampes à décharge à haute intensité telles que les lampes aux halogénures métalliques et les lampes au sodium à haute pression, le fil de molybdène, en tant que matériau d'électrode, doit résister à une haute tension instantanée et à un environnement d'arc à haute température extrême. Sa stabilité à l'arc et sa résistance aux hautes températures en font un matériau irremplaçable, assurant un démarrage rapide et une luminescence continue du luminaire.

Fiabilité de l'éclairage spécialisé : dans les phares automobiles, les lampes de projection et l'éclairage de scène, les luminaires doivent fonctionner de manière stable dans des environnements complexes tels que les vibrations et les températures élevées. La grande fiabilité du fil de molybdène et la capacité d'étanchéité avec du verre garantissent la durabilité et la stabilité des performances du luminaire.

Soutenir l'économie d'énergie et la protection de l'environnement : Les caractéristiques de rendement élevé et de longue durée de vie du fil de molybdène soutiennent la conception de lampes et de lanternes à économie d'énergie, qui répondent aux exigences de l'industrie de l'éclairage moderne en matière d'efficacité énergétique et de protection de l'environnement. Son processus de production et d'utilisation répond également à des normes environnementales strictes, telles que la directive RoHS de l'Union européenne.

La position stratégique du fil de molybdène se reflète dans sa capacité à promouvoir le développement de la technologie d'éclairage dans le sens de hautes performances, de longue durée

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

de vie et d'économie d'énergie, en particulier dans la transformation de l'éclairage traditionnel en éclairage à haut rendement.

1.3.3 Le rôle du fil de molybdène dans les lampes à économie d'énergie

Les luminaires à économie d'énergie (par exemple, les lampes halogènes, les lampes fluorescentes compactes, les lampes à décharge à haute intensité) sont le courant dominant de l'éclairage moderne, et le fil de molybdène y joue un rôle clé :

Lampes halogènes : Les filaments de molybdène prolongent la durée de vie des filaments et réduisent la consommation d'énergie en prenant en charge les cycles halogènes. La fiabilité du filament de molybdène est essentielle pour obtenir cet avantage en raison de la proportion importante d'efficacité lumineuse des lampes halogènes par rapport aux lampes à incandescence conventionnelles, assurant un fonctionnement stable des luminaires dans des environnements à haute température et d'attaque chimique.

Lampes fluorescentes compactes : Dans les lampes fluorescentes compactes, le fil de molybdène agit comme un matériau d'électrode et est responsable de l'initiation et du maintien de la décharge fluorescente. Sa conductivité élevée et sa résistance à la corrosion par arc électrique garantissent un démarrage rapide et une stabilité à long terme des luminaires, répondant ainsi aux exigences d'un rendement élevé en matière d'éclairage économe en énergie.

Lampes à décharge à haute intensité : L'efficacité lumineuse des lampes à décharge à haute intensité dépasse de loin celle des lampes à incandescence traditionnelles, et elles sont représentatives de l'éclairage à haute efficacité. En tant qu'électrode et matériau d'étanchéité, le fil de molybdène permet le fonctionnement des lampes dans des environnements à haute température et à haute pression, et améliore considérablement l'efficacité énergétique.

Caractéristiques de protection de l'environnement : La production et l'utilisation de fils de molybdène sont conformes à des réglementations strictes en matière de protection de l'environnement, ne contiennent pas de plomb, de mercure et d'autres substances nocives et répondent aux exigences de l'éclairage vert. Sa grande durabilité réduit également la fréquence de remplacement des luminaires, ce qui réduit la consommation de ressources et la production de déchets.

L'application de fil de molybdène dans les lampes et lanternes à économie d'énergie favorise la miniaturisation, la haute performance et la protection de l'environnement des lampes et des lanternes, et répond aux besoins de la société moderne en matière de développement durable et à faible émission de carbone.

1.4 État de la recherche et de l'application du fil de molybdène

1.4.1 Progrès de la recherche sur la technologie des fils de molybdène au pays et à l'étranger

À l'échelle mondiale, la recherche sur la technologie des fils de molybdène se concentre principalement sur les directions suivantes :

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Technologie de dopage : des instituts de recherche nationaux et étrangers s'engagent dans le développement de nouveaux fils de molybdène dopés, en ajoutant des éléments de terres rares (tels que le lanthane, le cérium, l'yttrium) ou des métaux précieux (tels que le rhénium) pour améliorer la résistance au fluage à haute température et la résistance à l'oxydation. Par exemple, le fil de molybdène lanthane haute performance développé par l'Institut de recherche sur les métaux de l'Académie chinoise des sciences a une température de recristallisation nettement plus élevée et convient aux environnements à haute température plus exigeants. Les recherches en Europe et aux États-Unis se sont concentrées sur le développement d'alliages molybdène-rhénium pour améliorer la ductilité et la résistance à l'oxydation.

Optimisation des processus de production : Des entreprises en Allemagne et en Autriche ont considérablement amélioré la qualité de surface et l'uniformité de la production de fil de molybdène en introduisant une technologie de fabrication intelligente et un équipement de tréfilage de précision. Les entreprises chinoises ont fait des percées dans les processus de métallurgie des poudres et de tréfilage, optimisant l'efficacité de la production et réduisant les coûts.

Fil de molybdène à l'échelle nanométrique : Avec l'essor de la nanotechnologie, certains instituts de recherche ont exploré la préparation de fil de molybdène à l'échelle nanométrique pour des dispositifs électroniques de haute précision et de nouvelles technologies d'éclairage. La résistance et la conductivité du fil de nano-molybdène devraient être encore améliorées, offrant la possibilité d'une technologie d'éclairage de nouvelle génération.

Fabrication verte : La recherche en Europe et au Japon se concentre sur les technologies de production respectueuses de l'environnement, telles que la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz d'échappement dans le processus de frittage. La Chine promeut également la production de fils de molybdène à faible émission de carbone, développe des technologies de recyclage des déchets et des processus écologiques, et répond à la tendance mondiale en matière de protection de l'environnement.

1.4.2 Taille du marché mondial et distribution des applications

Selon l'analyse de l'industrie, le marché mondial du fil de molybdène a maintenu une croissance régulière ces dernières années et le domaine de l'éclairage est l'un de ses principaux scénarios d'application. La croissance de la taille du marché est principalement stimulée par les facteurs suivants :

Répartition régionale : La Chine est le plus grand producteur mondial de fil de molybdène, avec de riches ressources en minerai de molybdène et une technologie de traitement mature, représentant une part importante de la production mondiale. L'Europe (Allemagne, Autriche) et les États-Unis disposent d'avantages technologiques dans la production de fils de molybdène dopés haut de gamme, en se concentrant sur des produits à haute valeur ajoutée.

Distribution des applications : Dans le domaine de l'éclairage, les lampes halogènes et les lampes à décharge à haute intensité sont les principaux scénarios d'application du fil de molybdène, occupant

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

une grande part de marché du fil de molybdène pour l'éclairage. D'autres applications comprennent l'éclairage spécialisé (par exemple, les éclairages automobiles, les éclairages médicaux) et l'électronique sous vide (par exemple, les tubes à rayons X).

Moteurs du marché : La demande croissante d'éclairage à haut rendement, l'expansion rapide du marché de l'éclairage automobile et l'utilisation d'un éclairage spécialisé dans les secteurs aérospatial et médical stimulent la croissance continue du marché des fils de molybdène. L'accent mis à l'échelle mondiale sur l'éclairage économe en énergie et respectueux de l'environnement a également encouragé l'application de fils de molybdène.

1.4.3 Goulets d'étranglement techniques et défis futurs

Bien que le fil de molybdène soit largement utilisé dans le domaine de l'éclairage, il est toujours confronté aux goulets d'étranglement et aux défis techniques suivants :

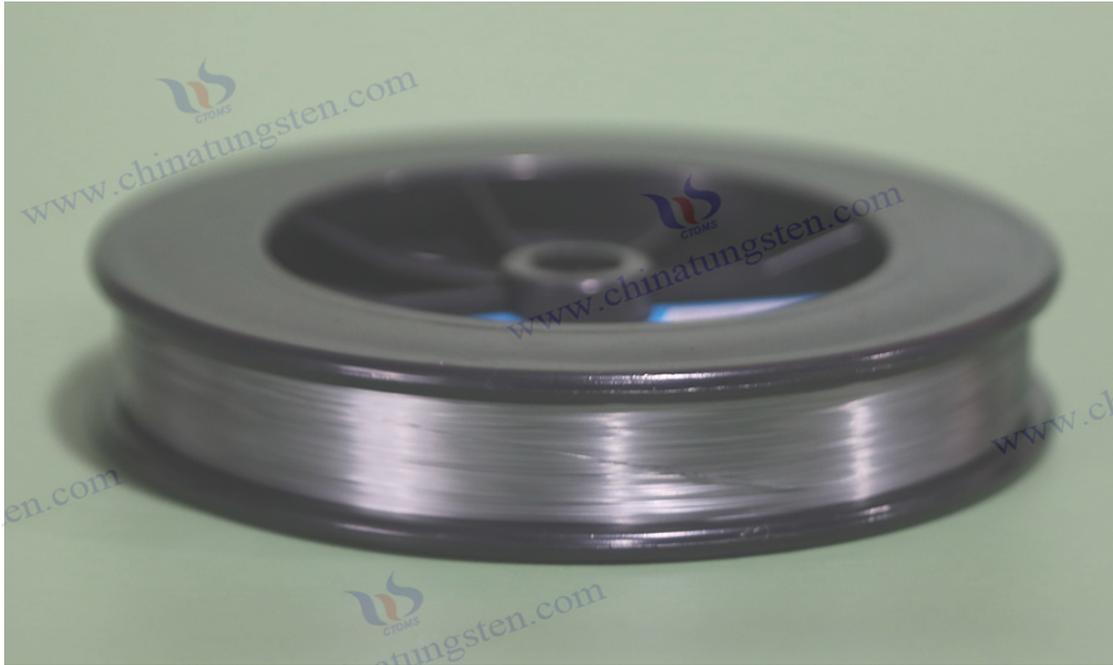
Problème d'oxydation à haute température : Le fil de molybdène s'oxyde facilement dans l'air à haute température, ce qui limite son application dans des environnements de gaz non vide ou non inertes. Le développement de revêtements anti-oxydants ou de nouveaux matériaux dopés est au centre des recherches futures afin d'élargir encore leurs scénarios d'application.

Difficulté dans la production de fil de molybdène ultra-fin : La production de fil de molybdène ultra-fin (diamètre inférieur à 0,02 mm) nécessite une précision de processus extrêmement élevée et un faible rendement, ce qui entraîne une augmentation des coûts. L'amélioration de l'uniformité de la production et la réduction des coûts sont des défis importants pour l'industrie.

Concurrence dans l'éclairage LED : La popularité des lampes LED a considérablement réduit la demande de lampes traditionnelles (telles que les lampes à incandescence et les lampes halogènes), et la part de marché du fil de molybdène dans le domaine de l'éclairage a été affectée dans une certaine mesure. Pour relever ce défi, il est essentiel de développer des applications du fil de molybdène dans des composants à haute température liés aux LED ou dans des domaines émergents.

Protection de l'environnement et durabilité : la consommation d'énergie et l'élimination des déchets dans la production de fils de molybdène sont soumises à des réglementations environnementales de plus en plus strictes (par exemple, les directives RoHS et REACH dans l'Union européenne). Le développement de la technologie de fabrication écologique et du système de recyclage des déchets est devenu une orientation de développement importante de l'industrie.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale



fil de molybdène pour l'éclairage de CTIA

Chapitre 2 Classification du fil de molybdène pour l'éclairage

En tant que matériau clé dans l'industrie de l'éclairage, le fil de molybdène pour l'éclairage présente des propriétés et des scénarios d'application diversifiés en raison de différentes compositions chimiques, utilisations et spécifications physiques. Selon la composition chimique, le fil de molybdène peut être divisé en fil de molybdène pur, fil de molybdène lanthane, fil de molybdène rhénium et autre fil de molybdène dopé ; Selon l'application, il est divisé en lampe à incandescence, lampe halogène, lampe fluorescente et lampe à décharge de gaz et fil de molybdène pour lampe spéciale ; Selon les spécifications, il est divisé en différentes gammes de diamètres, types de traitement de surface et formes de fils. Ce chapitre fournira une analyse complète et détaillée des caractéristiques, des processus de préparation, des scénarios d'application, des défis techniques et de l'état du marché de chaque classification, combinée à la recherche mondiale et aux pratiques industrielles.

2.1 Classification par composition chimique

La composition chimique du fil de molybdène est le facteur central qui détermine ses propriétés physiques, chimiques, mécaniques et électriques. En dotant différents éléments dans une matrice de molybdène ou en maintenant une pureté élevée, le fil de molybdène peut répondre à divers besoins, des lampes à incandescence à faible coût aux lampes spécialisées haute performance. Ce qui suit est une introduction détaillée aux caractéristiques, au processus de production et à l'application du fil de molybdène pur, du fil de molybdène lanthane, du fil de molybdène et de rhénium et d'autres fils de molybdène dopé.

2.1.1 Fil de molybdène pur

Le fil de molybdène pur fait référence au fil de molybdène avec une teneur en molybdène de \geq

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

99,95 %, sans ajout d'aucun élément de dopage, et est le type de fil de molybdène le plus basique et le plus largement utilisé pour l'éclairage. Sa grande pureté et ses excellentes propriétés physico-chimiques en font le matériau de choix pour les appareils d'éclairage conventionnels.

Composition chimique et pureté : Le fil de molybdène pur est basé sur du molybdène de haute pureté, et la teneur totale en impuretés (telles que le fer, le nickel, le carbone, l'oxygène, le silicium, etc.) est généralement contrôlée en dessous de 0,05 % et peut être aussi faible que 0,01 % dans certaines applications à forte demande. La haute pureté est obtenue par la réduction par hydrogène du molybdate d'ammonium (AMT) ou du trioxyde de molybdène (MoO_3) pour préparer la poudre de molybdène. Un contrôle strict des impuretés sur la conductivité du fil de molybdène (résistivité d'environ $5,5 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$) et la résistance à la corrosion sont cruciaux. Par exemple, des niveaux d'oxygène trop élevés peuvent entraîner une oxydation accélérée à des températures élevées, ce qui entraîne une MoO_3 volatile et affecte la durée de vie du luminaire.

Propriétés physiques : Le fil de molybdène pur a un point de fusion élevé (2623°C), une densité élevée ($10,2 \text{ g/cm}^3$) et un faible coefficient de dilatation thermique ($4,8 \times 10^{-6}/\text{K}$). Sa conductivité thermique ($138 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) est supérieure à celle du tungstène ($174 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), ce qui le rend adapté à la conductivité thermique et électrique. La structure cristalline cubique centrée sur le corps (BCC) du fil de molybdène lui confère une excellente résistance mécanique, mais il est sujet à la recristallisation à des températures élevées ($>1000^\circ\text{C}$), entraînant la croissance des grains et la fragilisation.

Propriétés mécaniques : À température ambiante, la résistance à la traction du fil de molybdène pur est de 800 à 1000 MPa et l'allongement à la rupture est d'environ 5 % à 10 %. À des températures élevées (1500°C), la résistance à la traction tombe à 200-300 MPa, et la résistance au fluage est faible, ce qui limite son application dans des environnements à très haute température. La ductilité du fil de molybdène lui permet d'être transformé en fils ultrafins d'un diamètre aussi bas que 0,01 mm par tréfilage en plusieurs passes.

Stabilité chimique : Le fil de molybdène pur a une bonne résistance à la corrosion aux acides, aux alcalis et à l'eau à température ambiante, mais il s'oxyde rapidement lorsqu'il est exposé à l'air à haute température ($>600^\circ\text{C}$) pour former MoO_3 . Par conséquent, le fil de molybdène pur pour l'éclairage est généralement utilisé dans un environnement sous vide ou dans un gaz inerte (par exemple, argon, azote) pour éviter les pertes par oxydation.

Processus de préparation :

Préparation de la matière première : la poudre de molybdène de haute pureté (taille des particules de 1 à 5 μm) est préparée en réduisant le molybdate d'ammonium ou le trioxyde de molybdène par l'hydrogène. Les impuretés telles que l'oxygène et le carbone dans la poudre doivent être strictement contrôlées.

Métallurgie des poudres : La poudre de molybdène est pressée dans une billette par pressage isostatique à froid (CIP) et frittée ($1800\text{-}2000^\circ\text{C}$) dans une atmosphère sous vide ou à hydrogène pour former une billette de molybdène dense.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Travail à chaud : L'ébauche est forgée à chaud, laminée à chaud ou forgée par rotation pour former des tiges de molybdène d'un diamètre réduit à 1-5 mm.

Tréfilage : La tige de molybdène est étirée au diamètre cible à l'aide d'une matrice diamantée et d'un lubrifiant tel qu'une émulsion de graphite au moyen de plusieurs passes (10-20 passes). Un recuit intermédiaire (800-1200°C) est effectué pendant le processus d'emboutissage pour éliminer l'écroutissage.

Traitement de surface : Selon les exigences de l'application, la couche d'oxyde (fil de molybdène noir) peut être conservée ou nettoyée. Le fil de molybdène peut être fabriqué par décapage et polissage électrolytique.

Scénario d'application : Le fil de molybdène pur est principalement utilisé pour les filaments de support de filament et les électrodes d'étanchéité dans les lampes à incandescence de faible puissance (40-100 W), car il est fortement adapté au coefficient de dilatation thermique du verre borosilicaté (différence $<0,5 \times 10^{-6}/K$), qui peut former une liaison hermétiquement scellée fiable. De plus, le fil de molybdène pur est également utilisé comme matériau d'électrode pour les lampes fluorescentes et est responsable de l'initiation de la décharge. Il est rentable et adapté à la production à grande échelle.

Statut du marché et de la technologie : La technologie de production de fil de molybdène pur a été très mature dans le monde et la Chine représente plus de 60 % de la production mondiale.

Avantages et limites :

Avantages : Faible coût (environ 1-2 \$ / kg, selon les spécifications), excellentes performances de traitement, adapté aux appareils d'éclairage à faible coût. Le processus de production du fil de molybdène pur est simple et le rendement est élevé (>95 %).

Limites : Une faible résistance au fluage et à l'oxydation à haute température limite son utilisation dans les lampes halogènes ou à décharge de gaz de haute puissance. Dans > environnement à 1500°C, la durée de vie du fil de molybdène pur est généralement inférieure à 1000 heures.

Défis techniques : L'amélioration des performances à haute température du fil de molybdène pur nécessite un processus de recuit optimisé ou une passivation de surface pour réduire la croissance des grains et les pertes par oxydation. À l'avenir, le développement de revêtements anti-oxydation à faible coût pourrait être une percée.

2.1.2 Fil de molybdène lanthane

Le fil de molybdène lanthane est fabriqué en dotant l'oxyde de lanthane (La_2O_3 , teneur 0,3 % à 1,0 %) dans la matrice de molybdène, qui est largement utilisé dans les appareils d'éclairage haut de gamme en raison de ses excellentes performances à haute température et de sa résistance au fluage.

Composition chimique : Le fil de molybdène lanthane est basé sur du molybdène de haute pureté ($\geq 99,5$ %) et dopé avec des particules d'oxyde de lanthane (taille des particules 10-100 nm). L'oxyde de lanthane est distribué sous la forme d'une phase diffuse à la limite des grains de molybdène, ce

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

qui inhibe la croissance des grains et le glissement de dislocation grâce à l'effet d'épinglage. Les impuretés (par exemple, le fer, le carbone) doivent être contrôlées en dessous de 0,03 % pour éviter la détérioration des performances.

Propriétés physiques : Le point de fusion du fil de molybdène lanthane est proche de celui du molybdène pur (environ 2620 °C), mais la température de recristallisation est considérablement augmentée à 1800-2000 °C (1400-1600 °C pour le fil de molybdène pur). Son coefficient de dilatation thermique ($4,8 \times 10^{-6}/K$) et sa conductivité thermique (environ 135 W/m·K) sont comparables à ceux du fil de molybdène pur, mais la résistance à l'oxydation est légèrement améliorée, car les particules d'oxyde de lanthane peuvent ralentir la diffusion de l'oxygène.

Propriétés mécaniques : La résistance à la traction du fil de molybdène lanthane à haute température (2000°C) est de 300 à 500 MPa, et la résistance au fluage est 2 à 3 fois supérieure à celle du fil de molybdène pur. Son allongement à la rupture est de 8 à 12 % à température ambiante, et il conserve toujours une certaine ténacité à haute température. L'effet d'épinglage de l'oxyde de lanthane rend le fil de molybdène lanthane plus résistant à la fatigue pendant les cycles thermiques.

Stabilité chimique : Le fil de molybdène lanthane se comporte bien dans les environnements de gaz halogènes (tels que l'iode, le brome) et est mieux résistant aux produits chimiques que le fil de molybdène pur. Dans le vide ou les gaz inertes, sa résistance à l'oxydation peut supporter une durée de vie du luminaire de > 2000 heures.

Processus de préparation :

Préparation du dopage : Assurer une distribution uniforme de l'oxyde de lanthane par dopage humide (mélange d'une solution d'oxyde de lanthane avec de la poudre de molybdène) ou par séchage par atomisation. Le taux de dopage doit être contrôlé avec précision (0,3 % à 1,0 %), un taux trop élevé peut entraîner une fragilisation du matériau.

Métallurgie des poudres : la poudre de molybdène dopée est pressée dans une ébauche et frittée dans une atmosphère d'hydrogène (1900-2100 °C) pour former une structure de phase diffuse uniforme.

Travail à chaud et tréfilage : l'ébauche est formée par tréfilage à plusieurs passes après forgeage à chaud et laminage à chaud. Plusieurs recuits (900-1300°C) sont nécessaires pendant le processus d'emboutissage pour maintenir la ductilité. Le choix du moule et du lubrifiant est essentiel à la qualité de surface.

Traitement de surface : Il est généralement transformé en fil de molybdène nettoyé et la couche d'oxyde est éliminée par polissage électrolytique pour améliorer la stabilité de l'arc et la résistance à la corrosion.

Scénario d'application : Le fil de molybdène lanthane est largement utilisé comme matériau d'électrode et de support pour les lampes halogènes et les lampes à décharge à haute intensité (HID). Par exemple, dans les phares automobiles, le fil de molybdène lanthane peut résister à des températures élevées (>2500°C) et aux vibrations, assurant une durée de vie de la lampe de plus de 2000 heures. Son application d'électrodes dans les lampes aux halogénures métalliques améliore également considérablement la stabilité de la décharge.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire for Lighting Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire for Lighting

As one of the core materials in modern lighting technology, molybdenum wire is widely used in various light sources including incandescent lamps, halogen lamps, fluorescent lamps, and gas discharge lamps, due to its high melting point, high strength, excellent corrosion resistance, and superior electrical conductivity. It is an irreplaceable and critical component in the lighting industry.

2. Typical Applications of Molybdenum Wire for Lighting

Residential and Commercial Lighting: Used in incandescent and halogen lamps to provide warm light and long service life.

Automotive Lighting: Functions as electrodes in HID and xenon lamps, offering high brightness and vibration resistance.

Specialty Lighting: Utilized in projection lamps, ultraviolet (UV) lamps, and infrared (IR) lamps to meet high-temperature and high-precision requirements in medical, industrial, and scientific applications.

Emerging Fields: Serves as conductive leads for LED lamps and supports for phosphors in laser lighting, aligning with future lighting technology development.

3. Basic Data of Molybdenum Wire for Lighting (Reference)

Parameter	Pure Mo Wire	Mo-La Wire	Mo-Re Wire
Mo Content	≥99.95%	≥99.0%	52.5%–86.0%
Diameter Range	0.03–3.2 mm	0.03–1.5 mm	0.03–1.0 mm
Tolerance	±0.002 mm	±0.002 mm	±0.002 mm
Tensile Strength (Room Temp)	800–1200 MPa	900–1400 MPa	1000–1500 MPa
Tensile Strength (at 1500°C)	150–300 MPa	200–400 MPa	250–450 MPa
Elongation at Break	10%–25%	12%–20%	15%–25%
Electrical Resistivity (20°C)	$5.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
Main Applications	Incandescent, Halogen	Halogen, Auto Headlights	HID, Projection Lamps

4. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.molybdenum.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Marché et état technique : Le fil de molybdène lanthane représente environ 30 % du marché du fil de molybdène lampe. Grâce à l'introduction de la technologie et à la recherche et au développement indépendants, la Chine a réalisé la production à grande échelle de fil de molybdène lanthane, qui est exporté vers l'Europe et l'Amérique du Nord. Le marché mondial croît à un taux annuel d'environ 5 % et est stimulé par la demande d'éclairage automobile.

Avantages et limites :

Avantages : La résistance au fluage et à l'oxydation à haute température est nettement meilleure que le fil de molybdène pur, adapté aux lampes haute performance. La durée de vie peut atteindre 2 à 3 fois celle du fil de molybdène pur.

Limites : Le processus de dopage augmente le coût de production (environ 3 à 5 USD/kg), et la distribution uniforme de l'oxyde de lanthane impose des exigences élevées aux équipements et aux processus. Un dopage inapproprié peut entraîner une agglomération de particules et une réduction des performances.

Défis techniques : L'optimisation de l'uniformité du dopage et la réduction des coûts sont les principales directions. La technologie de préparation et de dispersion des particules d'oxyde de lanthane à l'échelle nanométrique est au centre de la recherche et du développement futurs.

2.1.3 Fil de molybdène et de rhénium

Le fil de molybdène rhénium est un fil d'alliage fabriqué par dopage du rhénium (Re) dans une matrice de molybdène, qui présente des avantages uniques dans l'éclairage spécial avec son excellente ductilité et sa résistance à l'oxydation.

Composition chimique : le fil de rhénium de molybdène est à base de molybdène et dopé au rhénium métal pour former une solution solide. L'ajout de rhénium améliore la structure cristalline du molybdène et réduit la fragilité à basse température. Les impuretés (telles que l'oxygène et l'azote) doivent être contrôlées en dessous de 0,02 % pour garantir des performances stables.

Propriétés physiques : Le point de fusion du fil de molybdène rhénium est légèrement inférieur à celui du molybdène pur (environ 2600 °C), car le point de fusion du rhénium (3186 °C) est légèrement inférieur. Son coefficient de dilatation thermique ($4,9 \times 10^{-6}/K$) et sa conductivité thermique (environ 130 W/m·K) sont similaires à ceux du molybdène pur, mais la résistance à l'oxydation est considérablement améliorée et le taux d'oxydation est réduit d'environ 30 % à haute température.

Propriétés mécaniques : La résistance à la traction du fil de molybdène rhénium à température ambiante est de 900 à 1200 MPa, et l'allongement à la rupture est de 15 % à 20 %, ce qui est beaucoup plus élevé que celui du fil de molybdène pur (5 % à 10 %). À 2000°C, la résistance à la traction est de 300 à 400 MPa et la résistance à la fatigue est meilleure que celle du fil de molybdène lanthane, qui convient aux environnements de cycles thermiques fréquents.

Stabilité chimique : Le fil de molybdène rhénium se comporte bien dans l'environnement du gaz

[Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale](#)

halogène et du vide, et sa résistance à la corrosion chimique est meilleure que celle du fil de molybdène pur et du fil de molybdène lanthane. Ses propriétés antioxydantes sont dues à la couche d'oxyde protectrice formée par le rhénium, qui ralentit la volatilisation du MoO_3 .

Processus de préparation :

Préparation dopante : La poudre de rhénium est mélangée à la poudre de molybdène par mélange mécanique ou co-précipitation chimique, qui doit être opérée sous vide ou sous atmosphère inerte pour éviter l'oxydation du rhénium.

Métallurgie des poudres : poudre dopée pressée dans une ébauche et frittée sous hydrogène ou sous vide (1900-2100°C). La température de frittage doit être contrôlée avec précision pour éviter la volatilisation du rhénium.

Travail à chaud et tréfilage : L'ébauche est formée par tréfilage de précision après forgeage à chaud et laminage à chaud. Un recuit à basse température (700-1000°C) est nécessaire pendant le processus de tréfilage pour maintenir la ténacité.

Traitement de surface : le fil de molybdène nettoyé est principalement utilisé et la finition de surface est améliorée par polissage électrolytique ou nettoyage chimique.

Scénario d'application : Le fil de molybdène rhénium est principalement utilisé pour les lampes spéciales, telles que les lampes de projection, les lumières de scène, les lampes ultraviolettes médicales et les lampes d'aviation. Sa ductilité élevée convient aux conceptions complexes de formes d'électrodes (par exemple, les électrodes en spirale ou incurvées), et sa résistance à l'oxydation prolonge la durée de vie du luminaire (jusqu'à plus de 3000 heures).

État du marché et de la technologie : le fil de molybdène et de rhénium représente environ 10 % du marché du fil de molybdène pour les lampes. La Chine a atteint une production à petite échelle grâce à l'introduction de la technologie ces dernières années, mais la rareté et le prix élevé du rhénium limitent la taille du marché.

Avantages et limites :

Avantages : La ductilité et la résistance à l'oxydation sont meilleures que le fil de molybdène pur et le fil de molybdène lanthane, adaptés aux formes complexes et aux environnements extrêmes. Haute ténacité et forte résistance aux cycles thermiques.

Limites : Le coût élevé du rhénium fait que le prix du fil de molybdène et de rhénium est environ 3 à 5 fois supérieur à celui du fil de molybdène pur, ce qui limite l'application à grande échelle. Le taux de dopage doit être contrôlé avec précision, car un taux trop élevé peut entraîner un ramollissement du matériau.

Défis techniques : La réduction de la quantité de rhénium ou le développement d'éléments alternatifs (par exemple le ruthénium, l'osmium) sont essentiels à l'optimisation des coûts. L'amélioration de l'uniformité du dopage et de l'efficacité de la production est également la voie à suivre.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

2.1.4 Autres fils de molybdène dopés

En plus du fil de molybdène lanthane et du fil de molybdène rhénium, d'autres fils de molybdène dopés comprennent des fils de molybdène dopés au tungstène, à l'yttrium, au cérium ou à des fils dopés composites multi-éléments, optimisés pour des applications haut de gamme spécifiques.

Fil de tungstène molybdène :

Caractéristiques : Le fil de molybdène dopé au tungstène (W, teneur 1 %-10 %) combine les propriétés d'étanchéité du molybdène avec le point de fusion élevé du tungstène (3422°C). Sa résistance à la traction peut atteindre 600 MPa à 2000°C, ce qui le rend adapté aux luminaires de forte puissance.

Application : Électrodes et matériaux de support pour les lampes à incandescence haute puissance et les lampes aux halogénures métalliques.

Limites : Faible ductilité (allongement à la rupture <5 %), difficulté de traitement élevée et le coût est environ 2 fois supérieur à celui du fil de molybdène pur.

Fil de molybdène yttrium :

Caractéristiques : dopé à l'oxyde d'yttrium (Y_2O_3 , teneur 0,5 %-2 %), température de recristallisation jusqu'à 1900 °C, excellente résistance à l'oxydation et résistance au fluage.

Application : Utilisé dans les lampes spéciales aérospatiales (telles que les feux de navigation) et les lampes infrarouges à haute température.

Limites : Le processus de dopage de l'oxyde d'yttrium est complexe et le rendement est faible (environ 80 %).

Fil de molybdène et de cérium :

Caractéristiques : Oxyde de cérium dopé (CeO_2 , teneur 0,3 %-1 %), forte résistance à la corrosion par arc, adapté aux environnements de décharge à haute fréquence.

Application : utilisé pour les lampes ultraviolettes et les sources lumineuses médicales.

Limites : Coût plus élevé et application sur le marché étroit.

Fil de molybdène dopé multi-éléments :

Caractéristiques : comme le fil composite de molybdène dopé au lanthane, au rhénium et à l'yttrium, qui combine résistance à haute température, ductilité et résistance à l'oxydation.

Applications : Utilisé dans des environnements extrêmes tels que les lampes à décharge à haute pression et les sources lumineuses scientifiques.

Limites : Le processus de préparation est complexe, le coût est élevé et il est limité à la production de petits lots.

Processus de préparation : semblable au fil de molybdène lanthane, il doit être uniformisé par dopage humide ou séchage par pulvérisation, la température de frittage est de 1900-2200 °C, et des moules de haute précision et un recuit multi-passes sont nécessaires pour le tréfilage.

Marché et statut technique : Les autres fils de molybdène dopés représentent 5 % du marché du fil de molybdène lampe, qui est principalement produit par des entreprises étrangères. La Chine a

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

fait quelques progrès dans le domaine du fil de molybdène-yttrium et du fil de molybdène et de cérium, mais la technologie doit encore être percée.

Avantages et limites :

Avantages : Performances optimisées pour des besoins spécifiques pour les applications haut de gamme.

Limites : coût élevé, petite taille du marché, technologie de production complexe.

Défis techniques : Le développement d'éléments de dopage à faible coût et de processus simplifiés est essentiel. L'application de la technologie de dopage à l'échelle nanométrique devrait encore améliorer les performances.

2.2 Classification par utilisation

Selon ses fonctions et ses scénarios d'application dans différents types de lampes, le fil de molybdène pour l'éclairage peut être divisé en lampes à incandescence, lampes halogènes, lampes fluorescentes et lampes à décharge de gaz, et fils de molybdène pour lampes spéciales. Chaque application a des exigences de performance différentes pour le fil de molybdène, impliquant une stabilité à haute température, une résistance à la corrosion, des propriétés électriques et une aptitude au traitement.

2.2.1 Fil de molybdène pour lampes à incandescence

Le fil de molybdène pour lampes à incandescence est principalement utilisé pour le support de filament et l'étanchéité verre-métal, et est l'application de fil de molybdène la plus courante dans l'éclairage traditionnel.

Fonction et fonction : Dans les lampes à incandescence, le fil de molybdène est principalement utilisé comme fil de support pour fixer le filament de tungstène afin de l'empêcher de s'affaisser ou de se casser à haute température (2500-3000°C) ; En tant qu'électrode d'étanchéité, un courant électrique est introduit dans l'ampoule et une connexion hermétique est formée avec le verre, garantissant que le vide ou les gaz inertes (tels que l'argon, l'azote) dans la lampe ne fuient pas.

Exigences de performance :

Stabilité à haute température : Il doit résister à une température de travail de plus de 2000 °C et la résistance à la traction est maintenue à plus de 200 MPa à haute température.

Adaptation de la dilatation thermique : Le coefficient de dilatation thermique doit être fortement adapté au verre borosilicaté ($4,3-5,0 \times 10^{-6}/K$), et la différence doit être $< 0,5 \times 10^{-6}/K$.

Conductivité : La résistivité doit être faible (environ $5,5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) pour garantir l'efficacité de la transmission du courant.

Qualité de surface : Un fil de molybdène nettoyé est généralement utilisé, et la rugosité de surface de $Ra < 0,5 \mu m$ est utilisée pour réduire l'instabilité de l'arc.

Caractéristiques d'application : Les lampes à incandescence ont une faible efficacité lumineuse (10-15 lm / W) et une durée de vie d'environ 1000 heures, principalement utilisées dans l'éclairage

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

domestique, l'éclairage décoratif (comme les ampoules rétro) et les scènes à faible coût. Le fil de molybdène doit fonctionner dans un environnement sous vide ou sous gaz inerte pour éviter l'oxydation.

Processus de préparation :

Sélection de la matière première : de la poudre de molybdène de haute pureté ($\geq 99,95\%$) est utilisée pour le préparer par réduction de l'hydrogène.

Formage et étirage : Les fils de molybdène d'un diamètre de 0,1 à 0,5 mm sont fabriqués par métallurgie des poudres et tréfilage multi-passes. Plusieurs recuits (800-1200°C) sont nécessaires pendant le processus d'emboutissage pour maintenir la ductilité.

Traitement de surface : Le fil de molybdène nettoyé est généralement fabriqué par polissage électrolytique ou décapage (mélange HNO_3 -HF) pour assurer l'adhérence au verre et la stabilité de l'arc.

État du marché : Le marché des lampes à incandescence a diminué en raison de la popularité de l'éclairage LED, mais il représente toujours environ 10 % du marché mondial de l'éclairage, et la quantité de fil de molybdène représente environ 20 % du fil de molybdène de la lampe. Les principaux marchés sont concentrés dans les pays en développement tels que l'Asie du Sud-Est et l'Afrique, et la Chine est le principal fournisseur.

Avantages et limites :

Avantages : technologie mature, faible coût (environ 1 USD/kg), adaptée à la production à grande échelle. Le fil de molybdène pur a d'excellentes performances d'étanchéité et un rendement élevé ($>95\%$).

Limites : Faible résistance au fluage à des températures élevées, durée de vie courte, ne convient pas aux lampes de haute puissance ou à longue durée de vie.

Défis techniques : Améliorer les performances à haute température et la durée de vie du fil de molybdène, et développer des revêtements anti-oxydation à faible coût pour prolonger la durée de vie des lampes à incandescence.

2.2.2 Fil de molybdène pour lampes halogènes

Le fil de molybdène pour les lampes halogènes est un matériau clé dans les applications d'éclairage haut de gamme, où il est largement utilisé pour les électrodes, les supports et les joints, où il est soumis à des températures élevées et à l'attaque chimique des gaz halogènes.

Fonction et fonction : Dans les lampes halogènes, le fil de molybdène est utilisé comme électrode pour guider le courant et démarrer l'arc, comme fil de support pour fixer le filament de tungstène et comme matériau d'étanchéité pour assurer l'étanchéité à l'air. Le cycle halogène implique la réaction des gaz halogènes (par exemple, l'iode, le brome) avec le tungstène évaporé pour déposer le tungstène dans le filament, prolongeant ainsi sa durée de vie.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Exigences de performance :

Performance à haute température : La température de fonctionnement peut atteindre 3000°C, et la résistance à la traction > 300 MPa et une excellente résistance au fluage sont requises.

Résistance chimique : Il doit résister à l'attaque du gaz halogène et la surface doit être résistante aux réactions chimiques à haute température.

Stabilité de l'arc : un état de surface élevé ($R_a < 0,3 \mu\text{m}$) et une faible résistivité assurent un arc uniforme.

Adaptation à la dilatation thermique : Associée au verre de quartz (coefficient de dilatation thermique $0,5-1,0 \times 10^{-6}/\text{K}$) ou au verre borosilicaté.

Caractéristiques d'application : Les lampes halogènes ont une efficacité lumineuse de 20-30 lm / W et une durée de vie de 2000-4000 heures, qui sont largement utilisées dans les phares automobiles, l'éclairage de scène et l'éclairage domestique haut de gamme. Le fil de molybdène est soumis à une combinaison de températures élevées, de cycles thermiques et de corrosion chimique.

Processus de préparation :

Sélection des matières premières : la poudre de molybdène dopée (telle que l'oxyde de lanthane dopée, teneur 0,3 % -1,0 %) est principalement utilisée pour améliorer les performances à haute température.

Formage et étirage : Le fil de molybdène d'un diamètre de 0,05 à 0,3 mm est fabriqué par métallurgie des poudres, forgeage à chaud et tréfilage à plusieurs passes. La température de recuit (900-1300°C) doit être contrôlée avec précision pour optimiser la structure du grain.

Traitement de surface : le fil de molybdène nettoyé est réalisé par polissage électrolytique ou nettoyage chimique, et certaines applications haut de gamme nécessitent le dépôt de revêtements anti-corrosion (tels que le MoSi_2).

État du marché : Les lampes halogènes représentent 15 % du marché mondial de l'éclairage, et la quantité de fil de molybdène représente plus de 30 % du fil de molybdène utilisé dans les lampes. L'éclairage automobile est le principal moteur, avec une demande stable attendue de 2025 à 2030. La Chine, l'Europe et le Japon sont les principaux marchés.

Avantages et limites :

Avantages : Les performances à haute température et la résistance à la corrosion du fil de molybdène lanthane répondent aux besoins des lampes halogènes, avec une longue durée de vie et des performances stables.

Limites : L'oxydation à haute température doit encore être résolue par une protection contre les gaz inertes, et le processus de dopage augmente le coût.

Défi technique : Développer des revêtements de surface résistants aux halogènes et des technologies de dopage à faible coût pour améliorer la durée de vie du fil de molybdène dans des environnements extrêmes.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

2.2.3 Fil de molybdène pour lampes fluorescentes et lampes à décharge

Le fil de molybdène pour les lampes fluorescentes et les lampes à décharge (par exemple, les lampes à décharge à haute intensité, HID) est principalement utilisé comme matériau d'électrode et d'étanchéité, et doit résister à des tensions élevées et à des températures d'arc.

Fonction et fonction : Dans les lampes fluorescentes, le fil de molybdène agit comme une électrode pour initier et maintenir la décharge fluorescente ; Dans les lampes HID (par exemple, les lampes aux halogénures métalliques, les lampes au sodium haute pression), le fil de molybdène est utilisé comme électrode pour résister aux hautes tensions transitoires (>10 kV) et aux températures d'arc (jusqu'à 6000°C), tout en agissant comme un matériau d'étanchéité pour assurer l'herméticité.

Exigences de performance :

Propriétés électriques : Haute conductivité (résistivité $6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) et résistance à la corrosion par arc pour assurer la stabilité de la décharge.

Performance à haute température : La structure doit être intacte à la température élevée de l'arc et la résistance à la traction > 300 MPa.

Stabilité chimique : Il doit résister à l'attaque chimique des gaz à haute pression (tels que la vapeur de mercure, la vapeur de sodium) dans la lampe.

Adaptation à la dilatation thermique : Associée au verre borosilicate ou au verre de quartz.

Caractéristiques d'application : L'efficacité lumineuse des lampes fluorescentes est de 50-100 lm / W et les lampes HID sont de 100-150 lm / W, qui sont largement utilisées dans l'éclairage commercial (bureau, centre commercial), l'éclairage routier et l'éclairage industriel. Le fil de molybdène doit être résistant aux décharges à haute fréquence et à la corrosion chimique.

Processus de préparation :

Sélection de la matière première : le fil de molybdène lanthane ou le fil de molybdène rhénium est principalement utilisé, et le taux de dopage est de 0,3 % à 2 % pour améliorer la résistance à la corrosion de l'arc.

Formage et étirage : Le fil de molybdène d'un diamètre de 0,03 à 0,2 mm est fabriqué par tréfilage de précision, qui doit être recuit à basse température (700-1000 °C) pour maintenir la ténacité.

Traitement de surface : traitement de polissage électrolytique ou de passivation, et certains fils de molybdène pour les lampes HID doivent être déposés avec des revêtements anti-corrosion.

État du marché : Le marché des lampes fluorescentes se rétrécit en raison de la concurrence des LED, les lampes HID représentent toujours 20 % de la part de marché de l'éclairage extérieur et la quantité de fil de molybdène représente 25 % du fil de molybdène utilisé dans les lampes. GE Lighting aux États-Unis et NVC Lighting en Chine sont les principaux utilisateurs.

Avantages et limites :

Avantages : Les hautes performances du fil de molybdène lanthane et du fil de molybdène rhénium répondent aux besoins d'un éclairage à haut rendement et ont une forte stabilité d'arc.

Limites : La durée de vie dans l'environnement de décharge à haute fréquence doit être encore

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

améliorée et le coût du traitement de surface est élevé.

Défi technique : Développer des revêtements résistants aux arcs et optimiser la conception des électrodes pour améliorer l'efficacité et la durée de vie des décharges.

2.2.4 Fil de molybdène pour lampes spéciales (lampes ultraviolettes, lampes infrarouges, etc.)

Le fil de molybdène pour lampes spéciales est conçu pour des environnements spectraux ou extrêmes spécifiques dans les applications médicales, scientifiques, aérospatiales et industrielles.

Fonction et fonction : Dans la lampe ultraviolette, le fil de molybdène est utilisé comme électrode pour initier la décharge ultraviolette ; Dans les lampes infrarouges, les fils de molybdène sont soumis à un rayonnement à haute température en tant que support ou électrode ; Dans les lampes médicales (par exemple les lampes chirurgicales) ou les lampes d'aviation, les fils de molybdène doivent répondre aux exigences d'une grande fiabilité et de formes complexes.

Exigences de performance :

Résistance à la corrosion par arc : Il doit résister aux décharges à haute fréquence et à la corrosion par vapeur de mercure.

Stabilité à haute température : la température de travail peut atteindre plus de 2000°C et la résistance à la traction > 300 MPa.

Ductilité : Les formes d'électrodes complexes (par exemple, spirale, flexion) doivent être soutenues.

Qualité de surface : Une finition élevée est nécessaire pour garantir la pureté spectrale.

Caractéristiques de l'application : Les lampes UV sont utilisées pour la stérilisation et le traitement médical, les lampes infrarouges sont utilisées pour le chauffage et le traitement industriel, et les lampes d'aviation ont besoin d'une grande fiabilité. Le fil de molybdène doit résister à des environnements chimiques complexes et à des rayonnements à haute température.

Processus de préparation :

Sélection des matières premières : le fil de molybdène rhénium ou le fil de molybdène yttrium est principalement utilisé, et le taux de dopage est de 0,5 % à 2 %.

Formage et tréfilage : Le fil de molybdène d'un diamètre de 0,02 à 0,1 mm est fabriqué par tréfilage ultra-précis, ce qui nécessite un recuit à basse température et un moulage haut de gamme.

Traitement de surface : CVD ou PVD pour le revêtement anti-oxydation (par exemple Al_2O_3 , $MoSi_2$).

État du marché : La taille du marché des lampes spéciales est petite (représentant 5 % du marché mondial de l'éclairage), mais la valeur ajoutée est élevée et la quantité de fil de molybdène représente 10 % du fil de molybdène utilisé dans les lampes.

Avantages et limites :

Avantages : Des performances élevées répondent aux besoins professionnels et une longue durée de vie (jusqu'à 5000 heures).

Limites : Coût élevé (environ 10 \$/kg), production personnalisée requise.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Défi technique : Élargir la gamme d'applications des lampes spéciales en développant des technologies de revêtement à faible coût et de traitement de formes complexes.

2.3 Classification par spécification

Les spécifications du fil de molybdène pour l'éclairage sont classées en fonction de la gamme de diamètre, du type de traitement de surface et de la morphologie du fil, ce qui affecte directement ses performances et son application.

2.3.1 Plage de diamètres et tolérance

Le diamètre et la tolérance du fil de molybdène sont les paramètres fondamentaux de ses spécifications, qui déterminent ses propriétés électriques, mécaniques et de traitement.

Gamme de diamètre :

Fil de molybdène ultra-fin (0,01-0,05 mm) : utilisé pour les lampes spéciales de haute précision (par exemple les lampes UV, les lampes médicales) qui nécessitent une ductilité et une finition de surface élevées. Haute résistivité (environ $6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$), adaptée aux électrodes haute tension.

Fil de molybdène fin (0,05-0,2 mm) : électrode ou fil de support pour lampes halogènes, HID et fluorescentes, représentant plus de 60 % du marché.

Fil de molybdène moyennement grossier (0,2-0,5 mm) : fil de support et matériau d'étanchéité pour les lampes à incandescence à haute résistance mécanique.

Fil de molybdène grossier (0,5-2,0 mm) : composants structurels pour luminaires haute puissance (par exemple lampes infrarouges industrielles).

Exigences de tolérance : Selon GB/T 4191-2015 et ASTM B387, la tolérance du fil de molybdène ultra-fin est de $\pm 0,001$ mm, celle du fil de molybdène fin est de $\pm 0,002$ mm et celle du fil de molybdène grossier est de $\pm 0,01$ mm. Le contrôle de la tolérance est réalisé par micrométrie laser et inspection en ligne.

Facteurs d'influence : plus le diamètre est petit, plus la résistivité, adaptée à l'électrode, est élevée ; Plus le diamètre est grand, plus la résistance est élevée et convient au support. La précision des tolérances affecte la fiabilité de l'étanchéité et la stabilité de l'arc.

Processus de préparation : le fil de molybdène ultra-fin nécessite 20 à 30 fois d'étirage, à l'aide d'un moule diamanté et d'un recuit à basse température (700-900 °C). Le fil de molybdène grossier nécessite un moule à haute résistance et un recuit à haute température (1000-1200°C).

État du marché : Le fil de molybdène fin (0,05-0,2 mm) est le plus demandé, et la Chine a atteint une production de haute précision grâce à l'introduction d'équipements allemands.

Défi technique : Augmenter le rendement du fil de molybdène ultra-fin (actuellement environ 85 %) et réduire le coût du contrôle des tolérances.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire for Lighting Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire for Lighting

As one of the core materials in modern lighting technology, molybdenum wire is widely used in various light sources including incandescent lamps, halogen lamps, fluorescent lamps, and gas discharge lamps, due to its high melting point, high strength, excellent corrosion resistance, and superior electrical conductivity. It is an irreplaceable and critical component in the lighting industry.

2. Typical Applications of Molybdenum Wire for Lighting

Residential and Commercial Lighting: Used in incandescent and halogen lamps to provide warm light and long service life.

Automotive Lighting: Functions as electrodes in HID and xenon lamps, offering high brightness and vibration resistance.

Specialty Lighting: Utilized in projection lamps, ultraviolet (UV) lamps, and infrared (IR) lamps to meet high-temperature and high-precision requirements in medical, industrial, and scientific applications.

Emerging Fields: Serves as conductive leads for LED lamps and supports for phosphors in laser lighting, aligning with future lighting technology development.

3. Basic Data of Molybdenum Wire for Lighting (Reference)

Parameter	Pure Mo Wire	Mo-La Wire	Mo-Re Wire
Mo Content	≥99.95%	≥99.0%	52.5%–86.0%
Diameter Range	0.03–3.2 mm	0.03–1.5 mm	0.03–1.0 mm
Tolerance	±0.002 mm	±0.002 mm	±0.002 mm
Tensile Strength (Room Temp)	800–1200 MPa	900–1400 MPa	1000–1500 MPa
Tensile Strength (at 1500°C)	150–300 MPa	200–400 MPa	250–450 MPa
Elongation at Break	10%–25%	12%–20%	15%–25%
Electrical Resistivity (20°C)	$5.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
Main Applications	Incandescent, Halogen	Halogen, Auto Headlights	HID, Projection Lamps

4. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.molybdenum.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

2.3.2 Type de traitement de surface (fil de molybdène noir, fil de molybdène nettoyé, fil de molybdène revêtu)

Le type de traitement de surface a un impact significatif sur les propriétés électriques, la résistance à la corrosion et les scénarios d'application du fil de molybdène.

Fil de molybdène noir :

Caractéristiques : La surface présente une couche d'oxyde noir (MoO_2 ou MoO_3) et une rugosité de Ra 0,5-2,0 μm . La couche d'oxyde améliore l'adhérence au verre.

Processus de préparation : Après l'étirage, recuit (800-1000°C) à l'air ou sous vide poussé pour former une couche d'oxyde.

Application : Filament de support et étanchéité à faible coût pour les lampes à incandescence, représentant 20 % du marché.

Avantages et limites : faible coût, mais faible stabilité de l'arc, ne convient pas aux luminaires haute performance.

Fil de molybdène nettoyé :

Caractéristiques : Élimination de la couche d'oxyde par polissage électrolytique ou décapage, surface lisse (Ra 0,1-0,5 μm), excellente conductivité et résistance à la corrosion.

Procédé de préparation : décapage en solution mixte HNO_3 -HF ou polissage électrolytique en solution NaOH, protection de l'environnement, traitement des déchets liquides.

Application : Électrodes et joints pour lampes halogènes, HID et spéciales, représentant 70 % du marché.

Avantages et limites : Excellentes performances et longue durée de vie, mais coûts de traitement élevés.

Fil de molybdène revêtu :

Propriétés : Dépôts de revêtements résistants à l'oxydation ou à la corrosion (par exemple Al_2O_3 , MoSi_2) d'une épaisseur de 0,1 à 1,0 μm .

Processus de préparation : la technologie CVD ou PVD est adoptée, un environnement sous vide et un équipement de haute précision sont nécessaires.

Application : Utilisé dans des environnements extrêmes tels que les lampes ultraviolettes et les lampes infrarouges, représentant 5 % du marché.

Avantages et limites : La durée de vie est prolongée de 2 à 3 fois, mais le coût est élevé (environ 10 USD/kg).

État du marché : Le fil de molybdène nettoyé est le courant dominant, et le fil de molybdène revêtu connaît une croissance rapide sur les marchés européen et américain.

Défi technique : Développement d'une technologie de revêtement à faible coût et de procédés de traitement de surface respectueux de l'environnement.

2.3.3 Forme du fil (fil droit, fil enroulé, fil coupé)

La forme du fil affecte la façon dont le fil de molybdène est traité, transporté et appliqué.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Fil droit :

Caractéristiques : Longueur fixe (10-100 cm), adaptée à l'assemblage automatisé.

Processus de préparation : Après l'étirage, il est coupé par une machine de découpe de haute précision, et l'incision doit être lisse et sans bavure.

Application : Utilisé pour le filament de support et l'étanchéité des lampes à incandescence et des lampes halogènes, représentant 30 % du marché.

Avantages et limites : L'efficacité de l'installation est élevée, mais le transport est facile à déformer.

Enroulement:

Caractéristiques : Enroulé sur bobines, la longueur peut atteindre plusieurs kilomètres, adapté au traitement continu.

Processus de préparation : Après l'étirage, il est enroulé par l'enrouleur et la tension doit être contrôlée.

Application : Pour la production de lampes à grande échelle, représentant 50 % du marché.

Avantages et limites : Facile à stocker et à transporter, nécessite un équipement de déroulement.

Fil de coupe :

Caractéristiques : Longueur courte (1-10 mm) pour un assemblage de précision.

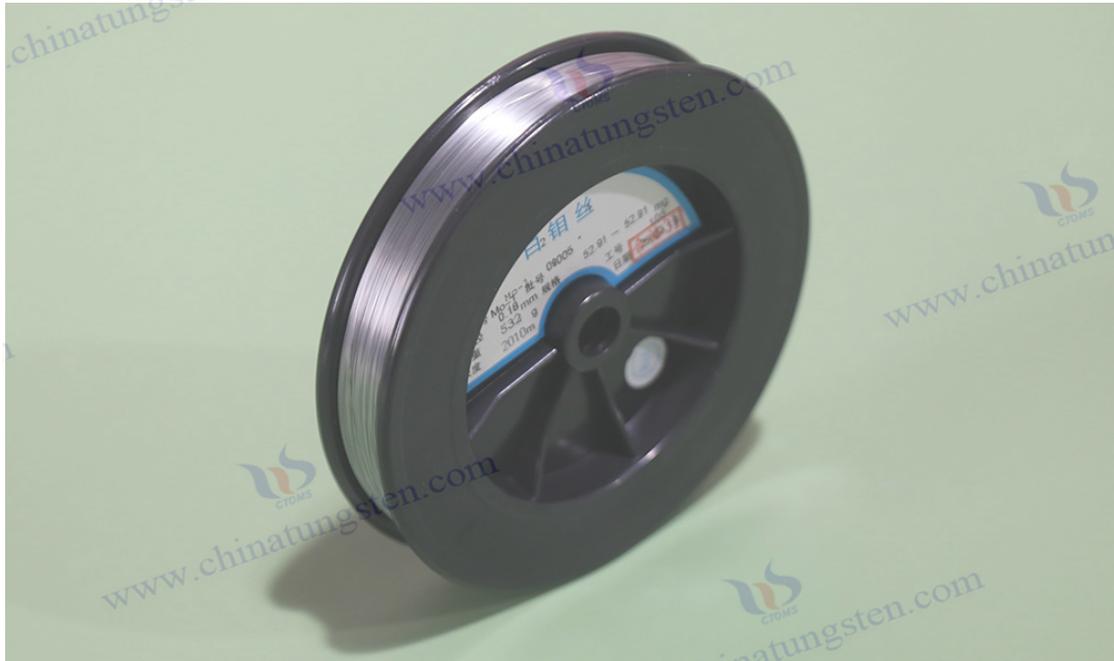
Processus de préparation : coupe de haute précision pour assurer la cohérence de la longueur.

Application : Électrodes complexes pour lampes spéciales, représentant 10 % du marché.

Avantages et limites : adapté à la personnalisation, faible efficacité de production.

État du marché : le fil enroulé est le courant dominant, et le fil droit et le fil coupé sont principalement utilisés dans les applications haut de gamme.

Défi technique : Améliorer la précision du fil coupé et réduire le coût de transport du fil droit.



fil de molybdène pour l'éclairage de CTIA

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Chapitre 3 Caractéristiques du fil de molybdène pour l'éclairage

Les caractéristiques du fil de molybdène pour l'éclairage sont la clé de son application dans le domaine de l'éclairage, couvrant les informations physiques, chimiques, mécaniques, électriques, optiques et les informations connexes de la fiche de données de sécurité (FDS). Ce chapitre explore ces caractéristiques en détail, analyse leur impact sur les performances des dispositifs d'éclairage et fournit une description technique complète basée sur la recherche mondiale et les pratiques de l'industrie.

3.1 Caractéristiques physiques du fil de molybdène pour l'éclairage

Les propriétés physiques du fil de molybdène pour l'éclairage déterminent ses performances à haute température, à haute pression et dans des environnements complexes, notamment la densité et le point de fusion, le coefficient de dilatation thermique et la dépendance à la température, la conductivité thermique et la conductivité électrique. Ces propriétés affectent directement la stabilité structurelle, la capacité de gestion thermique et les performances électriques du fil de molybdène dans les luminaires.

3.1.1 Densité et point de fusion du fil de molybdène pour l'éclairage

Avec une densité de $10,2 \text{ g/cm}^3$, le fil de molybdène est un matériau métallique de haute densité, à peine inférieur au tungstène ($19,25 \text{ g/cm}^3$). Cette densité confère au fil de molybdène une grande stabilité de masse, ce qui lui permet de résister aux contraintes mécaniques et aux vibrations dans la structure de support ou les électrodes du luminaire. Par exemple, dans les phares automobiles, le fil de molybdène doit résister aux vibrations du véhicule pendant la conduite, et le fil de molybdène modérément dense peut fournir une résistance suffisante sans augmenter la difficulté de conception de la lampe en raison d'un poids excessif.

Le fil de molybdène a un point de fusion de $2623 \text{ }^\circ\text{C}$ (2896 K), ce qui est l'un de ses principaux avantages en tant que métal réfractaire, juste derrière le tungstène ($3422 \text{ }^\circ\text{C}$) et le rhénium ($3186 \text{ }^\circ\text{C}$). Ce point de fusion élevé permet au filament de molybdène de fonctionner de manière stable dans les lampes à incandescence (température du filament jusqu'à 2500°C), les lampes halogènes (température du filament jusqu'à 3000°C) et les lampes à décharge de gaz à haute intensité (HID, température centrale de l'arc jusqu'à 6000°C) sans fusion ni déformation significative. Dans les applications pratiques, le fil de molybdène fonctionne généralement à des températures bien inférieures à son point de fusion ($1000\text{-}2000^\circ\text{C}$) pour éviter le ramollissement du matériau à l'approche de son point de fusion. Le fil de molybdène a un point de fusion légèrement inférieur à celui du tungstène, mais ses coûts de traitement sont inférieurs et sa résistance au fluage inférieure à 2000°C le rend idéal pour le support de filament et les matériaux d'étanchéité.

La densité et le point de fusion du fil de molybdène sont également étroitement liés à sa structure cristalline. La structure cristalline cubique centrée sur le corps (BCC) du molybdène reste stable à haute température, et de petits changements dans la constante du réseau, qui se dilate légèrement avec l'augmentation de la température, assurent son intégrité structurelle pendant le cycle thermique. En production, la densité du fil de molybdène est contrôlée par le processus de frittage de poudre

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

de molybdène de haute pureté (pureté $\geq 99,95\%$), et le point de fusion est encore optimisé en dotant des oligo-éléments tels que l'oxyde de lanthane pour augmenter la température de recristallisation (d'environ 1400°C à plus de 1800°C).

3.1.2 Coefficient de dilatation thermique et dépendance à la température du fil de molybdène pour l'éclairage

Le coefficient de dilatation thermique du fil de molybdène est de $4,8 \times 10^{-6}/\text{K}$ (dans la plage de 20 à 1000°C), ce qui est hautement compatible avec le verre borosilicaté (environ $4,5-5,0 \times 10^{-6}/\text{K}$). Cette propriété fait du fil de molybdène le matériau de choix pour l'étanchéité verre-métal des lampes, garantissant que le fil de molybdène et le verre ne provoqueront pas de fissures de contrainte dues à la différence de dilatation thermique lors d'un fonctionnement à des températures élevées (par exemple, la température de la partie d'étanchéité des lampes halogènes peut atteindre $600-800^{\circ}\text{C}$). En revanche, le tungstène a un coefficient de dilatation thermique légèrement inférieur ($4,5 \times 10^{-6}/\text{K}$) et peut nécessiter un matériau de transition supplémentaire, tandis que le cuivre ($16,5 \times 10^{-6}/\text{K}$) ne correspond pas à la dilatation thermique du verre et ne peut pas être utilisé pour l'étanchéité.

Le coefficient de dilatation thermique du fil de molybdène augmente légèrement avec l'augmentation de la température, par exemple jusqu'à $5,2 \times 10^{-6}$ à $1500^{\circ}\text{C}/\text{K}$. Cette dépendance à la température est une considération particulière dans la conception des luminaires, en particulier dans les lampes halogènes ou HID avec des cycles thermiques fréquents. Afin de réduire l'effet de la dilatation thermique, le fil de molybdène est souvent dopé avec de l'oxyde de lanthane ou du rhénium pour optimiser la structure cristalline et réduire la dilatation du réseau à haute température. De plus, le coefficient de dilatation thermique du fil de molybdène est étroitement lié au traitement de surface, et le fil de molybdène nettoyé (poli électrolytiquement) se dilate plus uniformément à haute température que le fil de molybdène noir (avec une couche d'oxyde à la surface) car il présente moins de défauts de surface.

Dans les applications pratiques, l'adaptation du coefficient de dilatation thermique affecte directement l'étanchéité à l'air et la durée de vie du luminaire. Par exemple, dans les lampes au sodium haute pression, le joint en fil de molybdène est soumis à un changement de température cyclique de 500 à 700°C , et un décalage dans le coefficient de dilatation thermique peut entraîner des fissures dans le verre ou des fuites de gaz. Par conséquent, des tests précis de dilatation thermique (par exemple, des mesures de dilatomètre) et l'optimisation de la composition du verre sont nécessaires en production pour garantir la fiabilité de l'étanchéité.

3.1.3 Analyse de la conductivité thermique et de la conductivité du fil de molybdène pour l'éclairage

La conductivité thermique du fil de molybdène est de $138 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ (20°C), ce qui est modérément élevé parmi les métaux, inférieur au cuivre ($401 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$) mais supérieur à celui du tungstène ($173 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$). La conductivité thermique élevée permet au fil de molybdène de transférer rapidement la chaleur générée pendant le fonctionnement du luminaire des zones chaudes (par exemple, près des arcs ou des filaments) aux zones à basse température (par exemple, les sites d'étanchéité), réduisant ainsi le risque de surchauffe locale et protégeant la structure du luminaire. Par exemple, dans les

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

lampes halogènes, le fil de molybdène doit être utilisé comme fil de support pour dissiper efficacement la chaleur du filament afin d'éviter la surchauffe du joint en verre ($> 800^{\circ}\text{C}$ peut provoquer le ramollissement du verre).

La conductivité du fil de molybdène est d'environ $1,8 \times 10^7 \text{ S/m}$ (résistivité $5,5 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$), qui se comporte bien dans les métaux à haute température, légèrement en dessous du cuivre ($5,9 \times 10^7 \text{ S/m}$) mais proche du tungstène ($1,9 \times 10^7 \text{ S/m}$). Sa conductivité électrique garantit que le fil de molybdène peut transmettre efficacement le courant dans l'électrode ou le composant conducteur, réduisant ainsi les pertes d'énergie. Dans les lampes à décharge gazeuse, les électrodes en fil de molybdène sont soumises à des tensions élevées (des centaines à des milliers de volts) et à des courants élevés instantanés (plusieurs ampères), et une conductivité élevée peut réduire l'échauffement par effet Joule et prolonger la durée de vie de l'électrode.

La dépendance de la température de la conductivité thermique et de la conductivité électrique est un facteur clé dans la conception. Avec l'augmentation de la température, la conductivité thermique du fil de molybdène diminue légèrement (environ $120 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ à 1000°C) et augmente la résistivité (environ $2,0 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ à 1000°C). Les fils de molybdène dopés, tels que les fils de molybdène lanthane, peuvent ralentir la baisse de conductivité à haute température en optimisant la structure cristalline. Par exemple, un fil de molybdène dopé à 1 % d'oxyde de lanthane a une résistivité d'environ 10 % inférieure à celle du fil de molybdène pur à 1500°C . En production, la conductivité thermique et la conductivité électrique sont optimisées en contrôlant la pureté, la taille des grains et la finition de surface du fil de molybdène.

3.2 Caractéristiques chimiques du fil de molybdène pour l'éclairage

Les propriétés chimiques du fil de molybdène pour l'éclairage déterminent sa stabilité et sa durée de vie dans l'environnement chimique complexe des lampes (tels que le gaz halogène, le vide à haute température), y compris principalement la résistance à l'oxydation, la résistance à la corrosion et l'interaction avec les gaz inertes et l'environnement sous vide.

3.2.1 Résistance à l'oxydation et stabilité à haute température du fil de molybdène pour l'éclairage

Le fil de molybdène a une bonne résistance à l'oxydation à température ambiante, et une fine couche protectrice d'oxyde (MoO_2) peut être formée à sa surface pour empêcher une oxydation supplémentaire. Cependant, lorsqu'ils sont exposés à l'air à des températures élevées ($>600^{\circ}\text{C}$), les filaments de molybdène se transforment rapidement en trioxyde de molybdène (MoO_3), qui est volatil, entraînant une perte de matière et une dégradation des performances. Dans les applications d'éclairage, les luminaires fonctionnent souvent sous vide ou dans un gaz inerte (par exemple, argon, azote) pour éviter l'oxydation. Par exemple, les lampes à incandescence sont remplies de gaz argon et d'une petite quantité de gaz halogène pour protéger le fil de molybdène de l'oxydation.

Afin d'améliorer les performances antioxydantes, le fil de molybdène dopé (tel que le fil de molybdène lanthane, le fil de molybdène rhénium) est largement utilisé. L'ajout d'oxyde de lanthane ralentit la diffusion des atomes de molybdène à haute température en épinglant les joints de grains

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

et retarde l'apparition de la réaction d'oxydation. En raison de l'effet de renforcement de la solution du rhénium, le fil de molybdène rhénium peut former une couche d'oxyde de surface plus stable au-dessus de 1000°C et ralentir la volatilisation du MoO₃. Des études ont montré que le taux d'oxydation du fil de molybdène dopé avec 1 % d'oxyde de lanthane dans l'air à 1200°C est environ 30 % inférieur à celui du fil de molybdène pur. De plus, les technologies de revêtement, telles que les revêtements en aluminium ou en siliciure de molybdène, améliorent encore la résistance à l'oxydation et conviennent aux luminaires spéciaux.

En termes de stabilité à haute température, la température de recristallisation du fil de molybdène (environ 1400°C pour le molybdène pur) est un indicateur clé. La recristallisation entraîne la croissance des grains et la fragilisation du matériau, réduisant ainsi la résistance mécanique. Le fil de molybdène dopé prolonge considérablement la durée de vie à haute température en augmentant la température de recristallisation (jusqu'à 1800°C pour le fil de molybdène lanthane et environ 1700°C pour le fil de molybdène rhénium). Dans les lampes halogènes, le fil de molybdène doit fonctionner à 1500-2000°C pendant une longue période, et l'excellente stabilité à haute température du fil de molybdène dopé garantit son intégrité structurelle.

3.2.2 Résistance à la corrosion du fil de molybdène pour l'éclairage

La résistance à la corrosion du fil de molybdène dans les lampes se reflète principalement dans sa résistance aux gaz halogènes (tels que l'iode, le brome), à la vapeur de mercure et à d'autres produits chimiques. Dans les lampes halogènes, le fil de molybdène est en contact direct avec le gaz halogène et doit résister aux attaques chimiques à des températures élevées (1000-1500°C). La stabilité chimique du molybdène lui permet de bien fonctionner dans des environnements d'iode ou de brome sans formation de composés volatils ou de corrosion importante. En revanche, le tungstène est sujet à la formation d'halogénures volatils (par exemple, WBr₆) dans les environnements halogènes, ce qui entraîne une perte de filaments.

Dans les lampes à décharge gazeuse, telles que les lampes au mercure à haute pression ou les lampes aux halogénures métalliques, le fil-électrode de molybdène doit résister aux vapeurs de mercure et aux halogénures métalliques (par exemple, l'iodure de sodium). Les résultats montrent que le fil de molybdène peut maintenir l'intégrité de surface dans la vapeur de mercure (500-800°C) avec un taux de corrosion inférieur à 0,01 mg/cm²·h. Le fil de molybdène dopé, tel que le fil de molybdène lanthane, améliore encore la résistance à la corrosion en formant une structure de surface stable. Par exemple, un fil de molybdène dopé à l'oxyde de lanthane peut réduire les pertes par corrosion d'environ 20 % dans un environnement d'iodure de sodium.

La résistance à la corrosion est également liée au traitement de surface du fil de molybdène. Le fil de molybdène nettoyé (poli électrolytiquement) présente peu de défauts de surface et un taux de corrosion inférieur à celui du fil de molybdène noir (avec une couche d'oxyde à la surface). En production, le fil de molybdène est souvent utilisé pour éliminer les oxydes de surface par décapage (mélange HNO₃-HF) ou polissage électrolytique (solution NaOH) afin d'améliorer la résistance à la corrosion. De plus, les fils de molybdène revêtus, tels que les revêtements de siliciure de molybdène, fonctionnent bien dans des environnements extrêmement corrosifs tels que la vapeur de mercure

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

dans les lampes UV, mais à un coût plus élevé.

3.2.3 Interaction entre le fil de molybdène pour l'éclairage et les gaz inertes et l'environnement sous vide

Le fil de molybdène pour l'éclairage est généralement utilisé dans un vide ou un gaz inerte (par exemple, argon, azote, krypton) pour éviter l'oxydation et prolonger la durée de vie. Dans un environnement sous vide (par exemple à l'intérieur d'une lampe à incandescence, la pression est de $<10^{-3}$ Pa), la stabilité chimique du fil de molybdène est extrêmement élevée, il n'y a presque pas de réaction avec les gaz et la surface reste stable. L'environnement de vide réduit également les pertes de chaleur par convection, de sorte que la chaleur du fil de molybdène est principalement dissipée par conduction thermique et rayonnement, ce qui contribue à l'efficacité énergétique de la lampe.

Dans un environnement de gaz inerte (comme une lampe halogène, remplie d'argon et d'une petite quantité de gaz halogène, pression 0,1-1 MPa), le fil de molybdène n'a pas de réaction chimique évidente avec l'argon ou l'azote, mais peut avoir une faible adsorption de surface ou une liaison chimique avec le gaz halogène à haute température. Des études ont montré que le filament de molybdène peut former une fine couche d'iodure de molybdène (MoI_3) à la surface du gaz argon contenant de l'iode (1200°C), mais le composé se décompose rapidement à haute température sans affecter les performances des lampes. Les fils de molybdène dopés, tels que les fils de molybdène lanthane, peuvent réduire cet effet d'adsorption en optimisant la structure de surface.

Dans les lampes à décharge gazeuse, le fil-électrode en molybdène interagit avec des mélanges de gaz complexes (vapeur de mercure, halogénures métalliques, gaz inertes). La grande stabilité chimique du fil de molybdène garantit qu'il ne subit pas de dégradation chimique significative dans ces environnements, mais l'arc électrique peut provoquer des modifications microstructurelles de surface telles que la corrosion des joints de grains. Pour cette raison, la stabilité du fil de molybdène est souvent améliorée par la passivation de surface ou la technologie de dopage dans la production.

3.3 Caractéristiques mécaniques du fil de molybdène pour l'éclairage

Les propriétés mécaniques du fil de molybdène pour l'éclairage affectent directement sa stabilité structurelle et sa durabilité dans les lampes, y compris la résistance à la traction et les propriétés de fluage, la ductilité et la ténacité, la résistance à la fatigue et la résistance à la rupture à haute température. Ces propriétés sont particulièrement importantes dans les environnements à haute température, les cycles thermiques et les vibrations mécaniques.

3.3.1 Résistance à la traction à haute température et propriétés de fluage du fil de molybdène pour l'éclairage

La résistance à la traction du fil de molybdène est de 800 à 1000 MPa à température ambiante, mais elle diminuera considérablement à haute température ($>1000^\circ\text{C}$). Par exemple, la résistance à la traction du fil de molybdène pur à 1500°C est d'environ 200 MPa. Le fil de molybdène dopé améliore considérablement la résistance à haute température grâce au renforcement des joints de grains, et le fil de molybdène lanthane peut atteindre 300-500 MPa à 1500°C , et le fil de molybdène-rhénium est d'environ 250-400 MPa. Cette haute résistance permet au fil de molybdène d'agir

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

comme un matériau de support de filament pour résister aux charges à haute température dans les lampes à incandescence ou halogènes.

Les performances de fluage sont un indicateur clé du fil de molybdène pour un fonctionnement à long terme à des températures élevées. Le fluage fait référence au processus par lequel un matériau se déforme lentement sous une contrainte soutenue, ce qui peut entraîner une défaillance du support de filament ou une déformation de l'électrode. Le fil de molybdène pur a tendance à fluer au-dessus de 1200°C avec un taux de fluage d'environ 10^{-5} s^{-1} (à une contrainte de 100 MPa). Le fil de molybdène dopé réduit considérablement le taux de fluage en épinglant les dislocations des joints de grains, par exemple, le fil de molybdène dopé avec 1 % d'oxyde de lanthane a un taux de fluage inférieur de plus de 50 % à celui du fil de molybdène pur à 1500°C. En raison de l'effet de renforcement de la solution solide du rhénium, les performances de fluage du fil de molybdène et de rhénium sont également meilleures que celles du fil de molybdène pur.

Dans les lampes halogènes, le support en fil de molybdène est soumis à un cycle thermique (montée rapide de la température ambiante à 1500°C), et la résistance à la traction et au fluage à haute température déterminent directement la durée de vie de la lampe. La résistance au fluage du fil de molybdène est améliorée en production en optimisant la taille des grains (généralement de 10 à 50 μm) et le processus de dopage.

3.3.2 Ductilité et ténacité du fil de molybdène pour l'éclairage

La ductilité du fil de molybdène fait référence à sa capacité à se déformer plastiquement lorsqu'il est étiré, et l'allongement à la rupture du fil de molybdène pur est de 10 % à 15 % à température ambiante. Le fil de molybdène dopé (tel que le fil de molybdène rhénium) améliore considérablement la ductilité par renforcement de la solution, et l'allongement à la rupture peut atteindre 20 % à 25 %. La ductilité élevée rend le fil de molybdène difficile à casser pendant le processus d'étirage et de formage, et convient à la fabrication d'électrodes ou de structures de support aux formes complexes.

La ténacité reflète la capacité du fil de molybdène à absorber l'énergie de l'impact et à prévenir les fractures fragiles. Dans les luminaires, les fils de molybdène sont soumis à des vibrations (par exemple, les lampes automobiles) ou à des chocs thermiques (par exemple, les commutations fréquentes des lampes halogènes). À haute température (>1000°C), le fil de molybdène pur devient cassant en raison de la recristallisation et la ténacité diminue. Le fil de molybdène lanthane est renforcé par la dispersion des particules d'oxyde de lanthane, ce qui maintient la ténacité à haute température, et la ténacité à la rupture (K_{IC}) est d'environ $10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ à 1500°C, ce qui est supérieur à celui du fil de molybdène pur de $7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Le fil de molybdène rhénium a une meilleure ténacité et convient aux environnements à fortes vibrations.

En production, l'optimisation de la ductilité et de la ténacité dépend de la température de recuit (800-1200°C) et de la répartition uniforme des éléments de dopage dans le processus d'emboutissage. Le fil de molybdène ultra-fin (<0,05 mm de diamètre) nécessite une ductilité plus élevée et nécessite un recuit à basse température et un moulage de précision.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire for Lighting Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire for Lighting

As one of the core materials in modern lighting technology, molybdenum wire is widely used in various light sources including incandescent lamps, halogen lamps, fluorescent lamps, and gas discharge lamps, due to its high melting point, high strength, excellent corrosion resistance, and superior electrical conductivity. It is an irreplaceable and critical component in the lighting industry.

2. Typical Applications of Molybdenum Wire for Lighting

Residential and Commercial Lighting: Used in incandescent and halogen lamps to provide warm light and long service life.

Automotive Lighting: Functions as electrodes in HID and xenon lamps, offering high brightness and vibration resistance.

Specialty Lighting: Utilized in projection lamps, ultraviolet (UV) lamps, and infrared (IR) lamps to meet high-temperature and high-precision requirements in medical, industrial, and scientific applications.

Emerging Fields: Serves as conductive leads for LED lamps and supports for phosphors in laser lighting, aligning with future lighting technology development.

3. Basic Data of Molybdenum Wire for Lighting (Reference)

Parameter	Pure Mo Wire	Mo-La Wire	Mo-Re Wire
Mo Content	≥99.95%	≥99.0%	52.5%–86.0%
Diameter Range	0.03–3.2 mm	0.03–1.5 mm	0.03–1.0 mm
Tolerance	±0.002 mm	±0.002 mm	±0.002 mm
Tensile Strength (Room Temp)	800–1200 MPa	900–1400 MPa	1000–1500 MPa
Tensile Strength (at 1500°C)	150–300 MPa	200–400 MPa	250–450 MPa
Elongation at Break	10%–25%	12%–20%	15%–25%
Electrical Resistivity (20°C)	$5.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
Main Applications	Incandescent, Halogen	Halogen, Auto Headlights	HID, Projection Lamps

4. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.molybdenum.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

3.3.3 Résistance à la fatigue et à la rupture du fil de molybdène pour l'éclairage

La résistance à la fatigue reflète la durabilité du fil de molybdène sous contrainte cyclique. Dans les phares automobiles ou les éclairages de scène, les fils de molybdène sont soumis à des cycles thermiques fréquents et à des vibrations mécaniques, ce qui peut entraîner des fissures de fatigue. La durée de vie en fatigue du fil de molybdène pur est plus courte à haute température (environ 10^4 cycles, contrainte de 100 MPa), tandis que la résistance à la fatigue du fil de molybdène dopé (tel que le fil de molybdène lanthane) peut être augmentée à plus de 10^5 cycles grâce au renforcement des joints de grains.

La résistance à la rupture est étroitement liée à la taille des grains et aux défauts de surface du fil de molybdène. Les grains fins (10-20 μm) dispersent les concentrations de contraintes et améliorent la résistance à la rupture. En raison de sa finition de surface élevée ($R_a < 0,5 \mu\text{m}$) et de ses quelques points d'initiation de fissure, le fil de molybdène nettoyé a une meilleure résistance à la rupture que le fil de molybdène noir ($R_a 0,5-2,0 \mu\text{m}$). En production, le polissage de surface et la détection des défauts (par exemple, la détection de défauts par ultrasons) sont essentiels pour améliorer la résistance à la rupture.

Dans les lampes HID, les électrodes en fil de molybdène doivent résister à la concentration de contraintes causée par l'impact de l'arc, et le fil de molybdène dopé (tel que le fil de molybdène rhénium) peut réduire efficacement le risque de fracture en raison de sa ténacité élevée et de sa résistance à la fatigue.

3.4 Caractéristiques électriques du fil de molybdène pour l'éclairage

Les propriétés électriques du fil de molybdène pour l'éclairage déterminent ses performances en tant qu'électrode ou composant conducteur, notamment la résistivité et le coefficient de température, la capacité de transport de courant et la stabilité de l'arc.

3.4.1 Résistivité et coefficient de température du fil de molybdène pour l'éclairage

La résistivité du fil de molybdène est de $5,5 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ à 20°C , légèrement supérieure au cuivre ($1,68 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$) mais proche du tungstène ($5,6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$). La résistivité augmente avec la température et est d'environ $2,0 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ à 1000°C , jusqu'à $4,0 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ à 2000°C . Le coefficient de température (TCR) de la résistivité est de $0,0045 \text{ K}^{-1}$ (20-1000 $^\circ\text{C}$), ce qui indique que sa conductivité diminue rapidement avec l'augmentation de la température.

Le fil de molybdène dopé peut réduire la résistivité à haute température en optimisant la structure cristalline. Par exemple, un fil de molybdène dopé à 1 % d'oxyde de lanthane a une résistivité d'environ 10 % inférieure à celle du fil de molybdène pur à 1500°C , car les particules d'oxyde de lanthane réduisent la diffusion des joints de grains. En raison de l'effet de solution solide du rhénium, la résistivité du fil de molybdène rhénium est légèrement plus élevée (environ $6,0 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ à 20°C), mais son coefficient de température est plus stable, adapté aux environnements de décharge à haute fréquence.

Dans les luminaires, la résistivité a un impact direct sur les pertes d'énergie et la production de

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

chaleur. Le fil de molybdène à faible résistivité réduit l'échauffement par effet Joule et améliore l'efficacité des luminaires. Dans les lampes HID, la résistivité des fils-électrodes en molybdène doit être contrôlée avec précision pour assurer la stabilité du démarrage de l'arc.

3.4.2 Capacité de transport de courant du fil de molybdène pour l'éclairage

La capacité de transport de courant d'un fil de molybdène dépend de son diamètre, de la pureté du matériau et de la température de fonctionnement. Un fil de molybdène pur d'un diamètre de 0,1 mm peut transporter un courant d'environ 10 A à 20 °C et descendre à environ 5 A à 1000 °C. Le fil de molybdène dopé (tel que le fil de molybdène lanthane) a une capacité de transport de courant légèrement meilleure en raison de sa résistance plus élevée à haute température, et peut transporter 4-6 A (0,1 mm de diamètre) à 1500°C.

Dans les lampes à décharge gazeuse, les fils-électrodes en molybdène sont soumis à des courants élevés instantanés (10-100 A pendant quelques millisecondes), nécessitant une conductivité élevée et une résistance aux chocs thermiques. En raison de son excellente ductilité et de sa ténacité, le fil de molybdène rhénium peut résister à des chocs de courant répétés sans se casser. Dans la production, l'optimisation de la capacité de charge de courant doit être obtenue en augmentant la taille des grains et en réduisant les défauts de surface.

3.4.3 Stabilité de l'arc du fil de molybdène pour l'éclairage

La stabilité de l'arc est une propriété clé du fil de molybdène en tant que matériau d'électrode, en particulier dans les lampes HID et les lampes fluorescentes. Le point de fusion élevé et la résistance à la corrosion par arc du fil de molybdène lui permettent de maintenir l'intégrité structurelle à des températures d'arc élevées (>4000°C). En raison de la finition de surface élevée ($Ra < 0,5 \mu m$), le fil de molybdène nettoyé peut réduire la surchauffe locale et les projections lors de la décharge de l'arc et améliorer la stabilité.

Le fil de molybdène dopé (par exemple, le fil de molybdène lanthane, le fil de molybdène et de rhénium) réduit la corrosion des joints de grains causée par l'arc électrique en optimisant la microstructure de surface. Par exemple, le fil de molybdène dopé à l'oxyde de lanthane a une stabilité d'arc d'environ 20 % supérieure à celle du fil de molybdène pur en décharge à haute fréquence (10-100 kHz). En production, la stabilité de l'arc est souvent testée en simulant les conditions de fonctionnement des luminaires, telles que les tests d'impulsion à haute tension, afin de garantir la fiabilité à long terme des électrodes.

3.5 Propriétés optiques du fil de molybdène pour l'éclairage

Les propriétés optiques du fil de molybdène pour l'éclairage affectent son efficacité de rayonnement et la qualité de son flux lumineux dans les lampes, notamment la finition de surface et la réflectivité, les caractéristiques de rayonnement à haute température et l'influence de l'oxydation de surface sur les propriétés optiques.

3.5.1 Finition de surface et réflectivité du fil de molybdène pour l'éclairage

La finition de surface du fil de molybdène affecte directement sa réflectivité et l'uniformité de la

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

décharge de l'arc. Par polissage électrolytique ou nettoyage chimique, la rugosité de surface du fil de molybdène nettoyé peut atteindre Ra 0,1-0,5 μm , et la réflectance (plage de lumière visible) est d'environ 60 % à 70 %. En raison de la couche d'oxyde de surface (MoO_2), la rugosité du fil de molybdène noir est élevée (Ra 0,5-2,0 μm) et la réflectivité n'est que de 30 à 40 %.

Le fil de molybdène de haute finition améliore l'uniformité du flux lumineux dans les lampes halogènes et HID et réduit la surchauffe locale causée par les défauts de surface. Dans les lampes de projection, la réflectivité du fil de molybdène affecte l'effet de focalisation de la lumière, et une réflectivité élevée du fil de molybdène nettoyé peut améliorer l'utilisation de la lumière. En production, le contrôle de la finition de surface doit être réalisé par un équipement de polissage de précision et une inspection en ligne.

3.5.2 Caractéristiques du rayonnement à haute température et analyse spectrale du fil de molybdène pour l'éclairage

Les propriétés de rayonnement du fil de molybdène à haute température sont étroitement liées à ses performances en tant qu'électrode ou matériau de support. À 1500-2000°C, le spectre de rayonnement du fil de molybdène est principalement concentré dans les régions infrarouge et proche infrarouge (longueur d'onde 0,7-2,5 μm), et la lumière visible (0,4-0,7 μm) est relativement faible. Cela lui donne un avantage dans les lampes infrarouges, mais principalement comme matériau auxiliaire dans l'éclairage à lumière blanche.

Les fils de molybdène dopés, tels que les fils de molybdène lanthane, peuvent légèrement augmenter l'efficacité du rayonnement dans la région visible en optimisant la structure cristalline. Par exemple, un fil de molybdène dopé à 1 % d'oxyde de lanthane a une puissance de rayonnement environ 10 % plus élevée à 2000°C qu'un fil de molybdène pur. L'analyse spectrale montre que le pic de rayonnement du fil de molybdène se déplace vers une courte longueur d'onde avec l'augmentation de la température, ce qui est conforme à la loi de rayonnement du corps noir de Planck. En pratique, les caractéristiques de rayonnement du filament de molybdène doivent être co-optimisées avec le filament (généralement du tungstène) pour obtenir le rendement lumineux souhaité.

3.5.3 Effet de l'oxydation superficielle du fil de molybdène pour l'éclairage sur les propriétés optiques

L'oxydation de surface a un effet significatif sur les propriétés optiques du fil de molybdène. La couche d'oxyde (MoO_2 ou MoO_3) du fil de molybdène noir absorbe une partie de la lumière visible et infrarouge, réduisant ainsi la réflectivité et l'efficacité du rayonnement. Dans les lampes halogènes, l'évaporation de la couche d'oxyde peut entraîner le dépôt de la paroi intérieure de l'ampoule, réduisant ainsi l'efficacité du rendement lumineux. En éliminant la couche d'oxyde, le fil de molybdène nettoyé améliore considérablement les performances optiques, et la réflectivité et l'efficacité du rayonnement sont meilleures que celles du fil de molybdène noir.

À haute température (>1000°C), une petite quantité d'oxydation peut se produire à la surface du fil de molybdène, ce qui affecte les caractéristiques spectrales. Le fil de molybdène dopé (par exemple, le fil de molybdène et de lanthane) ralentit le processus d'oxydation et maintient la stabilité des

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

propriétés optiques en formant une structure de surface stable. Les fils de molybdène revêtus, tels que les revêtements en alumine, offrent une protection supplémentaire contre l'oxydation de surface et conviennent aux lampes spéciales haute performance.

3.6 Fil de molybdène pour l'éclairage MSDS de CTIA GROUP LTD

Les fiches de données de sécurité (FDS) fournissent des conseils pour l'utilisation, le stockage et le transport en toute sécurité du fil de molybdène pour l'éclairage. Voici les principaux contenus des fiches signalétiques du fil de molybdène pour l'éclairage de CTIA :

Partie I : Dénominations chimiques

Nom chimique : fil de molybdène

N° CAS :7439-98-7

Formule moléculaire : Mo

Poids moléculaire : 99,95

Partie II : Renseignements sur la composition

Contenance 99,3 % ~99,95 % molybdène

Partie III : Aperçu des dangers

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

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

Partie IV : Premiers soins

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

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

Traitement médical.

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

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

Partie V : Mesures de protection contre l'incendie

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

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

Agent extincteur : poudre de cuir sèche, sable.

Partie VI : Gestion d'urgence des déversements

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

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

Partie VII : Manutention, manutention et entreposage

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

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

Partie VIII : Contrôle de l'exposition/protection individuelle

CMA Chine (mg/m³) : 6

CMA de l'URSS (mg/m³) : 6

TLVTN : ACGIH 1 mg/m³

TLVWN : ACGIH 3mg/m³

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

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

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

Protection oculaire : Portez des lunettes de sécurité chimique.

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

Protection des mains : Portez des gants en caoutchouc.

Partie IX : Propriétés physicochimiques

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Ingrédient principal : Pur

Aspect et propriétés : solide, blanc brillant métallisé ; Blank, finition noire

Point de fusion (°C) : 2620

Point d'ébullition (°C) : 5560

Densité relative (eau = 1) : 9,4 ~ 10,2 (20 °C)

Densité de vapeur (air = 1) : Aucune donnée

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

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

Température critique (°C) : Aucune donnée disponible

Pression critique (MPa) : Aucune donnée disponible

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

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

Température d'inflammation (°C) : Aucune donnée

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

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

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

Principales utilisations : utilisé dans la production de moules, de fils de molybdène, de pièces électroniques, etc.

Partie X : Stabilité et réactivité

Substances interdites : acides et alcalis forts.

Partie 11 :

Toxicité aiguë : pas de données disponibles

CL50 : Aucune donnée

Partie XII : Données écologiques

Il n'y a pas de données pour cette section

Partie XIII : Élimination

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

Partie XIV : Renseignements sur l'expédition

Numéro de marchandises dangereuses : pas d'information

Catégorie d'emballage : Z01

Précautions pour le transport : L'emballage doit être complet lors de l'expédition et le chargement doit être sécurisé. Pendant le transport, il est nécessaire de s'assurer que le conteneur ne fuit pas, ne s'effondre pas, ne tombe pas et ne s'endommage pas. Il est strictement interdit de mélanger avec des

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

oxydants, des halogènes, des produits chimiques comestibles, etc. Pendant le transport, il doit être protégé de l'exposition au soleil, à la pluie et aux températures élevées. Les véhicules doivent être soigneusement nettoyés après le transport.

Partie XV : Renseignements réglementaires

Informations réglementaires : Règlement sur la gestion de la sécurité des produits chimiques dangereux (promulgué par le Conseil des Affaires d'État le 17 février 1987), Règles détaillées pour l'application du Règlement sur la gestion de la sécurité des produits chimiques dangereux (Hua Lao Fa [1992] n° 677), Règlement sur l'utilisation sûre des produits chimiques sur le lieu de travail ([1996] Lao Bu Fa n° 423) et autres lois et règlements, qui ont pris des dispositions correspondantes sur l'utilisation, la production, le stockage, le transport, le chargement et le déchargement en toute sécurité des produits chimiques dangereux ; La norme d'hygiène pour le tungstène dans l'air de l'atelier (GB 16229-1996) stipule la concentration maximale autorisée et la méthode de détection de cette substance dans l'air de l'atelier.

Partie XVI : Renseignements sur le fournisseur

Fournisseur : CTIA GROUP LTD

Tél. : 0592-5129696/5129595



fil de molybdène pour l'éclairage de CTIA

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Chapitre 4 Préparation et technologie de production du fil de molybdène pour l'éclairage

La préparation du fil de molybdène pour l'éclairage est un processus complexe et précis, impliquant plusieurs liens de processus, de la sélection des matières premières au produit final, et sa technologie de production et l'optimisation du processus déterminent directement la qualité et les performances du fil de molybdène. Ce chapitre aborde en détail le processus de préparation et de production du fil de molybdène pour l'éclairage, y compris la sélection et le prétraitement des matières premières, la fusion et le moulage, le processus de tréfilage, la technologie de traitement de surface, le processus de dopage, le contrôle de la qualité et l'optimisation du processus.

4.1 Sélection des matières premières et prétraitement du fil de molybdène pour l'éclairage

Les performances du fil de molybdène pour l'éclairage dépendent fortement de la qualité de la matière première et du processus de prétraitement. La sélection et le prétraitement des matières premières constituent la première étape de la production, ce qui affecte directement le taux de réussite de la fusion, du formage et du tréfilage ultérieurs, ainsi que les performances du produit final. Voici une analyse détaillée sous trois aspects : la pureté de la poudre de molybdène et le contrôle de la taille des particules, la sélection et la proportion du matériau de dopage, et le processus de prétraitement.

4.1.1 Exigences de pureté des poudres de molybdène ($\geq 99,95\%$) et contrôle de la taille des particules

La préparation du fil de molybdène est généralement faite de poudre de molybdène de haute pureté, et la pureté doit atteindre plus de 99,95 % pour garantir la stabilité chimique et les propriétés électriques du fil de molybdène dans un environnement à haute température. La teneur en impuretés (par exemple, fer, nickel, silicium, carbone, etc.) doit être maintenue à un niveau très bas (0,05 % des impuretés totales) car même les impuretés à l'état de traces peuvent provoquer une corrosion des joints de grains ou une instabilité de l'arc à haute température. Par exemple, des impuretés de fer supérieures à 0,01 % peuvent faire réagir les filaments de molybdène avec les gaz halogènes dans les lampes halogènes pour former des composés volatils et raccourcir la durée de vie de la lampe.

La préparation de la poudre de molybdène est généralement obtenue par raffinage de la molybdénite (MoS_2). Le processus consiste en un grillage de la molybdénite pour produire du trioxyde de molybdène (MoO_3), suivi d'une réduction de l'hydrogène (deux réductions dans un four tubulaire à 600-1000°C) pour produire de la poudre de molybdène de haute pureté. Pendant le processus de réduction, la pureté de l'hydrogène ($\geq 99,999\%$) et la température de réduction doivent être contrôlées pour éviter les résidus d'oxygène. La poudre de molybdène réduite doit être analysée chimiquement (par exemple, ICP-OES) pour confirmer sa pureté et être conforme aux normes ASTM B386 ou GB/T 3462.

Le contrôle de la taille des particules est un élément clé du prétraitement des matières premières. Le fil de molybdène pour l'éclairage nécessite de la poudre de molybdène d'une taille de particule de 1 à 5 μm et d'une distribution granulométrique uniforme (D50 est d'environ 2-3 μm). La granulométrie

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

fine et uniforme permet d'augmenter la densité de la billette frittée et de réduire la porosité et les inclusions. Si la taille des particules est trop grande ($>10\ \mu\text{m}$), cela entraînera un frittage inégal et affectera la résistance mécanique du fil de molybdène. Si la taille des particules est trop petite ($<1\ \mu\text{m}$), cela peut augmenter le retrait de frittage et entraîner la fissuration de l'ébauche. Le contrôle de la taille des particules est réalisé par classification du flux d'air ou criblage vibrant, et les équipements courants comprennent des classificateurs de flux d'air et des tamis à ultrasons. De plus, la morphologie de la poudre de molybdène est cruciale pour le compactage ultérieur et l'effet de frittage, et la poudre sphérique peut être préparée par la technologie de sphéroïdisation par plasma.

4.1.2 Sélection et rapport des matières dopantes (lanthane, rhénium, etc.).

La sélection et le rapport des matériaux dopés sont le maillon central de la préparation du fil de molybdène haute performance (tel que le fil de molybdène lanthane et le fil de molybdène rhénium), qui vise à améliorer la résistance au fluage, la ductilité et la résistance à l'oxydation à haute température. Les matériaux couramment dopés comprennent l'oxyde de lanthane (La_2O_3), le rhénium (Re), l'oxyde d'yttrium (Y_2O_3) et l'oxyde de cérium (CeO_2).

Oxyde de lanthane (La_2O_3) : le matériau dopé le plus couramment utilisé, généralement 0,3 % à 1,0 % en masse. L'oxyde de lanthane est dispersé dans une matrice de molybdène sous forme de particules à l'échelle nanométrique (taille des particules 50-200 nm), ce qui augmente considérablement la température de recristallisation (de $1400\ \text{°C}$ à $1800\ \text{°C}$) et la résistance au fluage. L'oxyde de lanthane doit être d'une grande pureté ($\geq 99,99\ \%$) pour éviter l'influence des impuretés (telles que le soufre et le phosphore) sur les performances.

Rhénium (Re) : Dopé avec du rhénium (1 % à 5 %) pour former une solution solide de molybdène rhénium, ce qui améliore la ductilité et la résistance à l'oxydation. La poudre de rhénium doit être préparée par réduction de l'hydrogène, et la pureté est $\geq 99,98\ \%$. Le coût élevé du rhénium (environ 50 à 100 fois celui du molybdène) le rend principalement utilisé dans les lampes spéciales haut de gamme.

Oxyde d'yttrium (Y_2O_3) et oxyde de cérium (CeO_2) : utilisés dans les fils spéciaux de molybdène avec une teneur de 0,5 % à 2 % et de 0,3 % à 1 %. L'oxyde d'yttrium améliore la résistance à la corrosion par arc et convient aux lampes ultraviolettes ; l'oxyde de cérium améliore la stabilité à haute température et convient aux lampes infrarouges. Les deux nécessitent une pureté élevée ($\geq 99,95\ \%$) et une granulométrie fine ($<100\ \text{nm}$).

Contrôle du rapport : Le taux de dopage doit être contrôlé avec précision, trop élevé peut entraîner un ramollissement du matériau ou des coûts plus élevés, trop faible n'améliorera pas significativement les performances. Par exemple, lorsque la teneur en oxyde de lanthane est de 0,8 %, la résistance à la traction du fil de molybdène peut atteindre 400 MPa à $1500\ \text{°C}$, ce qui est 50 % plus élevé que celle du fil de molybdène pur. Le rapport est vérifié par pesage électronique et analyse chimique, et l'erreur est contrôlée à $\pm 0,01\ \%$.

Le choix du matériau de dopage doit également tenir compte de la compatibilité chimique avec la

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

matrice de molybdène. Par exemple, l'oxyde de lanthane forme une phase dispersée stable avec le molybdène à haute température, tandis que le rhénium améliore la structure cristalline en renforçant la solution. Dans la production, la répartition homogène des matériaux dopés est essentielle, ce qui est obtenu grâce aux processus de mélange ultérieurs.

4.1.3 Prétraitement des matières premières (nettoyage, criblage, mélange)

Le prétraitement des matières premières comprend le lavage, le criblage et le mélange pour assurer une qualité constante de la poudre de molybdène et des matériaux dopés.

Nettoyage : La poudre de molybdène peut adsorber l'humidité, la graisse ou les oxydes pendant le processus de production et doit être éliminée par nettoyage chimique. L'agent de nettoyage couramment utilisé est l'acide nitrique dilué (HNO_3 , concentration 5 %-10 %) ou l'hydroxyde de sodium (NaOH , concentration 2 %-5 %), et la température de nettoyage est contrôlée à 40-60°C pendant 5-10 minutes. Après le nettoyage, il doit être rincé à l'eau déminéralisée et séché (séchage sous vide à 100-150°C) pour éviter les impuretés résiduelles.

Tamisage : Éliminez les particules surdimensionnées ou sous-dimensionnées à l'aide d'un tamis vibrant ou d'un classificateur à air pour assurer une distribution granulométrique de 1 à 5 μm . L'équipement de dépistage doit être en acier inoxydable ou en céramique pour éviter la contamination métallique. Au cours du processus de criblage, la courbe de distribution granulométrique doit être surveillée et le rapport D_{90}/D_{10} doit être contrôlé à 2-3 pour assurer l'uniformité.

Mélange : Le fil de molybdène dopé nécessite un mélange uniforme de poudre de molybdène avec des matériaux dopés (tels que l'oxyde de lanthane). Le mélange humide (p. ex., éthanol ou eau déminéralisée comme milieu) ou sec (p. ex., mélangeur en V) est couramment utilisé. Le mélange humide améliore l'uniformité par dispersion ultrasonique, généralement pendant 2 à 4 heures. Après mélange, la poudre composite est préparée par séchage par atomisation (température d'entrée 200-250°C) pour assurer une répartition uniforme des particules dopées.

Le processus de prétraitement doit être effectué dans un environnement propre (classe de propreté ISO 7) pour éviter la contamination par la poussière. L'équipement de prétraitement à la pointe de la technologie améliore l'efficacité et la cohérence.

4.2 Fusion et formage du fil de molybdène pour l'éclairage

La fusion et le formage sont le maillon central de la préparation du fil de molybdène, qui convertit la poudre de molybdène en ébauches à haute densité par métallurgie des poudres, frittage, pressage à chaud, forgeage et laminage, fournissant la base du tréfilage ultérieur.

4.2.1 Procédé de métallurgie des poudres

La métallurgie des poudres est la principale méthode de préparation du fil de molybdène pour l'éclairage, et le processus comprend le pressage de poudre, le frittage, le traitement thermique et le formage. Il présente l'avantage d'un contrôle précis de la composition et de la microstructure du

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

matériau, ce qui le rend adapté à la production de fil de molybdène haute performance.

Pressage de poudre : La poudre de molybdène prétraînée ou la poudre dopée est chargée dans un moule et pressée en une tige ou une ébauche de plaque sous une presse hydraulique. La pression de pressage est de 100 à 200 MPa et le matériau du moule est en acier à haute résistance ou en carbure cémenté pour éviter la contamination. Pendant le processus de pressage, la densité de remplissage de la poudre (environ 50 % à 60 % de densité théorique) doit être contrôlée pour assurer l'uniformité de l'ébauche.

Pré-frittage : La billette pressée est pré-frittée dans un four à atmosphère d'hydrogène (température 800-1000°C, maintien pendant 2-4 heures) pour éliminer l'humidité et les impuretés volatiles et améliorer la résistance de la billette. Le pré-frittage nécessite un débit d'hydrogène contrôlé (1-2 m³/h) et un point de rosée (<-40°C) pour éviter l'oxydation.

Caractéristiques du processus : La métallurgie des poudres peut produire des fils de molybdène dopés (tels que le fil de molybdène lanthane) avec une composition complexe, et optimiser la microstructure de l'ébauche grâce à un contrôle précis des paramètres de pressage et de frittage. Le leader mondial utilise des équipements de pressage automatisés pour améliorer l'efficacité de la production.

4.2.2 Technique de frittage sous vide et à haute température

Le frittage est une étape critique dans la conversion de la billette pressée en une billette de molybdène très dense et est généralement effectué sous vide ou sous atmosphère d'hydrogène pour éviter l'oxydation.

Frittage sous vide : Dans un four de frittage sous vide (degré de vide < 10⁻³ Pa), la température monte à 1800-2200 °C et est maintenue au chaud pendant 4 à 8 heures. L'environnement de vide élimine efficacement l'oxygène résiduel et réduit la porosité. Après frittage, la densité de l'ébauche peut atteindre 95 % à 98 % de densité théorique et la taille des grains est contrôlée à 10-50 µm.

Frittage à haute température : Pour les fils de molybdène dopés (tels que les fils de molybdène lanthane), un frittage à haute température (2300-2500°C, maintien pendant 2 à 4 heures) dans une atmosphère d'hydrogène est nécessaire. La protection hydrogène empêche la volatilisation de l'oxyde de lanthane ou du rhénium et assure la stabilité des éléments dopés. Le four de frittage doit être équipé d'un élément chauffant en tungstène ou en molybdène pour résister aux températures élevées.

Paramètres clés : la température de frittage, le temps de maintien et la vitesse de chauffage doivent être contrôlés avec précision. Une température excessive (>2600°C) peut provoquer une croissance excessive des grains et réduire la résistance mécanique ; Des températures trop basses (<1800°C) n'atteindront pas la densité souhaitée. Le four de frittage à la pointe de la technologie atteint une précision de contrôle de la température de ±5°C.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Implications pour l'application : L'ébauche frittée très dense constitue une bonne base pour les propriétés mécaniques du tréfilage ultérieur et convient à la fabrication de fils de molybdène ultrafins (diamètre <0,05 mm).

4.2.3 Procédés de pressage à chaud, de forgeage et de laminage

L'ébauche frittée est ensuite traitée par pressage à chaud, forgeage et laminage pour former une barre ou une plaque adaptée au tréfilage.

Pressage à chaud : Dans la presse à chaud (pression 50-100 MPa, température 1500-1800°C), l'ébauche frittée est encore compactée pour éliminer la microscorose. Le pressage à chaud est généralement effectué sous vide ou sous atmosphère d'hydrogène, et la densité de la billette peut atteindre plus de 99 %.

Forgeage : Les ébauches pressées à chaud sont transformées en barres cylindriques ou carrées par une machine à forger multidirectionnelle (température de forgeage 1200-1600°C). Le forgeage affine les grains (de 50 µm à 20-30 µm) et améliore la ténacité du matériau. Le taux de déformation (0,1-0,5 s⁻¹) doit être contrôlé pendant le processus de forgeage pour éviter la fissuration.

Laminage : Les barres forgées sont laminées en barres ou en plaques d'un diamètre de 5 à 10 mm par un laminoir à chaud (température 1000-1400°C). Le laminage nécessite l'utilisation de plusieurs passes de petite déformation (10 à 15 % par déformation) pour réduire la concentration des contraintes. La surface de la barre laminée doit être polie pour éliminer le tartre d'oxyde.

Caractéristiques du processus : Le processus de travail à chaud améliore les propriétés mécaniques et la facilité de traitement de l'ébauche, et fournit un substrat de haute qualité pour le tréfilage ultérieur. Les entreprises chinoises ont considérablement amélioré la précision dimensionnelle des barres en introduisant des équipements allemands de laminage à chaud.

4.3 Processus d'étirage du fil de molybdène pour l'éclairage

Le processus de tréfilage est le processus d'étirement de la tige de molybdène en un filament, qui est la technologie de base pour la préparation du fil de molybdène pour l'éclairage, ce qui détermine directement la précision dimensionnelle, la qualité de surface et les propriétés mécaniques du fil.

4.3.1 Technique de l'emboutissage grossier, de l'emboutissage fin et de l'emboutissage ultrafin

Le processus de tréfilage est divisé en trois étapes : l'étirage grossier, l'étirage fin et l'étirage ultrafin, et la taille du fil est progressivement réduite en fonction du diamètre cible et des exigences de l'application.

Ébauche : Les barres laminées (diamètre 5-10 mm) sont étirées à un diamètre de 0,5-2 mm. La machine de tréfilage à plusieurs passes (réduction de diamètre de 10 % à 20 % par temps) est utilisée pour l'ébauche de l'ébauche, et le matériau du moule est du carbure cémenté ou du diamant naturel. La vitesse d'étirage est de 1 à 5 m/min et l'étirage à chaud est nécessaire à 600-800 °C pour améliorer la ductilité.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Tréfilage fin : Tréfilage du fil grossier à un diamètre de 0,05-0,5 mm, adapté aux lampes à incandescence, halogènes et HID. L'emboutissage fin nécessite l'utilisation de matrices de haute précision (tolérances $\pm 0,001$ mm) et la vitesse d'étirage est réduite à 0,5-2 m/min. Un recuit multiple (800-1000°C) est nécessaire pendant le processus d'emboutissage fin pour éliminer l'érouissage.

Tréfilage ultra-fin : Étirement du fil à un diamètre de 0,01 à 0,05 mm, adapté aux lampes spéciales (par exemple les lampes UV). Le tréfilage ultra-fin impose des exigences extrêmement élevées à la matrice et au lubrifiant, nécessitant une matrice diamantée polycristalline (précision du diamètre du trou $\pm 0,0005$ mm) et une vitesse d'étirage de $< 0,5$ m/min. La résistance à la traction du fil de molybdène ultra-fin peut atteindre plus de 1500 MPa, mais il est facile à casser et les paramètres du processus doivent être strictement contrôlés.

Défis techniques : Le rendement de l'étirage ultra-fin est faible (environ 70 % à 80 %), et des fractures peuvent se produire en raison de défauts de surface ou de contraintes internes dans le fil. La machine de tréfilage à la pointe de la technologie améliore le rendement grâce au contrôle de la tension en ligne et à la détection des défauts.

4.3.2 Sélection des lubrifiants et optimisation de la conception des moules

Les lubrifiants et la conception des matrices sont la clé du processus d'étirage, ce qui affecte directement la qualité de surface du fil et l'efficacité de l'étirage.

Sélection des lubrifiants : Les lubrifiants à émulsion de graphite ou au disulfure de molybdène (MoS_2) sont couramment utilisés pour l'emboutissage grossier et fin, avec une stabilité à haute température et un faible coefficient de frottement (0,1-0,2). L'étirage ultrafin nécessite l'utilisation de lubrifiants à base d'huile (par exemple, des lubrifiants à base de polyéthylène glycol) pour réduire les rayures de surface. Le lubrifiant doit être changé régulièrement pour éviter la contamination par des impuretés.

Conception du moule : La matrice d'étirage doit être fabriquée à partir de matériaux de haute dureté (tels que le carbure cémenté WC ou le diamant polycristallin PCD). Le diamètre du trou de la matrice doit être usiné avec précision (tolérance $\pm 0,001$ mm), et l'angle d'entrée ($8-12^\circ$) et la longueur de la zone réductrice doivent être optimisés pour réduire les contraintes d'étirage. La surface du moule doit être polie ($Ra < 0,05 \mu\text{m}$) pour réduire les frottements et les défauts de surface.

Mesures d'optimisation : La conception avancée de l'outil utilise l'analyse par éléments finis (FEA) pour simuler la répartition des contraintes lors du tréfilage et optimiser la géométrie du moule. Le système de lubrification assure une couverture uniforme du lubrifiant grâce à un dispositif de pulvérisation automatique et améliore la stabilité de l'emboutissage.

4.3.3 Procédés de recuit intermédiaire et de recuit final

Le processus de recuit est utilisé pour éliminer l'érouissage pendant le processus d'étirage et restaurer la ductilité et la ténacité du fil de molybdène.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Recuit intermédiaire : effectué après 2-3 passages d'ébauche et d'emboutissage fin, à une température de 800-1000 °C, en tenant pendant 10-30 secondes, généralement dans un four à atmosphère d'hydrogène. Le recuit intermédiaire réduit la contrainte interne du fil de 50 à 70 % et maintient la taille des grains à 10-20 µm.

Recuit final : Effectué après tréfilage à une température de 900-1200°C et maintenu pendant 5 à 15 secondes, dans le but d'optimiser les propriétés mécaniques et la qualité de surface du fil. Le recuit final doit contrôler la vitesse de refroidissement (10-50°C/s) pour éviter une croissance excessive des grains.

Caractéristiques du processus : Le four de recuit doit être équipé d'un système de contrôle de température précis (précision $\pm 5^\circ\text{C}$), et le débit d'hydrogène gazeux est contrôlé à 0,5-1 m³/h. La température de recuit du fil de molybdène dopé (par exemple le fil de molybdène lanthane) est légèrement plus élevée (1000-1300°C) pour assurer la stabilité des éléments dopés.

Le processus de recuit est essentiel aux performances du fil de molybdène. Des températures de recuit trop élevées peuvent entraîner une recristallisation, réduisant ainsi la résistance ; Des températures trop basses ne soulageront pas suffisamment le stress. L'équipement de recuit avancé peut réaliser un recuit en ligne et améliorer l'efficacité de la production.

4.4 Technologie de traitement de surface du fil de molybdène pour l'éclairage

La technologie de traitement de surface est la clé de l'amélioration de la qualité de surface, de la résistance à la corrosion et des propriétés optiques du fil de molybdène, couvrant le nettoyage chimique et le polissage électrolytique, les différences de processus entre le fil de molybdène noir et nettoyé et la technologie de revêtement de surface.

4.4.1 Nettoyage chimique et électropolissage

Le nettoyage chimique et l'électropolissage sont utilisés pour éliminer les oxydes, les graisses et les résidus de tréfilage de la surface du fil de molybdène, améliorant ainsi la finition de surface et les propriétés électriques.

Nettoyage chimique : Laver avec une solution de décapage (comme le mélange HNO₃-HF, rapport 3:1, concentration 5 %-10 %) à 40-60°C pendant 1 à 3 minutes pour éliminer la couche d'oxyde de surface (MoO₂ ou MoO₃). Après le lavage, rincer à l'eau déminéralisée et sécher (100-150°C) pour éviter les résidus d'acide. Le nettoyage chimique convient à la conversion du fil de molybdène noir en fil de molybdène nettoyé.

Polissage électrolytique : le fil de molybdène est utilisé comme anode dans l'électrolyte (comme la solution NaOH, concentration 5 %-10 %), la densité de courant est de 0,5-2 A/cm² et le temps de polissage est de 10-30 secondes. Le polissage électrolytique réduit la rugosité de surface à Ra 0,1-0,5 µm, améliore la réflectivité (60 % à 70 %) et la résistance à la corrosion par arc électrique.

Caractéristiques du processus : faible coût de nettoyage chimique, adapté à la production à grande

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

échelle ; Le polissage électrolytique a une plus grande précision et convient aux lampes haut de gamme (telles que les lampes halogènes, les lampes HID). Le traitement des déchets liquides doit être conforme aux normes environnementales (telles que la directive RoHS), et la technologie de neutralisation et de sédimentation est utilisée pour traiter les déchets liquides acides et alcalins.

4.4.2 Différences de procédé entre le fil de molybdène noir et le fil de molybdène nettoyé

Il existe des différences significatives entre le fil de molybdène noir et le fil de molybdène nettoyé en termes de processus de traitement de surface et de scénarios d'application.

Fil de molybdène noir : retient une couche d'oxyde (MoO_2 ou MoO_3) à la surface avec une rugosité de Ra 0,5-2,0 μm . Après l'emboutissage, recuit (600-800 °C) à l'air ou sous vide faible (10-100 Pa) directement pour former une couche d'oxyde. Le fil de molybdène noir convient aux filaments de support ou aux matériaux d'étanchéité pour les lampes à incandescence à faible coût, car la couche d'oxyde améliore l'adhérence au verre, mais la stabilité de l'arc est médiocre.

Fil de molybdène nettoyé : La couche d'oxyde est éliminée par nettoyage chimique ou polissage électrolytique, et la surface est brillante avec une rugosité de Ra 0,1-0,5 μm . La conductivité et la résistance à la corrosion par arc du fil de molybdène nettoyé sont meilleures que celles du fil de molybdène noir, et il convient aux électrodes des lampes halogènes et des lampes HID. Des étapes supplémentaires de nettoyage et de polissage sont nécessaires en production, ce qui augmente le coût d'environ 20 à 30 %.

Différences de processus : la production de fil de molybdène noir omet l'étape de traitement de surface et le processus est simple ; Le fil de molybdène nettoyé doit faire l'objet de paramètres de nettoyage et de polissage étroitement contrôlés pour s'assurer qu'il n'y a pas de défauts résiduels sur la surface. La production de fil de molybdène nettoyé nécessite un équipement de polissage de haute précision.

4.4.3 Technologies de revêtement de surface (p. ex. revêtements anti-oxydation)

La technologie de revêtement de surface améliore les performances du fil de molybdène dans les environnements difficiles en déposant des revêtements résistants à l'oxydation ou à la corrosion (par exemple, alumine Al_2O_3 , siliciure de molybdène MoSi_2) sur la surface.

Type de revêtement : Le revêtement en alumine (épaisseur 0,1-1 μm) peut améliorer la résistance à l'oxydation, adapté aux lampes infrarouges ; Le revêtement en siliciure de molybdène (0,5 à 2 μm d'épaisseur) améliore la résistance à la corrosion par arc et convient aux lampes UV. Les revêtements en carbure, tels que le Mo_2C , sont utilisés dans des environnements à très haute température.

Procédé de préparation : Dépôt chimique en phase vapeur (CVD, température 800-1200 °C) ou dépôt physique en phase vapeur (PVD, température 500-800 °C) pour déposer le revêtement. Le CVD convient aux formes complexes de fil de molybdène, tandis que le PVD offre une plus grande uniformité de revêtement. Le revêtement doit être fermement collé à la matrice de molybdène pour éviter de s'écailler.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Caractéristiques du processus : Le processus de revêtement doit être effectué sous vide ou sous atmosphère inerte, et le coût de l'équipement est élevé (par exemple, le prix du four CVD est environ 2 à 3 fois supérieur à celui d'un four de frittage ordinaire). L'épaisseur du revêtement est mesurée par microscopie électronique à balayage (MEB) et l'adhérence est vérifiée par des essais de traction.

Impact de l'application : Le fil de molybdène revêtu peut augmenter la température d'oxydation à plus de 1500 °C et prolonger la durée de vie des lampes de 20 % à 30 %, mais le coût est élevé et l'application du marché est limitée aux lampes spéciales haut de gamme.

4.5 Procédé de dopage du fil de molybdène pour l'éclairage

Le processus de dopage est une technologie clé pour améliorer les performances à haute température et la durabilité du fil de molybdène, ce qui implique la méthode de dopage, le contrôle de l'uniformité et le mécanisme d'amélioration des performances du lanthane, du rhénium et d'autres éléments.

4.5.1 Méthodes de dopage du lanthane, du rhénium et d'autres éléments

Les méthodes de dopage comprennent principalement le dopage humide, le dopage sec et la coprécipitation chimique.

Dopage humide : La poudre de molybdène est mélangée à un matériau dopé (par exemple l'oxyde de lanthane) dans un milieu liquide (par exemple l'éthanol ou l'eau déminéralisée) et l'homogénéité est assurée par dispersion ultrasonore (fréquence 20-40 kHz pendant 1 à 2 heures). Après le mélange, la poudre de composé est préparée par séchage par atomisation (température d'entrée 200-250 °C). Le dopage humide convient à l'oxyde de lanthane et à l'oxyde d'yttrium, et a une grande uniformité, mais le processus de séchage doit être contrôlé pour éviter l'agglomération de particules.

Dopage à sec : la poudre de molybdène est mélangée à sec avec des matériaux dopés par un mélangeur de type V ou à double cône, et le temps de mélange est de 4 à 8 heures. Le dopage à sec convient à la poudre de rhénium, car le rhénium est facile à oxyder en liquide. La vitesse du mélangeur (20-50 tr/min) doit être contrôlée pour éviter la stratification de la poudre.

Coprécipitation chimique : la poudre dopée est préparée par réaction chimique (comme la coprécipitation du nitrate de lanthane et du molybdate d'ammonium), qui convient au dopage multi-éléments (comme le lanthane + l'yttrium). La valeur du pH (6-8) et la température de réaction (50-80°C) doivent être contrôlées pour la co-précipitation afin d'assurer une distribution uniforme des éléments dopés.

Caractéristiques du processus : l'uniformité du dopage humide est la meilleure, adaptée à la production à grande échelle ; L'équipement de dopage à sec est simple et adapté au dopage au rhénium ; La co-précipitation chimique a une grande précision, mais un coût élevé, et convient à un fil de molybdène spécial.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire for Lighting Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire for Lighting

As one of the core materials in modern lighting technology, molybdenum wire is widely used in various light sources including incandescent lamps, halogen lamps, fluorescent lamps, and gas discharge lamps, due to its high melting point, high strength, excellent corrosion resistance, and superior electrical conductivity. It is an irreplaceable and critical component in the lighting industry.

2. Typical Applications of Molybdenum Wire for Lighting

Residential and Commercial Lighting: Used in incandescent and halogen lamps to provide warm light and long service life.

Automotive Lighting: Functions as electrodes in HID and xenon lamps, offering high brightness and vibration resistance.

Specialty Lighting: Utilized in projection lamps, ultraviolet (UV) lamps, and infrared (IR) lamps to meet high-temperature and high-precision requirements in medical, industrial, and scientific applications.

Emerging Fields: Serves as conductive leads for LED lamps and supports for phosphors in laser lighting, aligning with future lighting technology development.

3. Basic Data of Molybdenum Wire for Lighting (Reference)

Parameter	Pure Mo Wire	Mo-La Wire	Mo-Re Wire
Mo Content	≥99.95%	≥99.0%	52.5%–86.0%
Diameter Range	0.03–3.2 mm	0.03–1.5 mm	0.03–1.0 mm
Tolerance	±0.002 mm	±0.002 mm	±0.002 mm
Tensile Strength (Room Temp)	800–1200 MPa	900–1400 MPa	1000–1500 MPa
Tensile Strength (at 1500°C)	150–300 MPa	200–400 MPa	250–450 MPa
Elongation at Break	10%–25%	12%–20%	15%–25%
Electrical Resistivity (20°C)	$5.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
Main Applications	Incandescent, Halogen	Halogen, Auto Headlights	HID, Projection Lamps

4. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.molybdenum.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

4.5.2 Contrôle de l'uniformité du dopage

L'uniformité du dopage affecte directement la stabilité des performances du fil de molybdène. Le contrôle de l'homogénéité comprend les mesures suivantes :

Mélange de poudre : À l'aide d'un équipement de mélange de haute précision, la distribution des éléments dopés est vérifiée par échantillonnage en ligne et analyse par fluorescence X (XRF), et l'écart est contrôlé à $\pm 0,01$ %.

Processus de frittage : La température de frittage (1800-2500°C) et le temps de maintien (2-8 heures) doivent être optimisés pour éviter la volatilisation ou la ségrégation des éléments dopants. Par exemple, l'oxyde de lanthane peut se décomposer partiellement à $> 2300^{\circ}\text{C}$, et l'atmosphère de frittage (point de rosée de l'hydrogène $< -40^{\circ}\text{C}$) doit être contrôlée.

Technologie de détection : La microscopie électronique à balayage (MEB) combinée à la spectroscopie d'énergie (EDS) a été utilisée pour détecter la distribution des particules dopées, et l'espacement des particules a été contrôlé à 0,5-2 μm . La résistance à la traction du fil de molybdène à haute uniformité peut être augmentée de 20 % à 30 % à haute température.

4.5.3 Mécanisme de dopage pour améliorer les performances à haute température

Le dopage améliore les performances à haute température du fil de molybdène grâce aux mécanismes suivants :

Renforcement des joints de grains : L'oxyde de lanthane, l'oxyde d'yttrium, etc. sont dispersés sous forme de nanoparticules dans le joint de grains de molybdène, épinglés à la dislocation, et inhibent la croissance et le fluage des grains. Par exemple, le fil de molybdène dopé à 0,8 % d'oxyde de lanthane a un taux de fluage 50 % inférieur à 1500 °C que le fil de molybdène pur.

Renforcement de la solution : Le rhénium se dissout dans le réseau de molybdène pour former une solution solide, ce qui réduit la densité des défauts cristallins et améliore la ductilité et la résistance à l'oxydation. L'allongement à la rupture du fil de molybdène dopé à 3 % de rhénium est porté à 20 % à 1200°C.

Stabilité de surface : Les éléments dopés peuvent former une structure de surface stable et inhiber la volatilisation de l'oxyde. Par exemple, les particules d'oxyde de lanthane forment une couche d'oxyde protectrice à haute température, réduisant ainsi le taux de formation de MoO_3 .

4.6 Contrôle de la qualité et optimisation du processus de fil de molybdène pour l'éclairage

Le contrôle de la qualité et l'optimisation des processus sont essentiels pour garantir des performances et une productivité constantes du fil de molybdène, y compris la surveillance des paramètres du processus, le contrôle des défauts et l'optimisation des coûts.

4.6.1 Surveillance en ligne des paramètres du procédé

La surveillance en ligne garantit la stabilité du processus de production en détectant les paramètres

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

du processus en temps réel.

Paramètres de surveillance : y compris la température de frittage ($\pm 5^{\circ}\text{C}$), la vitesse d'étirage ($\pm 0,1$ m/min), la température de recuit ($\pm 10^{\circ}\text{C}$), le débit de lubrifiant ($\pm 0,1$ L/min). Enregistrement en temps réel à l'aide de capteurs (p. ex., thermocouples, vélocimètres laser) et de systèmes d'acquisition de données.

Équipement de surveillance : Le système de surveillance avancé peut réaliser le contrôle automatique de l'ensemble du processus et optimiser les paramètres grâce à l'analyse des données volumineuses. Par exemple, les fluctuations de tension pendant le processus d'étirage sont contrôlées à $\pm 0,5$ N.

Impact sur l'application : la surveillance en ligne peut réduire le taux de défaillance à moins de 1 %, améliorer la précision dimensionnelle et la cohérence des performances du fil de molybdène et répondre aux besoins des lampes haut de gamme.

4.6.2 Contrôle des défauts (fissures, porosité, inclusions)

Le contrôle des défauts est essentiel pour améliorer la qualité du fil de molybdène, et les défauts courants comprennent les fissures, la porosité et les inclusions.

Fissures : Causées par une contrainte d'étirage ou un recuit inapproprié. Les mesures de contrôle comprennent l'optimisation de la matrice d'étirage (angle d'entrée $8-12^{\circ}$), la réduction de la vitesse d'étirage ($< 0,5$ m/min pour les ultrafilaments) et le recuit intermédiaire ($800-1000^{\circ}\text{C}$). La détection des fissures se fait par détection de défauts par ultrasons ou inspection microscopique.

Porosité : causée par un frittage insuffisant ou des impuretés de matières premières. Les mesures de contrôle comprennent l'augmentation de la température de frittage ($2200-2500^{\circ}\text{C}$), l'allongement du temps de maintien (4-8 heures) et l'utilisation d'hydrogène de haute pureté (point de rosée $< -40^{\circ}\text{C}$). La porosité a été détectée par tomographie à rayons X, et la porosité a été contrôlée à $< 0,5$ %.

Inclusions : causées par la contamination ou le dopage inégal des matières premières. Les mesures de contrôle comprennent un nettoyage strict des matières premières (nettoyage HNO_3) et l'utilisation du dopage humide. La détection des inclusions a été effectuée par spectroscopie d'énergie (EDS), et la teneur en impuretés a été contrôlée à $< 0,01$ %.

4.6.3 Productivité et optimisation des coûts

L'efficacité de la production et l'optimisation des coûts sont les clés de la compétitivité de l'industrie du fil de molybdène.

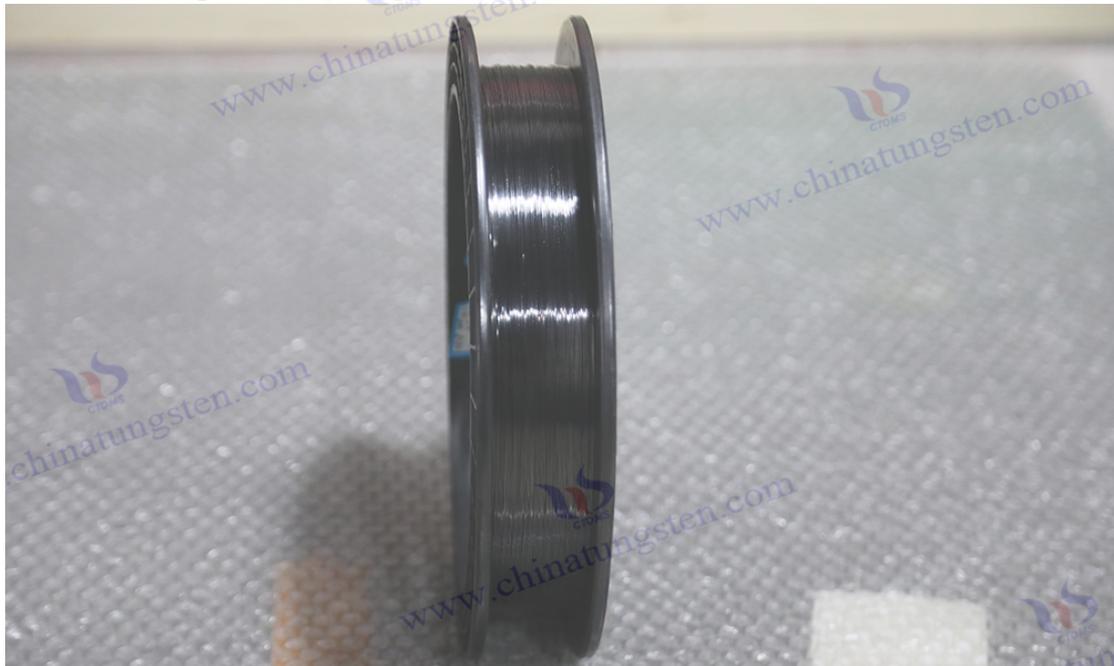
Amélioration de l'efficacité : La machine de tréfilage continu (telle que l'équipement allemand Niehoff) est utilisée pour augmenter la vitesse de tréfilage à 5-10 m / min, et le taux de rendement est augmenté à plus de 90 %. Les équipements automatisés de frittage et de recuit peuvent réduire les temps de cycle de production jusqu'à 20 %.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Optimisation des coûts : réduisez les coûts des matières premières en recyclant les déchets (par exemple les fils cassés) dans le processus d'étirage, avec un taux de récupération des déchets allant jusqu'à 30 %. L'optimisation de l'utilisation des lubrifiants (réduction de 10 à 20 %) et de la consommation d'énergie (réduction de 15 % de la consommation d'énergie du four de frittage) permet de réduire encore les coûts.

Mesures de protection de l'environnement : les systèmes de traitement des déchets liquides (tels que les équipements de neutralisation et de sédimentation) garantissent la conformité aux réglementations RoHS et REACH et réduisent les coûts de protection de l'environnement. Les technologies de fabrication vertes, telles que les fours de frittage à faible consommation d'énergie, peuvent réduire la consommation d'énergie de 10 à 15 %.

Les entreprises chinoises ont des avantages en matière d'optimisation des coûts, mais elles doivent encore apprendre des entreprises européennes et américaines sur la cohérence du processus du fil de molybdène dopé haut de gamme.



fil de molybdène pour l'éclairage de CTIA

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Chapitre 5 L'utilisation du fil de molybdène pour l'éclairage

Le fil de molybdène pour l'éclairage joue un rôle clé dans une variété d'appareils d'éclairage en raison de ses excellentes performances à haute température, de sa stabilité chimique et de sa résistance mécanique. Ce chapitre discutera en détail des applications spécifiques du fil de molybdène dans les lampes à incandescence, les lampes halogènes, les lampes à décharge gazeuse, l'éclairage spécialisé et d'autres domaines connexes, et analysera ses fonctions, ses exigences de performance et l'état du marché.

5.1 Lampes à incandescence

Les lampes à incandescence ont été les premiers appareils d'éclairage largement utilisés, et bien que leur marché se soit progressivement rétréci en raison de l'essor des lumières LED, elles sont toujours largement utilisées dans l'éclairage décoratif, les lampes rétro et les scènes à faible coût. Le filament de molybdène est principalement utilisé comme support de filament et composant conducteur dans les lampes à incandescence, et est devenu un matériau indispensable en raison de sa stabilité à haute température et de sa compatibilité avec la dilatation thermique avec le verre.

5.1.1 Support de filament et fonction conductrice

Dans les lampes à incandescence, la fonction principale du filament de molybdène est de soutenir le filament de tungstène et d'agir comme une électrode conductrice, assurant une transmission de courant stable et maintenant la géométrie du filament. Les lampes à incandescence fonctionnent en chauffant des filaments de tungstène avec un courant électrique pour produire de la lumière visible, et les filaments de molybdène doivent maintenir la stabilité structurelle et les propriétés électriques dans cet environnement à haute température.

Support du filament : Le filament de tungstène a tendance à se ramollir ou à s'affaisser à des températures élevées, ce qui entraîne un rendement lumineux inégal ou la casse du filament. Le filament de molybdène est utilisé comme matériau de support pour maintenir le filament à une position désignée à l'intérieur de l'ampoule, généralement dans une structure en spirale ou en forme de U enroulée avec un filament de tungstène. La haute résistance à la traction du fil de molybdène garantit qu'il peut résister au poids et aux contraintes thermiques du filament. Le fil de molybdène pur d'un diamètre de 0,1 à 0,5 mm est un choix courant en raison de son faible coût et de sa bonne aptitude au traitement.

Fonction conductrice : Le fil de molybdène agit comme une électrode pour introduire le courant de l'alimentation externe à l'intérieur de l'ampoule et se connecter avec le filament de tungstène. Sa faible résistivité réduit les pertes de chaleur par effet Joule et améliore l'efficacité énergétique. Le fil de molybdène doit également être scellé avec du verre pour former une structure étanche à l'air afin d'éviter le vide ou les fuites de gaz inerte. Son coefficient de dilatation thermique est adapté à celui du verre borosilicate, ce qui garantit que la zone d'étanchéité ne se fissure pas pendant le cycle thermique.

Caractéristiques du processus : Le fil de molybdène pour lampe à incandescence est principalement

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

du fil de molybdène pur, et la surface est généralement du fil de molybdène noir, car la couche d'oxyde peut améliorer l'adhérence avec le verre. Lors de la production, le fil de molybdène est requis par un processus d'emboutissage et de découpe de précision afin de garantir des tolérances de diamètre et des longueurs constantes. L'équipement d'assemblage automatique peut combiner avec précision le fil de molybdène avec le filament de tungstène pour améliorer l'efficacité de la production.

Scénario d'application : La plage de puissance des lampes à incandescence est de 15 à 1000 W, et le fil de molybdène est principalement utilisé dans les ampoules domestiques, les lumières décoratives et l'éclairage industriel. Les ampoules basse consommation nécessitent moins de performances que les fils de molybdène, tandis que les ampoules haute puissance nécessitent des fils de molybdène plus épais pour transporter des courants plus élevés.

La technologie d'application du fil de molybdène dans les lampes à incandescence est mature et le marché mondial est dominé par la Chine, l'Inde et l'Asie du Sud-Est pour répondre à la demande d'éclairage à faible coût.

5.1.2 Stabilité et durée de vie dans un environnement à haute température

La lampe à incandescence fonctionne dans un vide ou un gaz inerte à basse pression avec une température interne de plus de 2500°C, et le fil de molybdène doit maintenir une stabilité mécanique et chimique à haute température pour prolonger la durée de vie de la lampe.

Stabilité mécanique : La résistance à la traction et au fluage du fil de molybdène à haute température est essentielle. La résistance à la traction du fil de molybdène pur à 1500°C est suffisante pour supporter le filament de tungstène, mais son taux de fluage peut provoquer une déformation de la structure de support après un fonctionnement à long terme. Afin d'améliorer la stabilité, le fil de molybdène dopé peut être utilisé pour les lampes à incandescence haute puissance, ce qui réduit le taux de fluage de plus de 50 % et convient aux luminaires industriels de plus de 1000 W.

Stabilité chimique : La lampe à incandescence est dans un environnement sous vide ou argon/azote, et le fil de molybdène n'a pas besoin de faire face à des problèmes d'oxydation, mais il peut réagir avec de l'oxygène résiduel ou de la vapeur d'eau à l'état de traces à des températures élevées pour générer des MoO₃ volatils. Le processus de fermentation de l'ampoule ou la pureté du gaz doit être strictement contrôlé en production pour protéger le fil de molybdène. La couche d'oxyde du fil de molybdène noir est stable dans un environnement sous vide et n'affecte pas de manière significative les performances.

Impact sur la durée de vie : La stabilité du fil de molybdène affecte directement la durée de vie des lampes à incandescence. La déformation ou la rupture du fil de support peut provoquer le déplacement du filament de tungstène, provoquant un court-circuit ou une décroissance de la lumière. La défaillance de l'électrode hermétiquement scellée peut introduire de l'air, entraînant une oxydation rapide du filament et du filament de molybdène. Des études ont montré que l'optimisation de la qualité de surface du fil de molybdène et du processus d'étanchéité peut prolonger la durée de

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

vie du luminaire de 10 à 20 %.

Optimisation des processus : Le recuit intermédiaire en production améliore la ductilité du fil de molybdène et réduit le risque de fragilisation à haute température. Le nettoyage des surfaces élimine les traces d'impuretés et améliore encore la stabilité chimique. Les entreprises chinoises garantissent la fiabilité du fil de molybdène et la durée de vie des lampes et des lanternes grâce à un équipement de scellage automatique et à une technologie de test en ligne.

Bien que le marché du fil de molybdène pour les lampes à incandescence se rétrécisse progressivement, sa demande d'éclairage décoratif est stable et on s'attend à ce qu'il représente encore 15 à 20 % du marché du fil de molybdène de lampe de 2025 à 2030.

5.2 Lampes halogènes

Les lampes halogènes sont largement utilisées dans l'éclairage automobile, l'éclairage domestique et l'éclairage professionnel pour améliorer l'efficacité lumineuse et la longévité grâce au cycle halogène. Le fil de molybdène est utilisé comme électrode, fil de support et matériau d'étanchéité dans les lampes halogènes et est soumis à des températures plus élevées et à des environnements chimiques.

5.2.1 Le rôle clé du fil de molybdène dans le cycle halogène

Le principe de fonctionnement de la lampe halogène est d'ajouter une petite quantité de gaz halogène à l'ampoule, qui réagit avec les atomes de tungstène évaporés pour former un halogénure de tungstène volatil, ce qui empêche le tungstène de se déposer sur la paroi interne de l'ampoule et fait en sorte que le tungstène se dépose sur le filament pour prolonger la durée de vie du filament. Le fil de molybdène joue un rôle clé dans ce cycle.

Fonction d'électrode : Le fil de molybdène agit comme une électrode pour introduire le courant dans le filament de tungstène, qui doit résister à une tension élevée et à un courant élevé instantané. Sa faible résistivité et sa conductivité élevée assurent une transmission efficace du courant et réduisent les pertes d'énergie. Le fil-électrode en molybdène doit également être scellé au verre pour maintenir un environnement à haute tension à l'intérieur de l'ampoule.

Fonction de support : Le fil de molybdène soutient le filament de tungstène pour l'empêcher de vibrer ou de s'affaisser à des températures élevées et des cycles halogènes. Le fil de molybdène lanthane d'un diamètre de 0,05 à 0,3 mm est préféré car sa résistance à la traction et sa résistance au fluage à haute température sont supérieures à celles du fil de molybdène pur.

Prise en charge du cycle halogène : Le fil de molybdène est en contact direct avec le gaz halogène et doit être résistant à la corrosion chimique. Le cycle halogène crée une zone chaude près de la paroi interne de l'ampoule, et la surface du fil de molybdène doit être stable et ne pas former de composés volatils avec de l'iode ou du brome. Des études ont montré que le fil de molybdène a un taux de corrosion bien meilleur que le tungstène dans un environnement iodé.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Caractéristiques du processus : Le fil de molybdène pour lampe halogène est principalement du fil de molybdène nettoyé, et la finition de surface et la résistance à la corrosion sont améliorées par le polissage électrolytique. Le processus d'étanchéité doit être contrôlé avec précision en production pour garantir l'étanchéité à l'air et la stabilité des gaz halogènes.

Scénarios d'application : Les lampes halogènes sont largement utilisées dans les phares automobiles, les projecteurs domestiques et l'éclairage de scène. Les lampes halogènes automobiles représentent plus de 50 % du marché des lampes halogènes, et les exigences de fiabilité pour le fil de molybdène sont extrêmement élevées.

La stabilité et la résistance à la corrosion du fil de molybdène dans le cycle halogène en font le matériau de base des lampes halogènes, et le marché mondial est dominé par l'Europe et la Chine.

5.2.2 Résistance aux hautes températures et résistance à la corrosion chimique

La température de fonctionnement des lampes halogènes est beaucoup plus élevée que celle des lampes à incandescence, la température du filament peut atteindre 3000 °C, la température de la pièce d'étanchéité est de 600-800 °C et le fil de molybdène doit avoir une excellente résistance aux hautes températures et à la corrosion chimique.

Résistance aux hautes températures : le fil de molybdène doit maintenir sa résistance mécanique et sa stabilité structurelle à 1500-2000°C. En raison du dopage de l'oxyde de lanthane, la température de recristallisation du fil de molybdène lanthane est augmentée à 1800 °C, et la résistance à la traction peut atteindre 400 MPa à 1500 °C, et le taux de fluage est inférieur à celui du fil de molybdène pur. En revanche, le fil de molybdène pur est sujet à la déformation à 1500°C. L'excellente performance du fil de molybdène et de lanthane garantit la fiabilité du support de filament et de l'électrode en fonctionnement à haute température à long terme.

Résistance chimique : Le gaz halogène est très corrosif à haute température, et le fil de molybdène doit résister à son érosion. La stabilité chimique du molybdène lui permet de former une structure de surface stable dans un environnement halogène sans formation d'halogénures volatils. Le fil de molybdène nettoyé présente moins de défauts de surface et le taux de corrosion est environ 30 % inférieur à celui du fil de molybdène noir. Le fil de molybdène dopé améliore encore la résistance à la corrosion en formant une couche de surface résistante à la corrosion.

Optimisation des processus : La résistance à la corrosion est renforcée par la passivation de surface en production. L'électropolissage réduit la rugosité de surface à Ra 0,2 µm, réduisant ainsi le point d'initiation de la corrosion. Le processus d'étanchéité doit contrôler la composition du verre pour s'assurer qu'elle correspond à la dilatation thermique du fil de molybdène.

Effet de vie : La résistance aux températures élevées et la résistance à la corrosion du fil de molybdène déterminent directement la durée de vie de la lampe halogène. Des études ont montré que la durée de vie des lampes halogènes utilisant du fil de molybdène lanthane peut atteindre 4000 heures, ce qui est 50 % plus élevé que celle des lampes à filament de molybdène pur. L'optimisation

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

de la qualité de surface et de l'étanchéité du joint peut prolonger la durée de vie de 10 à 20 %.

Le fil de molybdène pour les lampes halogènes représente plus de 30 % du marché du fil de molybdène pour lampe, et il devrait maintenir une croissance stable en raison de la demande d'éclairage automobile de 2025 à 2030.

5.3 Lampes à décharge

Les lampes à décharge de gaz produisent de la lumière par décharge de gaz, qui ont une efficacité lumineuse élevée et une longue durée de vie, et sont largement utilisées dans l'éclairage commercial, industriel et extérieur. Le fil de molybdène est principalement utilisé comme électrode et matériau d'étanchéité dans les lampes à décharge de gaz, qui doivent résister à une tension élevée, à un arc à haute température et à un environnement chimique complexe.

5.3.1 Fil de molybdène pour lampes à décharge à haute intensité (HID).

Les lampes à décharge de gaz à haute intensité comprennent les lampes aux halogénures métalliques, les lampes au sodium haute pression et les lampes au xénon avec des rendements lumineux de 100 à 150 lm/W et sont largement utilisées dans l'éclairage routier, les stades et les installations industrielles. Le fil de molybdène est utilisé comme matériau d'électrode et d'étanchéité dans les lampes HID et doit répondre à des exigences de performance extrêmement élevées.

Fonction d'électrode : La lampe HID génère de la lumière par décharge d'arc, et l'électrode doit résister à une tension élevée et à un courant élevé instantané. Le point de fusion élevé et la conductivité du fil de molybdène garantissent qu'il ne fond pas ou ne subit pas de pertes importantes à des températures d'arc élevées. Le fil de molybdène lanthane ou le fil de molybdène rhénium d'un diamètre de 0,03 à 0,2 mm est préféré en raison de son excellente résistance à la corrosion par arc et de sa résistance à haute température.

Fonction d'étanchéité : Le fil de molybdène est scellé avec de la céramique ou du verre pour maintenir un environnement à haute pression à l'intérieur de l'ampoule. Son coefficient de dilatation thermique est similaire à celui de la céramique d'alumine et permet une étanchéité fiable à travers les matériaux de transition. La pièce d'étanchéité doit résister au changement cyclique de température de 500 à 700 °C, et l'étanchéité à l'air du fil de molybdène affecte directement la durée de vie de la lampe.

Exigences de performance : Les électrodes de lampe HID doivent résister à la corrosion de surface et à la pulvérisation cathodique causée par l'arc électrique. En raison du dopage de l'oxyde de lanthane, le fil de molybdène lanthane a un taux de résistance à la corrosion par arc inférieur de 20 % à celui du fil de molybdène pur. La ductilité du fil de molybdène rhénium le rend adapté aux formes d'électrodes complexes et améliore la stabilité de l'arc.

Caractéristiques du processus : Le fil de molybdène utilisé pour la lampe HID est principalement du fil de molybdène nettoyé, ce qui améliore la finition de surface et la stabilité de l'arc grâce au polissage électrolytique. Le tréfilage de précision et le recuit à haute température sont utilisés dans

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

la production pour assurer la cohérence du fil. Le processus d'étanchéité est effectué dans une atmosphère inerte et le gradient de température est contrôlé pour éviter la fissuration sous contrainte.

Scénarios d'application : les lampes aux halogénures métalliques sont utilisées pour l'éclairage commercial, les lampes au sodium haute pression sont utilisées pour l'éclairage routier et les lampes au xénon sont utilisées pour les phares automobiles et les équipements de projection. Les lampes HID représentent 70 % du marché des lampes à décharge gazeuse, et la quantité de fil de molybdène utilisée dans les lampes représente 25 %.

5.3.2 Matériaux des électrodes des lampes fluorescentes

Les lampes fluorescentes excitent les phosphores pour produire de la lumière par décharge de vapeur de mercure, avec une efficacité lumineuse de 50 à 100 lm / W, et sont largement utilisées dans l'éclairage des bureaux, des écoles et des maisons. Le fil de molybdène est principalement utilisé comme matériau d'électrode dans les lampes fluorescentes et est responsable de l'initiation et du maintien de la décharge.

Fonction de l'électrode : Les électrodes des lampes fluorescentes sont soumises à une décharge à basse tension, qui est initiée par l'émission d'électrons thermiques. En tant que substrat d'électrode, le fil de molybdène est généralement recouvert de matériau émetteur pour réduire la fonction de travail et améliorer l'efficacité de l'émission. Le fil de molybdène pur ou le fil de molybdène lanthane d'un diamètre de 0,05 à 0,2 mm est un choix courant.

Exigences de performance : Le fil de molybdène doit résister à la corrosion chimique de la vapeur de mercure et au choc thermique de l'arc. Le taux de corrosion du fil de molybdène pur dans la vapeur de mercure répond aux besoins des lampes fluorescentes. Le fil de molybdène lanthane convient aux lampes fluorescentes de haute puissance en raison de sa plus grande résistance à la corrosion par arc.

Caractéristiques du processus : Le fil de molybdène utilisé dans les lampes fluorescentes est principalement du fil de molybdène nettoyé, et l'oxyde de surface est éliminé par nettoyage chimique pour assurer l'adhérence du revêtement d'émission. Le formage des électrodes nécessite un emboutissage ou un enroulement de précision pour contrôler l'espacement des électrodes afin d'assurer la stabilité de la décharge. Le processus d'étanchéité doit être adapté au verre borosilicaté et la température d'étanchéité est contrôlée à 600-700 °C.

Scénarios d'application : Les lampes fluorescentes comprennent les lampes fluorescentes à tube droit, les lampes fluorescentes compactes et les lampes fluorescentes annulaires. Les LFC représentent 50 % du marché des lampes fluorescentes et sont largement utilisées dans l'éclairage domestique. Bien que les lampes LED remplacent progressivement les lampes fluorescentes, les lampes fluorescentes sont toujours en demande dans les pays en développement, et le fil de molybdène représente 10 % du fil de molybdène des lampes.

État du marché : Le marché des lampes fluorescentes a diminué en raison des réglementations

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

environnementales, mais son avantage de faible coût lui a permis de rester en Asie et en Afrique. La Chine est un important producteur de fil de molybdène pour lampes fluorescentes, qui est exporté vers l'Inde et l'Asie du Sud-Est.

Le fil de molybdène pour lampes fluorescentes a un seuil technique bas, mais la qualité du revêtement et de l'étanchéité des électrodes doit être strictement contrôlée pour garantir les performances de démarrage et la longévité.

5.4 Éclairage spécial

L'éclairage spécialisé est conçu pour un spectre, un environnement ou une utilisation spécifique, y compris les phares automobiles, les lumières de projection, l'éclairage de scène, les lumières UV, les lumières infrarouges et l'éclairage médical. Le fil de molybdène doit répondre aux exigences d'une grande fiabilité, de formes complexes et d'environnements extrêmes dans un éclairage spécial.

5.4.1 Phares et feux-brouillard

Les phares et les phares antibrouillard automobiles nécessitent une luminosité élevée, une longue durée de vie et une résistance aux vibrations, et les fils de molybdène sont principalement utilisés pour les électrodes, les fils de support et les matériaux d'étanchéité pour les lampes halogènes et les lampes au xénon.

Fonction : Dans les phares halogènes, le fil de molybdène agit comme une électrode et un fil de support, résiste à une tension de 12-24 V et à un courant de 5-10 A, soutenant le filament de tungstène. Dans les lampes au xénon, le fil de molybdène agit comme une électrode et est soumis à une tension de démarrage de 20-30 kV et à une température d'arc élevée. Le fil de molybdène doit également être scellé avec du verre ou de la céramique pour maintenir un environnement à haute pression.

Exigences de performance : Les lampes automobiles doivent résister aux vibrations et aux cycles thermiques. Le fil de molybdène lanthane et le fil de molybdène rhénium conviennent aux lampes automobiles en raison de leur excellente résistance et ductilité à haute température. La résistance à la corrosion par arc et la finition de surface sont essentielles à la stabilité de l'arc.

Caractéristiques du processus : Le fil de molybdène utilisé pour les lampes d'automobile est principalement du fil de molybdène nettoyé, ce qui améliore la résistance à la corrosion grâce au polissage électrolytique. Les électrodes doivent être moulées avec précision selon une tolérance de $\pm 0,005$ mm. Le processus de scellage nécessite l'utilisation d'équipements automatisés pour assurer l'étanchéité à l'air et la cohérence.

Scénario d'application : Les phares halogènes représentent 60 % du marché de l'éclairage automobile, et les lampes au xénon 20 %, principalement utilisées dans les modèles haut de gamme. Les phares antibrouillard utilisent plus souvent des lampes halogènes car ils doivent pénétrer le brouillard. La production automobile mondiale stimule la demande de fil de molybdène, représentant 20 % du fil de molybdène utilisé dans les lampes.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

État du marché : L'Europe et la Chine sont les principaux marchés, et les entreprises chinoises occupent le marché bas de gamme grâce à des avantages en termes de coûts.

5.4.2 Lampes de projection, éclairage de scène et éclairages photographiques

Les lampes de projection, l'éclairage de scène et les lampes photographiques nécessitent une luminosité élevée, un faisceau précis et une longue durée de vie, et le fil de molybdène est principalement utilisé comme électrodes et matériaux de support pour les lampes HID et les lampes halogènes.

Fonction : Dans les lampes de projection, le fil de molybdène agit comme une électrode de lampe HID, soumise à une tension de démarrage de 10-20 kV et à une température d'arc élevée. L'éclairage de scène et les lumières photographiques utilisent principalement des lampes halogènes ou des lampes au xénon, et les fils de molybdène sont utilisés comme fils de support et électrodes pour soutenir les filaments de tungstène ou les arcs de guidage. Le fil de molybdène lanthane ou le fil de molybdène-rhénium d'un diamètre de 0,05 à 0,2 mm est un choix courant.

Exigences de performance : une stabilité élevée de l'arc et une résistance aux chocs thermiques sont requises. Le fil de molybdène rhénium convient aux formes d'électrodes complexes en raison de son excellente ductilité. La finition de surface réduit les projections d'arc et améliore l'efficacité du flux lumineux.

Caractéristiques du processus : Le fil de molybdène pour lampe de projection nécessite un tréfilage ultra-fin et un traitement de passivation de surface pour améliorer la résistance à la corrosion. Le fil de molybdène pour les lumières de scène doit être recuit à haute température pour améliorer la résistance au fluage. Le processus d'étanchéité doit être associé à de la céramique d'alumine de haute pureté et la température est contrôlée à 800-1000°C.

Scénarios d'application : les lampes de projection sont utilisées pour les affichages éducatifs et commerciaux, l'éclairage de scène est utilisé pour les théâtres et les concerts, et les lumières de photographie sont utilisées pour le tournage de films et de télévision. La taille du marché mondial de l'éclairage professionnel stimule la demande de fil de molybdène, représentant 10 % du fil de molybdène utilisé dans les lampes.

Statut du marché : les entreprises étrangères sont les principaux fournisseurs et les entreprises chinoises sont compétitives sur le marché bas de gamme.

5.4.3 Lampes ultraviolettes, lampes infrarouges et éclairage médical

L'éclairage ultraviolet, infrarouge et médical est spécifique à un spectre ou à une application spécifique, et les filaments de molybdène doivent répondre à une stabilité chimique élevée et à des exigences environnementales complexes.

Lampe ultraviolette : utilisé pour la stérilisation, le durcissement et le traitement de l'eau, le fil de molybdène est utilisé comme électrode pour résister à la décharge de vapeur de mercure. Le fil de

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

molybdène-yttrium ou fil de molybdène et de cérium est préféré en raison de sa forte résistance à la corrosion par le mercure. Le revêtement de surface peut encore augmenter la durée de vie.

Lampe infrarouge : utilisé pour le chauffage et le séchage industriel, le fil de molybdène comme fil de support ou électrode, résiste à des températures élevées de 2000-2500°C. Le fil de molybdène lanthane convient aux lampes infrarouges en raison de son excellente résistance au fluage. La finition de surface améliore l'efficacité du rayonnement.

L'éclairage médical : tels que les lampes chirurgicales et dentaires, utilisant des lampes halogènes ou des lampes HID, le fil de molybdène comme électrodes et les fils de support, nécessite une grande fiabilité et un rendement lumineux précis. La ductilité du fil de molybdène rhénium le rend adapté aux conceptions d'électrodes complexes.

Caractéristiques du processus : le fil de molybdène pour lampe ultraviolette nécessite un tréfilage de précision et une passivation de surface, le fil de molybdène pour lampe infrarouge nécessite un recuit à haute température et le fil de molybdène pour lampe médicale nécessite une détection stricte des défauts. Le processus d'étanchéité doit être assorti d'un verre spécial et la température est contrôlée à 900-1100°C.

Scénarios d'application : Les lampes UV sont utilisées dans les hôpitaux et le traitement de l'eau, les lampes infrarouges sont utilisées pour le chauffage industriel et l'éclairage médical est utilisé dans les salles d'opération. Le marché de l'éclairage spécial a une forte valeur ajoutée, et la quantité de fil de molybdène représente 10 % du fil de molybdène utilisé dans les lampes.

État du marché : les entreprises étrangères sont les principaux fournisseurs, et les entreprises chinoises se développent progressivement dans le domaine du fil de molybdène pour les lampes ultraviolettes.

5.5 Autres domaines d'application

En plus de l'éclairage, le fil de molybdène a également des applications importantes dans l'électronique sous vide, l'EDM et les fours à haute température, démontrant ainsi sa polyvalence.

5.5.1 Électronique du vide (tubes, tubes à rayons X)

L'électronique du vide utilise le mouvement des électrons dans le vide pour réaliser l'amplification du signal ou l'imagerie, et le fil de molybdène est utilisé comme électrode, grille ou matériau de support.

Fonction : Dans les tubes électroniques, le fil de molybdène agit comme une cathode ou une porte pour résister aux températures élevées et au bombardement d'électrons. Dans un tube à rayons X, le fil de molybdène agit comme un support cible ou une électrode et est soumis à des tensions et des arcs élevés. Le fil de molybdène lanthane ou le fil de molybdène-rhénium d'un diamètre de 0,05 à 0,2 mm est un choix courant.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Exigences de performance : une conductivité élevée, une résistance à la corrosion par arc et une stabilité à haute température sont requises. Le fil de molybdène rhénium convient aux structures de portes complexes en raison de son excellente ductilité. La finition de surface réduit la non-uniformité de l'émission d'électrons.

Caractéristiques du processus : un tréfilage ultra-fin et un polissage électrolytique sont nécessaires, et le processus d'étanchéité est assorti à un verre spécial. Le degré de vide doit être strictement contrôlé en production pour éviter la contamination par les impuretés.

Scénarios d'application : Les tubes sont utilisés dans la hi-fi et le radar, et les tubes à rayons X sont utilisés dans l'imagerie médicale et l'inspection industrielle. La taille du marché des appareils électroniques à vide est petite et la quantité de fil de molybdène représente 5 % du marché total.

5.5.2 Fil de molybdène pour l'usinage par électroérosion (EDM).

L'EDM ablate les matériaux par EDM, et le fil de molybdène est utilisé comme fil d'électrode, qui est largement utilisé dans la fabrication de moules et l'usinage de précision.

Fonction : Le fil de molybdène agit comme une électrode de décharge dans l'EDM, d'un diamètre de 0,1 à 0,3 mm, et est soumis à un courant d'impulsion à haute fréquence. Son point de fusion élevé et sa résistance à la traction garantissent que l'électrode ne fond pas et ne se casse pas.

Exigences de performance : une conductivité élevée et une résistance à la corrosion par arc sont requises. Le fil de molybdène pur est le choix principal en raison de son faible coût. La finition de surface améliore la stabilité de l'évacuation.

Caractéristiques du processus : un tréfilage et un recuit de précision sont nécessaires pour assurer la consistance du fil. La machine de tréfilage continu est utilisée dans la production pour améliorer l'efficacité.

Scénario d'application : L'EDM est utilisée dans l'aérospatiale, la fabrication de moules automobiles et de dispositifs médicaux. Le fil de molybdène représente 30 % du marché du fil d'électrode EDM, et la Chine est le principal producteur.

5.5.3 Éléments chauffants et thermocouples du four à haute température

Le fil de molybdène est utilisé dans les fours à haute température comme éléments chauffants ou gaines de thermocouple pour résister à des températures extrêmement élevées.

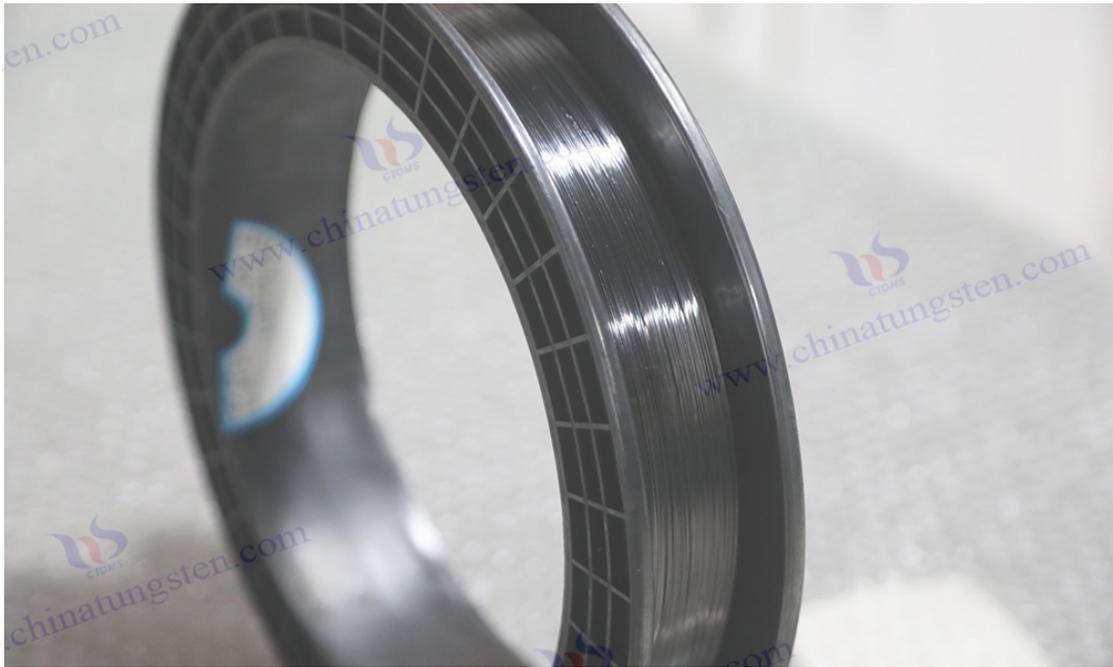
Fonction : En tant qu'élément chauffant, le fil de molybdène génère des températures élevées grâce au chauffage par Joule, ce qui nécessite une résistivité élevée et une résistance aux températures élevées. En tant que gaine de protection du thermocouple, le fil de molybdène protège le thermocouple de la corrosion. Le fil de molybdène pur ou le fil de molybdène lanthane d'un diamètre de 0,5 à 2,0 mm est un choix courant.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Exigences de performance : la résistance à l'oxydation et la résistance au fluage sont requises. Le taux de fluage du fil de molybdène lanthane à 1800°C est inférieur à celui du fil de molybdène pur, qui convient à un fonctionnement à long terme.

Caractéristiques du processus : un tréfilage grossier et un recuit à haute température sont nécessaires, et la surface peut être recouverte d'une couche anti-oxydation. La taille des grains doit être contrôlée pendant la production.

Scénarios d'application : Les fours à haute température sont utilisés pour le frittage et le traitement thermique des matériaux, et les thermocouples sont utilisés pour la mesure de la température. Le fil de molybdène est utilisé dans ce domaine pour représenter 5 % du marché total.



fil de molybdène pour l'éclairage de CTIA

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire for Lighting Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire for Lighting

As one of the core materials in modern lighting technology, molybdenum wire is widely used in various light sources including incandescent lamps, halogen lamps, fluorescent lamps, and gas discharge lamps, due to its high melting point, high strength, excellent corrosion resistance, and superior electrical conductivity. It is an irreplaceable and critical component in the lighting industry.

2. Typical Applications of Molybdenum Wire for Lighting

Residential and Commercial Lighting: Used in incandescent and halogen lamps to provide warm light and long service life.

Automotive Lighting: Functions as electrodes in HID and xenon lamps, offering high brightness and vibration resistance.

Specialty Lighting: Utilized in projection lamps, ultraviolet (UV) lamps, and infrared (IR) lamps to meet high-temperature and high-precision requirements in medical, industrial, and scientific applications.

Emerging Fields: Serves as conductive leads for LED lamps and supports for phosphors in laser lighting, aligning with future lighting technology development.

3. Basic Data of Molybdenum Wire for Lighting (Reference)

Parameter	Pure Mo Wire	Mo-La Wire	Mo-Re Wire
Mo Content	≥99.95%	≥99.0%	52.5%–86.0%
Diameter Range	0.03–3.2 mm	0.03–1.5 mm	0.03–1.0 mm
Tolerance	±0.002 mm	±0.002 mm	±0.002 mm
Tensile Strength (Room Temp)	800–1200 MPa	900–1400 MPa	1000–1500 MPa
Tensile Strength (at 1500°C)	150–300 MPa	200–400 MPa	250–450 MPa
Elongation at Break	10%–25%	12%–20%	15%–25%
Electrical Resistivity (20°C)	$5.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
Main Applications	Incandescent, Halogen	Halogen, Auto Headlights	HID, Projection Lamps

4. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.molybdenum.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Chapitre 6 Équipement de production de fil de molybdène pour l'éclairage

La production de fil de molybdène pour l'éclairage est un processus de haute précision et de haute technologie, impliquant de multiples maillons, du traitement des matières premières aux tests de produits finis, en s'appuyant sur des équipements spéciaux avancés. Ce chapitre abordera en détail les différents types d'équipements nécessaires à la production de fil de molybdène pour l'éclairage, y compris l'équipement de manutention des matières premières, l'équipement de fusion et de moulage, l'équipement de tréfilage, l'équipement de traitement de surface et l'équipement d'inspection et de contrôle de la qualité. Chaque section fournira une analyse approfondie des fonctions de l'équipement, des paramètres techniques, des caractéristiques du processus et du rôle dans la production de fil de molybdène pour l'éclairage, et fournira une explication technique complète en combinaison avec les principaux fournisseurs d'équipements et les pratiques industrielles du monde pour répondre à la demande de l'industrie de l'éclairage pour des équipements de production de fil de molybdène haute performance.

6.1 Équipement de traitement des matières premières en fil de molybdène pour lampes

Le traitement des matières premières est la première étape de la production de fil de molybdène pour l'éclairage, qui implique le broyage de la poudre de molybdène, le criblage, le mélange de matériaux dopés et la purification des matières premières, ce qui affecte directement le taux de réussite du processus ultérieur et la qualité du fil de molybdène. Ce qui suit est une analyse détaillée sous trois aspects : broyage et criblage, dopage, mélange et purification.

6.1.1 Équipement de broyage et de criblage de la poudre de molybdène

La taille et la morphologie des particules de la poudre de molybdène sont cruciales pour la densité de l'ébauche frittée et les performances du fil de molybdène, et l'équipement de broyage et de criblage est utilisé pour préparer de la poudre de molybdène de haute pureté avec une taille de particule uniforme (taille des particules de 1 à 5 μm , pureté $\geq 99,95\%$).

Équipement de broyage : Les équipements couramment utilisés comprennent les broyeurs à boulets planétaires et les broyeurs à jet. Les broyeurs planétaires à boulets (par exemple la série allemande Fritsch Pulverisette) broient la poudre grossière de molybdène (granulométrie 10-50 μm) à 1-5 μm avec un temps de broyage de 2 à 6 heures et une vitesse de 200-400 tr/min au moyen d'une bille de broyage rotative à grande vitesse (en zircone ou en carbure de ciment). Les broyeurs à jet (tels que NETZSCH Jet Mill en Allemagne) utilisent un flux d'air à grande vitesse (pression 0,5-1 MPa) pour entrer en collision et écraser, ce qui convient à la production de poudre de molybdène sphérique ou presque sphérique pour améliorer les performances de frittage. Le processus de broyage est effectué dans une atmosphère inerte (par exemple de l'argon) ou sous vide pour éviter l'oxydation.

Équipement de criblage : une machine de criblage vibrante et un classificateur d'air sont utilisés pour contrôler la distribution granulométrique de la poudre de molybdène. Les tamiseuses vibrantes (par exemple, Retsch AS 200 en Allemagne) séparent les poudres de différentes tailles de particules à travers des tamis multicouches (taille des pores de 1 à 10 μm), et l'efficacité du criblage peut atteindre plus de 95 %. Un classificateur d'air (tel que Hosokawa Alpine, Allemagne) peut contrôler

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

avec précision le D50 à 2-3 μm et le rapport D90/D10 à 2-3 pour assurer l'uniformité de la taille des particules grâce à la séparation de l'air. L'équipement doit être doublé d'acier inoxydable ou de céramique pour éviter la contamination métallique.

Caractéristiques du processus : L'équipement de broyage doit être équipé d'un système de refroidissement (refroidissement par eau ou congélation à l'azote liquide) pour contrôler la température de broyage ($<50\text{ }^{\circ}\text{C}$) afin d'éviter l'oxydation ou l'agglomération de la poudre de molybdène. L'équipement de dépistage doit être équipé d'un analyseur de taille de particules en ligne (tel qu'un analyseur de taille de particules laser) pour surveiller la distribution de la taille des particules en temps réel. Les équipements de broyage et de criblage avancés peuvent augmenter le rendement en poudre à plus de 98 %.

Impact de l'application : La taille uniforme des particules de poudre de molybdène et la morphologie sphérique peuvent augmenter la densité de l'ébauche frittée (95 % à 98 %), réduire la porosité et les inclusions et fournir des matières premières de haute qualité pour le tréfilage ultérieur.

6.1.2 Équipement de mélange et d'homogénéisation du dopane

La distribution uniforme des matériaux dopés (par exemple, l'oxyde de lanthane, le rhénium) est la clé de la préparation de fils de molybdène haute performance (par exemple, les fils de molybdène, de molybdène-rhénium), et des équipements de mélange et d'homogénéisation sont utilisés pour assurer l'uniformité des éléments dopés.

Équipement de mélange : le disperseur à ultrasons et le mélangeur planétaire sont couramment utilisés pour le mélange humide. Le disperseur à ultrasons (tel que le Hielscher UP400St aux États-Unis) disperse la poudre de molybdène et les matériaux dopés (tels que l'oxyde de lanthane, taille des particules 50-200 nm) dans un milieu liquide (tel que l'éthanol) par vibration à haute fréquence (20-40 kHz), et le temps de mélange est de 1 à 2 heures, et l'écart d'uniformité est de $<0,01\%$. Les mélangeurs planétaires (par exemple EIRICH RV02 d'Allemagne) réalisent un mélange humide ou sec par mélange multidirectionnel (50-100 tr/min) et conviennent à la production à grande échelle. Le mélange à sec adopte un mélangeur de type V ou à double cône (tel que le produit de l'usine d'équipement de mélange de Nantong en Chine), et le temps de mélange est de 4 à 8 heures, ce qui convient au dopage en poudre de rhénium.

Équipement d'homogénéisation : Le sécheur par atomisation (tel que le Büchi B-290 allemand) est utilisé pour le séchage de la poudre après mélange humide, avec une température d'entrée de 200-250 $^{\circ}\text{C}$ et une température de sortie de 80-100 $^{\circ}\text{C}$, pour préparer une poudre composite homogène. Le séchage par atomisation permet d'éviter l'agglomération des particules dopées, et l'espacement des particules est contrôlé à 0,5-2 μm .

Caractéristiques du processus : L'équipement de mélange doit être utilisé dans un environnement propre (classe ISO 7) pour éviter la pollution par la poussière. Le disperseur à ultrasons convient aux petits lots de dopage de haute précision, et le sécheur-atomiseur convient à la production à grande échelle. L'équipement d'homogénéisation doit être équipé d'un système d'échantillonnage en

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

ligne pour vérifier l'uniformité du dopage par analyse par fluorescence X (XRF).

Impact de l'application : Une distribution uniforme du dopage peut améliorer la résistance à la traction et la résistance au fluage du fil de molybdène à haute température (20 % -30 % à 1500°C).

6.1.3 Équipement de purification des matières premières

L'équipement de purification des matières premières est utilisé pour éliminer les impuretés (telles que le fer, le silicium, l'oxygène) dans la poudre de molybdène afin de garantir que la pureté atteint plus de 99,95 %.

Four de réduction d'hydrogène : Les fours tubulaires de réduction d'hydrogène (tels que l'équipement de l'usine de carbure cémenté de Zhuzhou en Chine) sont utilisés pour réduire le trioxyde de molybdène (MoO_3) en poudre de molybdène de haute pureté. La température de réduction est de 600 à 1000 °C, la pureté de l'hydrogène \geq de 99,999 %, le point de rosée de $<$ 40 °C et le temps de réduction est de 4 à 8 heures. L'équipement doit être équipé d'une zone de chauffage à plusieurs étages pour contrôler le gradient de température ($\pm 5^\circ\text{C}$) et éviter les résidus d'oxygène.

Équipement de nettoyage chimique : la cuve de décapage (en PTFE résistant à la corrosion) est utilisée pour éliminer les oxydes et la graisse à la surface de la poudre de molybdène, l'agent de nettoyage couramment utilisé est l'acide nitrique dilué (HNO_3 , concentration 5 %-10 %) ou l'hydroxyde de sodium (NaOH , concentration 2 %-5 %), température de nettoyage 40-60 °C, temps 5-10 minutes. Après le lavage, rincez à l'eau déminéralisée et séchez sous vide (100-150°C).

Caractéristiques du procédé : Le four de réduction de l'hydrogène doit être équipé d'un système de traitement des gaz d'échappement (tel qu'une tour d'absorption) pour traiter l'hydrogène et l'oxyde de gaz n'ayant pas réagi, ce qui répond aux exigences de la protection de l'environnement. Les équipements de nettoyage chimique doivent être équipés d'un système d'élimination des déchets (neutralisation de la sédimentation) pour garantir le respect de la directive RoHS. L'équipement de purification peut réduire la teneur en impuretés à moins de 0,01 %.

Impact de l'application : La poudre de molybdène de haute pureté peut réduire les inclusions dans les ébauches frittées et améliorer la stabilité chimique et les propriétés électriques du fil de molybdène.

6.2 Matériel de fusion et de formage de fils de molybdène pour lampes

L'équipement de fusion et de formage est utilisé pour convertir la poudre de molybdène en une ébauche à haute densité qui sert de base au tréfilage ultérieur, impliquant des processus de frittage sous vide, de pressage à chaud, de forgeage et de laminage.

6.2.1 Four de frittage sous vide et four de protection d'atmosphère

Le four de frittage est l'équipement de base pour la préparation des ébauches de molybdène haute densité, qui est divisé en four de frittage sous vide et four de protection d'atmosphère.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Four de frittage sous vide : comme la série VIGA de ALD Vacuum Technologies en Allemagne, le degré de vide de travail est de $<10^{-3}$ Pa, la température est de 1800-2200 °C et le temps de maintien est de 4-8 heures. Des éléments chauffants en molybdène ou en tungstène sont utilisés dans le four, qui résistent aux températures élevées et ne polluent pas les flans. Après frittage, la densité de l'ébauche peut atteindre 95 % à 98 % et la taille des grains est de 10 à 50 μm . L'équipement doit être équipé d'un système de contrôle de température de haute précision ($\pm 5^\circ\text{C}$) et d'une pompe à vide (pompe mécanique + pompe à diffusion) pour assurer un environnement sans oxygène.

Four de protection de l'atmosphère : tel que le four de frittage d'hydrogène du four électrique Chenhua à Shanghai, en Chine, avec une température de fonctionnement de 2300-2500 °C, un débit d'hydrogène gazeux de 1-2 m^3 / h et un point de rosée de <-40 °C, adapté au frittage de fil de molybdène dopé (tel que le fil de molybdène lanthane). Un blindage en molybdène est utilisé dans le four pour réduire les pertes de rayonnement thermique. La protection de l'atmosphère empêche la volatilisation des éléments dopants et assure des performances stables.

Caractéristiques du processus : le frittage sous vide convient aux ébauches de molybdène pur, et le four de protection d'atmosphère convient au fil de molybdène dopé. Les deux doivent être équipés d'un système de traitement des gaz d'échappement pour traiter l'hydrogène ou les oxydes volatils. Le four de frittage avancé réalise un fonctionnement automatique grâce au contrôle PLC pour réduire les erreurs manuelles.

Impact de l'application : Les ébauches à haute densité réduisent le risque de fissures et de rupture du fil pendant le processus de tréfilage et améliorent le rendement.

6.2.2 Presse à chaud et équipement de forgeage multidirectionnel

Des équipements de pressage à chaud et de forgeage sont utilisés pour compacter davantage l'ébauche frittée, éliminer la porosité et améliorer les propriétés mécaniques.

Presse à chaud : comme la presse à chaud de Sodick au Japon, la pression de travail est de 50-100 MPa, la température est de 1500-1800 °C et le degré de vide est de $<10^{-2}$ Pa. L'équipement adopte un système hydraulique et la précision du contrôle de la pression est de $\pm 0,1$ MPa, ce qui convient à la production d'ébauches à haute densité (>99 %). La presse à chaud doit être équipée de moules en molybdène ou en graphite, qui résistent aux températures élevées et ne polluent pas l'ébauche.

Équipement de forgeage multidirectionnel : tel que la machine de forgeage multidirectionnelle du groupe allemand SMS, la température de forgeage est de 1200-1600°C et le taux de déformation est de 0,1-0,5 s^{-1} . La machine affine les grains (de 50 μm à 20-30 μm) et améliore la ténacité de la billette grâce à un forgeage collaboratif multi-axes. Après le forgeage, la surface de l'ébauche doit être polie pour éliminer le tartre d'oxyde.

Caractéristiques du processus : La presse à chaud convient aux ébauches de petite taille (diamètre < 50 mm), et le forgeage multidirectionnel convient aux barres de grande taille (diamètre 50-100 mm). L'équipement doit être équipé d'un système de refroidissement (refroidi à l'eau ou à l'air) pour

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

contrôler le gradient de température de la billette ($\pm 10^{\circ}\text{C}$). Le système de contrôle automatique peut améliorer l'efficacité de la production de 10 % à 15 %.

Impact sur l'application : Le pressage à chaud et le forgeage peuvent améliorer considérablement la résistance à la traction de l'ébauche (augmentation de 20 % à température ambiante) et la facilité de traitement, fournissant la base du tréfilage ultra-fin.

6.2.3 Laminaires de précision

Les lamineurs de précision sont utilisés pour transformer les ébauches forgées en barres ou en plaques d'un diamètre de 5 à 10 mm, adaptées au tréfilage ultérieur.

Type d'équipement : tel que le lamineur de précision de Kocks en Allemagne, la température de travail est de $1000-1400^{\circ}\text{C}$ et la vitesse de roulement est de 1-5 m / s. La machine est laminée en plusieurs passes (10 % à 15 % de déformation par temps) et est équipée de rouleaux en carbure (dureté HRC 80-90) pour assurer la précision dimensionnelle (tolérance $\pm 0,01$ mm).

Caractéristiques du processus : Le lamineur doit être équipé d'un système de chauffage (chauffage par induction ou chauffage par résistance) pour maintenir la ductilité à haute température de la billette. Des dispositifs de polissage de surface (par exemple des polisseuses à bande) sont utilisés pour éliminer le tartre d'oxyde, et la rugosité est contrôlée à $Ra\ 1-2\ \mu\text{m}$. La ligne de laminage automatisée peut atteindre une production continue et augmenter l'efficacité de 20 %.

Impact de l'application : Le laminage de précision améliore la cohérence dimensionnelle et la qualité de surface de la barre et réduit l'usure de la matrice d'étirage.

6.3 Équipement de tréfilage pour fil de molybdène pour l'éclairage

L'équipement de tréfilage est l'équipement de base pour l'étirement de la tige de molybdène en filament, ce qui implique le tréfilage à plusieurs passes, la conception de matrices, le système de lubrification et le processus de recuit, qui détermine directement la précision dimensionnelle et les propriétés mécaniques du fil de molybdène.

6.3.1 Machine de tréfilage à plusieurs passes et équipement de tréfilage continu

La tréfileuse est utilisée pour étirer la barre en fil de molybdène d'un diamètre de 0,01 à 2 mm, qui est divisé en tréfileuse à plusieurs passes et tréfileuse continue.

Machine d'étirage multi-passes : telle que la série allemande Niehoff MMH, adaptée à l'ébauche (0,5-2 mm de diamètre) et à l'étirage fin (0,05-0,5 mm). L'équipement est équipé de plusieurs jeux de matrices de tréfilage (5-20 passes), chaque fois que le diamètre est réduit de 10 % à 20 %, et la vitesse d'étirage est de 1-5 m / min. La machine à tréfiler utilise un servomoteur pour contrôler la tension ($\pm 0,5$ N) afin d'assurer l'uniformité du fil.

Équipement d'étirage continu : comme la ligne d'étirage continu de Frigerio en Italie, adaptée à l'étirage ultra-fin (diamètre 0,01-0,05 mm). La machine intègre l'emboutissage en plusieurs passes,

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

le recuit et l'enroulement à des vitesses de 0,1 à 0,5 m/min et des tolérances $\pm 0,001$ mm. L'étréage continu peut augmenter l'efficacité de la production jusqu'à 30 %.

Caractéristiques du processus : La machine à tréfiler doit être équipée d'un système de détection de tension en ligne et d'un système d'alarme de fil cassé pour éviter la rupture du fil. Le tréfilage ultra-fin doit être effectué dans un environnement à température constante (20-25°C) pour réduire l'effet de dilatation thermique. L'équipement a un haut degré d'automatisation, ce qui peut réduire les interventions manuelles.

Impact de l'application : L'équipement de tréfilage continu est adapté à la production à grande échelle, avec un rendement de plus de 90 %, et convient au fil de molybdène pour les lampes halogènes et les lampes HID.

6.3.2 Moules et systèmes de lubrification de haute précision

La matrice et le système de lubrification sont au cœur du processus d'étréage, ce qui affecte directement la qualité de surface et la précision dimensionnelle du fil de molybdène.

Moule de haute précision : Le carbure de tungstène (WC) ou le diamant polycristallin (PCD) est utilisé, tel que le moule PCD de Sumitomo au Japon. La tolérance du trou d'outil $\pm 0,001$ mm, l'angle d'entrée est de 8 à 12° et la longueur de la zone réductrice est optimisée pour réduire les contraintes d'étréage. La précision d'ouverture de la matrice d'étréage ultra-fine est de $\pm 0,0005$ mm et la rugosité de surface est de $Ra < 0,05$ μm .

Système de lubrification : un dispositif de pulvérisation automatique (tel que le système allemand Schumag) est utilisé pour pulvériser une émulsion de graphite ou un lubrifiant à base de disulfure de molybdène (MoS_2), avec un coefficient de frottement de 0,1 à 0,2. Des lubrifiants à base d'huile (par exemple le polyéthylène glycol) sont utilisés pour le tréfilage ultrafin, et le débit est contrôlé à 0,1-0,5 L/min. Le système de lubrification doit être équipé d'un dispositif de filtration pour éviter la contamination par des impuretés.

Caractéristiques du processus : Le moule doit être poli et remplacé régulièrement (après un dessin tous les 100 à 200 km) pour assurer la finition de surface. Le système de lubrification assure une couverture uniforme avec un contrôle en boucle fermée et réduit les rayures de surface. L'analyse par éléments finis (FEA) est utilisée pour optimiser la conception de la matrice et améliorer la stabilité de l'emboutissage.

Impact de l'application : L'outillage de haute précision et les systèmes de lubrification peuvent réduire le taux de défauts de surface du fil de molybdène à moins de 0,5 %, ce qui convient aux lampes haute performance telles que les phares automobiles.

6.3.3 Four de recuit et système de contrôle de la température

Le four de recuit est utilisé pour éliminer l'écrouissage pendant le processus d'emboutissage et restaurer la ductilité et la ténacité du fil de molybdène.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Four de recuit : comme le four de recuit continu de Koyo au Japon, la température de fonctionnement est de 800-1300 °C, le débit d'hydrogène est de 0,5-1 m³/h et le point de rosée est de <-40 °C. Des éléments chauffants en molybdène ou en tungstène sont utilisés dans le four et la précision du contrôle de la température est ± 5°C. Le recuit intermédiaire (800-1000°C, maintien pendant 10-30 secondes) est utilisé pour l'emboutissage grossier et fin, et le recuit final (900-1200°C, maintien pendant 5-15 secondes) est utilisé pour optimiser les performances.

Système de contrôle de la température : Le contrôleur PID et le thermocouple (tel que le thermocouple de type K, précision ± 1°C) sont utilisés pour surveiller la température dans le four en temps réel. Le système de refroidissement (refroidi à l'eau ou à l'air) contrôle la vitesse de refroidissement (10-50°C/s) pour éviter la prolifération des grains.

Caractéristiques du processus : Le four de recuit doit être équipé d'un système de surveillance de l'atmosphère en ligne pour garantir la pureté de l'hydrogène. Le four de recuit continu peut réaliser le passage continu du fil, augmentant l'efficacité de 20 %. Le fil de molybdène dopé (tel que le fil de molybdène lanthane) nécessite une température de recuit plus élevée (1000-1300°C) pour assurer la stabilité des éléments dopés.

Impact de l'application : Le processus de recuit précis peut augmenter l'allongement à la rupture du fil de molybdène à 15 % à 20 %, réduire le risque de rupture du fil et convient à la production de fil de molybdène ultra-fin.

6.4 Équipement de traitement de surface pour fil de molybdène pour l'éclairage

L'équipement de traitement de surface est utilisé pour améliorer la finition de surface, la résistance à la corrosion et les propriétés optiques du fil de molybdène, y compris le polissage électrolytique, le nettoyage chimique et le dépôt de revêtement de surface.

6.4.1 Équipement de polissage électrolytique et de nettoyage chimique

L'équipement de polissage électrolytique et de nettoyage chimique est utilisé pour éliminer les oxydes, la graisse et les résidus de tréfilage de la surface du fil de molybdène afin de préparer le fil de molybdène nettoyé.

Équipement de polissage électrolytique : tel que la machine de polissage électrolytique allemande KAMMERER, utilisant de l'électrolyte NaOH (concentration 5 %-10 %), densité de courant de 0,5-2 A/cm², temps de polissage de 10-30 secondes. L'équipement est équipé d'électrodes en acier inoxydable et d'un système de filtration à circulation pour assurer la pureté de l'électrolyte. Après le polissage, la rugosité de surface du fil de molybdène atteint Ra 0,1-0,5 µm et la réflectivité est augmentée à 60 %-70 %.

Équipement de nettoyage chimique : Par exemple, la cuve de décapage de l'usine d'équipement de nettoyage de Nantong en Chine utilise un mélange HNO₃-HF (rapport 3 : 1, concentration 5 % - 10 %), température de nettoyage 40-60 °C, temps 1-3 minutes. L'équipement est équipé d'un revêtement en PTFE et d'un système de traitement des déchets liquides (neutralisation et

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

précipitation), qui répond aux exigences de protection de l'environnement.

Caractéristiques du processus : le polissage électrolytique convient aux fils de molybdène haut de gamme (tels que les lampes HID), et le nettoyage chimique convient à la production à grande échelle. Les deux doivent être équipés d'un système de rinçage à l'eau déminéralisée et de séchage sous vide (100-150°C) pour éviter toute contamination résiduelle. Le système d'élimination des déchets garantit le respect de la directive RoHS.

Impact de l'application : L'équipement de traitement de surface peut améliorer la résistance à la corrosion de l'arc et la conductivité du fil de molybdène, et prolonger la durée de vie de la lampe de 10 % à 20 %.

6.4.2 Équipement de dépôt de revêtement de surface

L'équipement de revêtement de surface est utilisé pour déposer des revêtements anti-oxydation ou résistants à la corrosion (par exemple, alumine Al_2O_3 , siliciure de molybdène $MoSi_2$) afin d'améliorer les performances du fil de molybdène dans des environnements difficiles.

Équipement CVD : tel que le four CVD d'Applied Materials aux États-Unis, avec une température de travail de 800-1200°C et un vide de $<10^{-2}$ Pa. Il est utilisé pour le dépôt de revêtements d'alumine (0,1 à 1 m d'épaisseur) ou de siliciure de molybdène (0,5 à 2 m) à un taux de dépôt de 0,1 à 0,5 m / min. L'équipement est équipé d'un système de contrôle des gaz (contrôle précis du débit de CH_4 , SiH_4 , etc.).

Équipement PVD : tel que l'équipement de pulvérisation magnétron de Leybold en Allemagne, avec une température de travail de 500-800°C, adapté au dépôt de revêtement à haute uniformité. La cible de pulvérisation est du molybdène ou de l'aluminium de haute pureté, et le taux de dépôt est de 0,05 à 0,2 $\mu\text{m}/\text{min}$. L'équipement PVD convient aux fils de molybdène de formes complexes.

Caractéristiques du processus : Le CVD convient aux revêtements épais, le PVD convient aux revêtements minces et à une grande uniformité. L'équipement doit être équipé d'un système de surveillance de l'épaisseur en ligne (par exemple, un oscillateur à cristal de quartz) pour assurer une épaisseur de revêtement constante. L'adhérence du revêtement est vérifiée par un essai de traction (contrainte d'écaillage > 50 MPa).

Impact de l'application : L'équipement de revêtement peut augmenter la température d'oxydation du fil de molybdène à plus de 1500 ° C, ce qui convient aux lampes infrarouges et aux lampes ultraviolettes, et prolonge la durée de vie de 20 % à 30 %.

6.4.3 Équipement d'essai de la qualité de surface

L'équipement d'inspection de la qualité de surface est utilisé pour évaluer la rugosité, les défauts et la qualité du revêtement du fil de molybdène.

Testeur de rugosité de surface : tel que Mitutoyo SJ-410 au Japon, la plage de mesure est R_a 0,01-10 μm et la précision est de $\pm 0,001$ μm . Il est utilisé pour inspecter la qualité de surface du fil de

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

molybdène nettoyé (Ra 0,1-0,5 μm) et du fil de molybdène noir (Ra 0,5-2,0 μm).

Microscope laser : tel que le Zeiss LSM 800 allemand, grossissement 100-1000x, pour la détection des rayures de surface, des fissures et des résidus d'oxyde. L'appareil est équipé d'une fonction d'imagerie 3D permettant d'analyser la topographie de surface.

Caractéristiques du processus : L'équipement d'essai doit être intégré au système de surveillance en ligne de la ligne de production pour restituer les données de qualité de surface en temps réel. L'inspection automatisée peut augmenter l'efficacité de l'inspection jusqu'à 50 %.

Impact de l'application : L'inspection de la qualité de surface peut réduire le taux de défaillance à moins de 0,5 %, garantissant la stabilité de l'arc et les performances optiques du fil de molybdène dans les luminaires.

6.5 Équipement d'essai et de contrôle de la qualité du fil de molybdène pour l'éclairage

L'équipement d'inspection et de contrôle de la qualité est utilisé pour évaluer la microstructure, les propriétés mécaniques, la composition chimique et l'adaptabilité environnementale du fil de molybdène afin de s'assurer que le produit répond aux normes de l'industrie de l'éclairage.

6.5.1 Microscopes (optiques, électroniques) et analyseurs de surface

Les microscopes et les analyseurs de surface sont utilisés pour analyser la microstructure et les propriétés de surface des fils de molybdène.

Microscope optique : tel que le japonais Olympus BX53M, grossissement 50-1000x, pour l'observation de la taille des grains (10-50 μm) et des défauts de surface (tels que les fissures, la porosité). L'équipement est équipé d'un logiciel d'analyse d'images permettant de compter automatiquement la distribution des grains.

Microscopie électronique à balayage (MEB) : par exemple, FEI Quanta 650 aux États-Unis, équipé d'une spectroscopie d'énergie (EDS), pour l'analyse de la distribution des éléments dopés (par exemple, espacement des particules d'oxyde de lanthane de 0,5 à 2 μm) et de la topographie de corrosion de surface. Avec une résolution allant jusqu'à 1 nm, il convient à l'inspection de fils de molybdène ultra-fins.

Analyseurs de surface : tels que XPS (spectroscopie photoélectronique à rayons X) de Bruker, en Allemagne, pour l'analyse de la composition des oxydes de surface (par exemple MoO_2 , MoO_3) et de la chimie du revêtement. La profondeur de détection est de 1 à 10 nm et la précision est de $\pm 0,1$ eV.

Caractéristiques du processus : Le microscope doit être équipé d'un équipement de préparation d'échantillons (tel qu'une machine à polir les ions) pour assurer une surface lisse. Le MEB et le XPS fonctionnent sous ultravide ($<10^{-6}$ Pa) avec un temps de détection de 10 à 30 minutes.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Impact de l'application : L'analyse microscopique peut optimiser la structure du grain et l'uniformité du dopage du fil de molybdène, améliorer les performances à haute température et la résistance à la corrosion.

6.5.2 Machines d'essai de traction et appareils d'essai de dureté

Des machines d'essai de traction et des testeurs de dureté sont utilisés pour évaluer les propriétés mécaniques des fils de molybdène.

Machine d'essai de traction : telle que l'Instron 5982 américain, la plage d'essai est de 0 à 100 kN et la précision est de $\pm 0,5$ %. Il est utilisé pour mesurer la résistance à la traction (800-1000 MPa à température ambiante, 200-400 MPa à 1500°C) et l'allongement à la rupture (10 %-25 %) du fil de molybdène. L'appareil peut simuler des environnements à haute température (jusqu'à 2000°C).

Duromètre : tel que le duromètre allemand Zwick Vickers, la plage d'essai est HV 0,1-1000 et la précision est de $\pm 0,5$ HV. Il est utilisé pour évaluer la dureté de surface du fil de molybdène (environ HV 200-250 pour le fil de molybdène pur et HV 250-300 pour le fil de molybdène dopé).

Caractéristiques du processus : l'essai de traction doit être équipé de dispositifs à haute température et de dispositifs de protection de l'atmosphère (hydrogène ou argon), et l'essai de dureté doit contrôler la profondeur d'indentation ($< 0,01$ mm). Les systèmes de test automatisés peuvent augmenter l'efficacité jusqu'à 20 %.

Impact de l'application : Le test des propriétés mécaniques garantit la stabilité mécanique et la résistance à la fatigue du fil de molybdène dans le luminaire et répond aux exigences des lampes halogènes et HID.

6.5.3 Analyseurs de composition (ICP, XRF)

Les analyseurs de composition sont utilisés pour détecter la composition chimique et la teneur en impuretés des fils de molybdène.

ICP-OES : comme PerkinElmer Optima 8300 aux États-Unis, avec une limite de détection de 0,01 ppm, pour l'analyse des impuretés (par exemple, Fe, Si, C) dans la poudre de molybdène et le fil de molybdène. Le temps de détection est de 5 à 10 minutes et la précision \pm de 0,1 %.

XRF : par exemple, German Bruker S8 Tiger, plage de détection de 0,01 % à 100 %, utilisé pour analyser le contenu et la distribution des éléments dopants (par exemple, La, Re). L'équipement est équipé d'une fonction de contrôle non destructif et convient à la surveillance en ligne.

Caractéristiques du processus : L'ICP doit être dissous dans l'échantillon (solution HNO₃-HF), la XRF est une détection non destructive, adaptée à l'analyse du produit fini. Les deux nécessitent un étalonnage régulier pour garantir la précision de la détection.

Impact de l'application : L'analyse de la composition peut contrôler la teneur en impuretés inférieure

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

à 0,01 % pour garantir la stabilité chimique et les performances électriques du fil de molybdène.

6.5.4 Équipement d'essai de simulation environnementale

L'équipement d'essai de simulation environnementale est utilisé pour évaluer les performances du fil de molybdène dans des environnements à haute température, corrosifs et à l'arc.

Four d'essai à haute température : comme le four à haute température de Nabertherm en Allemagne, la plage de température est de 500 à 2000 °C et la précision est de ± 5 °C, ce qui est utilisé pour simuler l'environnement de travail des lampes et des lanternes (telles que les lampes halogènes 1500 °C). De l'argon ou du gaz halogène peut être introduit dans le four pour tester la résistance à l'oxydation et la résistance à la corrosion.

Équipement d'essai d'arc : tel que le simulateur d'arc de l'Institut de recherche électro-optique de Shanghai en Chine, avec une tension de 1-30 kV et un courant de 0,1-100 A, qui est utilisé pour tester la stabilité de l'arc du fil de molybdène. L'appareil est équipé d'une caméra à grande vitesse qui enregistre les décalages d'arc (<0,1 mm).

Caractéristiques du processus : L'équipement de simulation environnementale doit être équipé d'un système d'acquisition de données pour enregistrer la température, le courant et le taux de corrosion. Le cycle d'essai est de 1 à 100 heures, simulant la durée de vie de la lampe (1000-20 000 heures).

Impact sur l'application : Les tests environnementaux vérifient la fiabilité et la longévité du fil de molybdène dans des applications réelles, garantissant ainsi que les exigences des lampes HID et UV sont respectées.



fil de molybdène pour l'éclairage de CTIA

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire for Lighting Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire for Lighting

As one of the core materials in modern lighting technology, molybdenum wire is widely used in various light sources including incandescent lamps, halogen lamps, fluorescent lamps, and gas discharge lamps, due to its high melting point, high strength, excellent corrosion resistance, and superior electrical conductivity. It is an irreplaceable and critical component in the lighting industry.

2. Typical Applications of Molybdenum Wire for Lighting

Residential and Commercial Lighting: Used in incandescent and halogen lamps to provide warm light and long service life.

Automotive Lighting: Functions as electrodes in HID and xenon lamps, offering high brightness and vibration resistance.

Specialty Lighting: Utilized in projection lamps, ultraviolet (UV) lamps, and infrared (IR) lamps to meet high-temperature and high-precision requirements in medical, industrial, and scientific applications.

Emerging Fields: Serves as conductive leads for LED lamps and supports for phosphors in laser lighting, aligning with future lighting technology development.

3. Basic Data of Molybdenum Wire for Lighting (Reference)

Parameter	Pure Mo Wire	Mo-La Wire	Mo-Re Wire
Mo Content	≥99.95%	≥99.0%	52.5%–86.0%
Diameter Range	0.03–3.2 mm	0.03–1.5 mm	0.03–1.0 mm
Tolerance	±0.002 mm	±0.002 mm	±0.002 mm
Tensile Strength (Room Temp)	800–1200 MPa	900–1400 MPa	1000–1500 MPa
Tensile Strength (at 1500°C)	150–300 MPa	200–400 MPa	250–450 MPa
Elongation at Break	10%–25%	12%–20%	15%–25%
Electrical Resistivity (20°C)	$5.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
Main Applications	Incandescent, Halogen	Halogen, Auto Headlights	HID, Projection Lamps

4. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.molybdenum.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

Chapitre 7 Normes pharmaceutiques et étrangères pour le fil de molybdène pour l'éclairage

En tant que matériau important dans l'industrie de l'éclairage, le fil de molybdène pour l'éclairage a un impact direct sur la fiabilité et la durée de vie des lampes et des lanternes. Afin d'assurer l'uniformité des produits et la compétitivité du marché, une série de normes ont été formulées au pays et à l'étranger, couvrant la composition chimique, la précision dimensionnelle, les propriétés mécaniques et les exigences de protection de l'environnement du fil de molybdène. Ce chapitre aborde en détail les normes nationales, les normes internationales, la comparaison et la conversion entre les normes, les réglementations environnementales et les spécifications de l'industrie et de l'entreprise du fil de molybdène pour l'éclairage, et fournit une analyse technique complète pour répondre aux besoins de l'industrie de l'éclairage en matière de production standardisée en combinaison avec un contenu standard spécifique et des scénarios d'application.

7.1 Normes nationales pour le fil de molybdène pour l'éclairage

En tant que plus grand producteur mondial de fil de molybdène, la Chine a formulé un certain nombre de normes nationales (GB/T) pour réglementer la production et l'application du fil de molybdène. Ces normes spécifient en détail les matières premières, le traitement, les propriétés et les méthodes d'essai du fil de molybdène pour l'éclairage, et conviennent à des applications telles que les lampes à incandescence, les lampes halogènes et les lampes à décharge gazeuse.

7.1.1 GB/T 3462-2017

GB/T 3462-2017 est la norme nationale chinoise pour les barres de molybdène et les dalles de molybdène, qui convient à la production de fil de molybdène pour l'éclairage et fournit une base pour le processus de tréfilage ultérieur.

Champ d'application : La norme stipule la composition chimique, la taille, la qualité de surface et les propriétés mécaniques des barres et des dalles de molybdène, qui conviennent au frittage, au forgeage et au laminage d'ébauches, et sont indirectement utilisés dans la production de fils de molybdène pour l'éclairage.

Exigences techniques :

Composition chimique : teneur en molybdène $\geq 99,95\%$, impuretés totales (telles que Fe, Ni, Si) $< 0,05\%$. Le molybdène dopé (par exemple, molybdène-lanthane) nécessite une teneur en éléments dopants clairs (par exemple, La_2O_3 $0,3\%$ à $1,0\%$).

Précision dimensionnelle : diamètre de la barre de molybdène 5-100 mm, tolérance $\pm 0,05$ mm ; L'épaisseur de la dalle est de 2 à 50 mm et la tolérance $\pm 0,1$ mm.

Qualité de surface : pas de fissures, tartre d'oxyde, rugosité $Ra \leq 3,2 \mu\text{m}$.

Propriétés mécaniques : résistance à la traction (température ambiante) ≥ 600 MPa, allongement à la rupture $\geq 10\%$.

Méthode de détection : La composition chimique est analysée par ICP-OES (spectroscopie à plasma à couplage inductif), les dimensions sont détectées par un télémètre micrométrique ou laser, et la qualité de la surface est vérifiée par une inspection visuelle et microscopique.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Impact de l'application : Les ébauches de fils en molybdène pour lampes nécessitent une densité élevée (densité théorique de ≥ 95 %) et une microstructure uniforme, GB/T 3462-2017 garantit la qualité de l'ébauche et réduit le risque de fracture dans le processus de tréfilage.

7.1.2 GB/T 4191-2015

GB/T 4191-2015 aborde directement les performances et les spécifications du fil de molybdène, et convient à la production et à l'acceptation du fil de molybdène pour l'éclairage.

Champ d'application : La norme couvre les fils de molybdène pur et les fils de molybdène dopé (tels que le fil de molybdène lanthane, le fil de molybdène rhénium) pour les lampes à incandescence, les lampes halogènes, les lampes à décharge de gaz, etc.

Exigences techniques :

Composition chimique : La teneur en molybdène du fil de molybdène pur \geq de 99,95 %, et le fil de molybdène dopé doit être marqué avec la proportion d'éléments dopés (tels que Re 1 % -5 %).

Gamme de tailles : diamètre 0,01-2 mm, tolérances \pm 0,002 mm (ultra-fin) à \pm 0,01 mm (grossier).

Qualité de surface : $Ra \leq 0,5$ μ m de rugosité du fil de molybdène nettoyé, $Ra \leq 2,0$ μ m de fil de molybdène noir, pas de fissures, de rayures ou de résidus d'oxyde.

Propriétés mécaniques : résistance à la traction à température ambiante 800-1200 MPa, résistance à la traction à haute température (1500°C) \geq 200 MPa, allongement à la rupture 10 %-20 %.

Méthode d'essai : La précision dimensionnelle est mesurée par un pied à coulisse laser, les propriétés mécaniques sont mesurées par une machine d'essai de traction et la qualité de surface est détectée par un microscope optique et un rugumètre.

Impact sur l'application : La norme garantit la stabilité mécanique et les propriétés électriques du fil de molybdène dans des environnements à haute température, et convient aux exigences élevées des lampes halogènes et HID.

7.1.3 GB/T 4182-2000

GB/T 4182-2000 stipule la méthode d'analyse de la composition chimique du molybdène et des alliages de molybdène pour garantir la pureté des matières premières et des produits finis du fil de molybdène pour l'éclairage.

Champ d'application : La norme s'applique aux essais de composition chimique de la poudre de molybdène, de la barre de molybdène et du fil de molybdène, y compris les éléments principaux (Mo) et les impuretés (Fe, Ni, Si, C, O, etc.).

Méthodes d'analyse :

ICP-OES : Détection des éléments impuretés, sensibilité de 0,01 ppm, adapté à l'analyse du Fe, du Ni, du Si et d'autres éléments traces.

Analyseur de gaz : détection de la teneur en O, N, H, précision \pm 0,001 %, pour s'assurer que la teneur en oxygène $<$ de 0,005 %.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Méthode gravimétrique et méthode de titrage : détermination de la teneur en molybdène avec une erreur de $\pm 0,01$ %.

Caractéristiques du procédé : L'analyse a été effectuée dans un environnement propre (classe ISO 7) et la préparation de l'échantillon était soluble dans l'acide (mélange HNO₃-HF). La norme exige que l'instrument soit étalonné régulièrement pour assurer des tests cohérents.

Impact sur l'application : L'analyse chimique de haute précision garantit la stabilité chimique du fil de molybdène et empêche la corrosion des joints de grains causée par les impuretés à haute température. La norme est largement utilisée par les institutions chinoises d'essai des métaux non ferreux.

7.1.4 Autres normes nationales pertinentes

En plus des normes ci-dessus, la Chine a également formulé d'autres normes relatives au fil de molybdène pour l'éclairage :

GB/T 3461-2017 « Poudre de molybdène » : spécifie la taille des particules (1-5 μm), la pureté ($\geq 99,95$ %) et la morphologie (sphérique ou presque sphérique) de la poudre de molybdène, qui convient aux matières premières du fil de molybdène pour les lampes.

GB/T 17792-1999 « Méthodes d'inspection pour les produits traités en molybdène et en alliage de molybdène » : méthodes d'essai couvrant la taille, la qualité de surface et les propriétés mécaniques, telles que la détection de défauts par ultrasons et l'inspection par rayons X.

YS/T 357-2006 « Bande de molybdène dopé » : Pour les ébauches de molybdène dopé (tels que le molybdène, le lanthane, le molybdène-rhénium), l'uniformité du contenu et de la distribution des éléments dopés est spécifiée.

Impact sur l'application : Ces normes complètent les exigences des normes GB/T 3462 et GB/T 4191 pour former un système de normalisation complet permettant d'assurer le contrôle de la qualité du fil de molybdène, des matières premières aux produits finis. Les entreprises chinoises peuvent améliorer la compétitivité de leurs produits en suivant une combinaison de plusieurs normes.

7.2 Normes internationales pour le fil de molybdène pour l'éclairage

Les normes internationales fournissent une spécification unifiée pour le commerce mondial et l'application du fil de molybdène pour l'éclairage, couvrant les États-Unis (ASTM), l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et le Japon (JIS) et d'autres systèmes de normes.

7.2.1 Spécification standard ASTM B387 pour les tiges, barres et fils en molybdène et en alliage de molybdène

La norme ASTM B387 est une norme pour le molybdène et les alliages de molybdène développée par l'American Society for Testing and Materials, qui est largement utilisée sur le marché international.

Champ d'application : La norme couvre les tiges, les bandes et les fils de molybdène et d'alliages de

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

molybdène (molybdène pur, molybdène lanthane, molybdène-rhénium) pour l'éclairage, l'électronique et les applications à haute température.

Exigences techniques :

Composition chimique : La teneur en molybdène $\geq 99,95\%$, les impuretés (telles que Fe $< 0,01\%$, Si $< 0,005\%$) sont strictement contrôlées. Pour le dopage au molybdène, le rapport de dopage (par exemple, La₂O₃ 0,3 % à 1,0 %) doit être spécifié.

Précision dimensionnelle : diamètre du fil 0,01-3 mm, tolérance $\pm 0,002$ mm (fil ultrafin) à $\pm 0,015$ mm (fil épais).

Propriétés mécaniques : résistance à la traction à température ambiante 700-1100 MPa, résistance à la traction à haute température (1500°C) ≥ 150 MPa, allongement à la rupture 10 %-25 %.

Qualité de surface : Ra $\leq 0,4$ μm pour le fil de molybdène nettoyé, Ra $\leq 2,5$ μm pour le fil de molybdène noir, pas de fissures ni d'oxydes.

Méthode de détection : La composition chimique adopte ICP-MS, la taille est testée par le pied à coulisse laser, les propriétés mécaniques sont testées par la machine d'essai de traction et la qualité de surface est testée par MEB.

Implications de l'application : La norme ASTM B387 est largement adoptée par les fabricants de luminaires européens et américains pour garantir la fiabilité du fil de molybdène dans les lampes halogènes et HID. Les exigences élevées en matière de normes ont favorisé la mise à niveau technologique des entreprises chinoises.

7.2.2 ISO 22447 Articles en molybdène et en alliage de molybdène

ISO 22447 est une norme pour les produits en molybdène élaborée par l'Organisation internationale de normalisation et applicable au marché mondial.

Champ d'application : La norme couvre les fils, les tiges, les plaques et autres produits en molybdène, et convient aux industries de l'éclairage, de l'aérospatiale et de l'électronique.

Exigences techniques :

Composition chimique : teneur en molybdène $\geq 99,95\%$, teneur totale en impuretés $< 0,05\%$. Le molybdène dopé (par exemple, le molybdène-rhénium) nécessite des proportions élémentaires claires et une uniformité.

Gamme de tailles : diamètre du fil 0,02-2 mm, tolérance $\pm 0,003$ mm.

Propriétés mécaniques : résistance à la traction à température ambiante 750-1200 MPa, résistance à la traction à haute température (1500°C) ≥ 200 MPa.

Qualité de surface : pas de fissures et de porosité en surface, rugosité Ra $\leq 0,5$ μm (fil de molybdène nettoyé).

Méthode de détection : La composition chimique est XRF ou ICP-OES, la taille est passée par un pied à coulisse laser et la qualité de surface est passée par un microscope optique.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Implications pour l'application : La norme ISO 22447 est applicable au niveau international et convient aux entreprises orientées vers l'exportation, garantissant que les produits répondent aux exigences du marché mondial des luminaires.

7.2.3 JIS H 4461

JIS H 4461 est une norme industrielle japonaise pour les exigences de performance et de production du fil de molybdène et de la tige de molybdène.

Champ d'application : La norme s'applique aux fils de molybdène pur et aux fils de molybdène dopé pour l'éclairage et les appareils électroniques.

Exigences techniques :

Composition chimique : teneur en molybdène $\geq 99,95$ %, impuretés (telles que Fe, Ni) $< 0,01$ %.

Précision dimensionnelle : diamètre du fil 0,01-2 mm, tolérance $\pm 0,002$ mm (ultra-fin).

Propriétés mécaniques : résistance à la traction à température ambiante 800-1100 MPa, allongement à la rupture 10 %-20 %.

Qualité de surface : $R_a \leq 0,4$ μm pour le fil de molybdène nettoyé et 2,0 μm pour le \leq de molybdène noir.

Méthode de détection : La composition chimique adopte ICP-OES, la taille passe à travers l'étrier laser et les propriétés mécaniques passent à travers la machine d'essai de traction.

Impact de l'application : JIS H 4461 est largement utilisé par les entreprises d'éclairage japonaises, en particulier pour le fil de molybdène pour les lampes de projection et les phares automobiles. Le marché japonais a des exigences strictes en matière de précision dimensionnelle et de qualité de surface, ce qui a conduit au développement de la technologie de tréfilage de haute précision.

7.2.4 Autres normes ISO

D'autres normes internationales contiennent également des directives pour la production et l'application du fil de molybdène pour l'éclairage :

DIN EN 10204 (Allemagne) : Spécifie les exigences relatives à la certification de la qualité et à la documentation d'inspection du fil de molybdène, qui s'applique aux produits exportés vers le marché européen.

CEI 60357 : Norme de la Commission électrotechnique internationale pour les exigences de performance du fil de molybdène pour les lampes halogènes et à décharge de gaz, telles que la résistance à la corrosion par arc et la fiabilité de l'étanchéité.

ASTM E3171 : Méthodes d'analyse chimique du molybdène et des alliages de molybdène, complétant les exigences de la norme ASTM B387.

Impact sur l'application : Ces normes fournissent une base technique pour le commerce international du fil de molybdène et favorisent la normalisation de la chaîne d'approvisionnement mondiale. Les entreprises européennes et japonaises assurent la compétitivité de leurs produits sur les marchés

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

haut de gamme tels que l'éclairage automobile en suivant une combinaison de plusieurs normes.

7.3 Comparaison et conversion entre différents étalons de fil de molybdène pour l'éclairage

La différence entre les normes nationales et étrangères peut affecter le commerce international et l'application du fil de molybdène pour l'éclairage, et la reconnaissance mutuelle devrait être obtenue par la comparaison et la conversion des paramètres techniques.

7.3.1 Comparaison des paramètres techniques des normes nationales et étrangères (pureté, taille, performance)

Voici une comparaison des paramètres des principaux critères :

Pureté:

GB/T 4191-2015 : teneur en molybdène $\geq 99,95$ %, impuretés $< 0,05$ %.

ASTM B387 : Teneur en molybdène $\geq 99,95$ %, Fe $< 0,01$ %, Si $< 0,005$ %.

ISO 22447 : Teneur en molybdène $\geq 99,95$ %, impuretés $< 0,05$ %.

JIS H 4461 : teneur en molybdène $\geq 99,95$ %, Fe, Ni $< 0,01$ %.

Analyse : Les exigences de pureté des normes nationales et étrangères sont cohérentes, et la norme ASTM B387 est plus stricte pour des impuretés spécifiques (telles que Fe, Si), ce qui convient aux lampes haut de gamme (telles que les lampes HID).

Précision dimensionnelle :

GB/T 4191-2015 : diamètre 0,01-2 mm, tolérance $\pm 0,002$ mm (ultra-fin).

ASTM B387 : Diamètre 0,01-3 mm, tolérances $\pm 0,002$ mm (ultra-fin) à $\pm 0,015$ mm (grossier).

ISO 22447 : Diamètre 0,02-2 mm, tolérance $\pm 0,003$ mm.

JIS H 4461 : diamètre 0,01-2 mm, tolérance $\pm 0,002$ mm.

Analyse : Les modèles JIS H 4461 et GB/T 4191 ont des exigences de tolérance plus élevées pour les filaments ultrafins et conviennent aux lampes de projection et aux lampes UV. La norme ASTM B387 couvre une plus large gamme de diamètres pour s'adapter à un large éventail d'applications.

Propriétés mécaniques :

GB/T 4191-2015 : Résistance à la traction à température ambiante 800-1200 MPa, haute température (1500°C) ≥ 200 MPa.

ASTM B387 : 700-1100 MPa à température ambiante, ≥ 150 MPa à haute température.

ISO 22447 : 750-1200 MPa à température ambiante, ≥ 200 MPa à haute température.

JIS H 4461 : 800-1100 MPa à température ambiante.

Analyse : Les normes GB/T 4191 et ISO 22447 exigent des performances à haute température plus élevées et conviennent aux lampes halogènes et HID. La norme ASTM B387 a une gamme de performances plus large et convient à une variété de scénarios d'application.

7.3.2 Méthodes de conversion standard (par exemple, tolérances, unités de propriétés mécaniques)

Conversion des tolérances : les normes nationales et étrangères sont exprimées en millimètres (mm) et les tolérances sont directement comparées. La tolérance de fil grossier de la norme ASTM B387

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

($\pm 0,015$ mm) peut répondre aux exigences de $\pm 0,01$ mm de GB/T 4191 avec un équipement de tréfilage de haute précision.

Conversion des unités de propriétés mécaniques : la résistance à la traction est exprimée en MPa et l'allongement à la rupture est exprimé en pourcentage (%), ce qui est conforme aux normes nationales et étrangères. La température d'essai à haute température (1500°C) doit être étalonnée uniformément pour garantir que les conditions d'essai sont cohérentes.

Conversion de la composition chimique : La teneur en impuretés est exprimée en pourcentage en masse (%) ou ppm, 1 % = 10 000 ppm. GB/T 4182 et ASTM E3171 sont compatibles entre elles, et les résultats ICP-OES peuvent être directement comparés.

Caractéristiques du processus : La précision de l'équipement de test (par exemple, précision de l'étrier laser $\pm 0,001$ mm) et les normes d'étalonnage doivent être prises en compte lors de la conversion. Les petites différences entre les normes peuvent être compensées par l'optimisation des processus, comme l'ajustement de la température de recuit.

7.3.3 Analyse de la reconnaissance mutuelle entre les normes internationales et les normes nationales

Reconnaissance mutuelle : GB/T 4191-2015 est hautement compatible avec les normes ASTM B387 et ISO 22447 en termes de pureté, de taille et de propriétés mécaniques, et la reconnaissance mutuelle est supérieure à 90 %. JIS H 4461 nécessite des processus de polissage supplémentaires en raison des exigences plus strictes en matière de qualité de surface.

Différences : La norme ASTM B387 a des exigences plus strictes pour des impuretés spécifiques (par exemple, le Fe) et exige des matières premières de haute pureté. GB/T 4191 a des exigences plus élevées pour les tolérances de fil ultra-fines et nécessite un équipement de tréfilage de précision. La polyvalence de la norme ISO 22447 la rend plus acceptable sur le marché mondial.

Impact sur l'application : Les entreprises chinoises peuvent élargir leurs marchés d'exportation (par exemple, l'Europe, les États-Unis) en respectant les normes GB/T et ASTM/ISO. L'analyse de reconnaissance mutuelle permet d'optimiser les processus de production et de réduire les coûts de certification. Plansee en Autriche et H.C. Starck aux États-Unis ont passé la certification multinorme pour garantir l'application universelle des produits.

7.4 Protection de l'environnement et réglementation RoHS du fil de molybdène pour l'éclairage

Les réglementations environnementales ont mis en avant des exigences strictes pour la production et l'application de fil de molybdène pour l'éclairage, impliquant le contrôle des métaux lourds, les émissions de gaz d'échappement et la fabrication écologique.

7.4.1 Exigences de la directive RoHS (UE 2011/65/UE) pour les matériaux en fil de molybdène

La directive RoHS (Restriction of Hazardous Substances) limite les substances dangereuses dans les produits électriques et électroniques, et s'applique au fil de molybdène pour l'éclairage, les lampes et les lanternes.

Exigences : Le fil de molybdène doit limiter 6 substances nocives telles que le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd), etc., avec une teneur de $< 0,1$ % (1000 ppm) et de cadmium $< 0,01$ %

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

(100 ppm). Les impuretés du fil de molybdène (telles que Fe, Ni) doivent être testées par ICP-OES pour garantir la conformité aux exigences RoHS.

Impact sur le processus : une poudre de molybdène de haute pureté ($\geq 99,95$ %) doit être utilisée dans la production pour éviter la pollution des matières premières. Le nettoyage chimique (HNO_3 -HF) et l'électropolissage (NaOH) nécessitent un système d'élimination des déchets pour éviter les émissions de métaux lourds.

Impact sur l'application : Le fil de molybdène conforme à la directive RoHS peut entrer sur le marché de l'UE et est largement utilisé dans les lampes halogènes et les lampes HID. Les fabricants européens de luminaires, tels que Philips, exigent des fournisseurs qu'ils fournissent un certificat de conformité RoHS.

7.4.2 RoHS de la Chine (mesures de contrôle de la pollution par les produits d'information électroniques)

La directive RoHS de la Chine (GB/T 26572-2011) est la norme chinoise pour restreindre l'utilisation des substances dangereuses dans les produits électroniques, similaire à la RoHS de l'UE.

Exigences : Limitez 6 types de substances dangereuses, et les exigences de contenu sont conformes à la directive RoHS de l'UE. Le fil de molybdène doit fournir un rapport d'essai de substance dangereuse, indiquant la période d'utilisation pour la protection de l'environnement (généralement de 10 à 50 ans).

Impact sur le processus : Les fabricants doivent mettre en place un système de gestion des substances dangereuses et utiliser la technologie XRF ou ICP-MS pour détecter les matières premières et les produits finis. Les gaz résiduaires et les déchets liquides doivent être traités par tour d'absorption, neutralisation et précipitation, conformément à la norme GB 25466-2010 (norme d'émission).

Impact sur l'application : La directive RoHS de la Chine a promu la transformation verte du marché de l'éclairage domestique, et les fournisseurs de fils de molybdène doivent fournir des certificats de conformité pour répondre aux besoins de l'éclairage domestique et commercial.

7.4.3 Respect de l'environnement dans la production de fils de molybdène (métaux lourds, émissions de gaz d'échappement)

Contrôle des métaux lourds : La solution de nettoyage (HNO_3 -HF) et l'électrolyte (NaOH) dans la production de fil de molybdène peuvent contenir des traces de métaux lourds (tels que le Cr et le Ni), qui doivent être précipités et filtrés, et la concentration de décharge est de $< 0,1$ mg/L, conformément à la norme GB 8978-1996 (norme de décharge des eaux usées).

Émission de gaz d'échappement : Le processus de réduction et de frittage de l'hydrogène produit une petite quantité de gaz oxyde (tel que le MoO_3), qui doit être traité par la tour d'absorption des gaz de queue (absorption de lessive), et la concentration des émissions est de $< 0,05$ mg/m³, ce qui est conforme à la norme GB 16297-1996 (norme d'émission de polluants atmosphériques).

Caractéristiques du processus : les entreprises doivent être équipées d'équipements de protection de l'environnement (tels qu'un système de neutralisation des déchets liquides, une tour de traitement des gaz résiduels), ce qui augmente les coûts de production d'environ 5 à 10 %. Les systèmes de surveillance automatisés détectent les paramètres d'émission en temps réel pour garantir la conformité.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Impact sur l'application : La conformité environnementale est une condition nécessaire pour entrer sur les marchés européens et américains, et les entreprises chinoises (telles que Jinduicheng Molybdenum) ont amélioré leur compétitivité internationale grâce à la certification environnementale.

7.4.4 Exigences en matière de fabrication écologique et de développement durable

Fabrication écologique : Adopter des équipements à faible consommation d'énergie (tels que des fours de frittage économes en énergie, qui réduisent la consommation d'énergie de 15 %) et une technologie de recyclage des déchets (taux de recyclage allant jusqu'à 30 %) pour réduire la consommation de ressources. Les équipements de séchage par pulvérisation et de tréfilage continu peuvent augmenter l'efficacité de la production de 10 à 20 %.

Durabilité : Promouvoir la transformation de la production de fil de molybdène vers une économie circulaire, comme le recyclage, le tréfilage des fils cassés et le frittage des déchets, et réduire les coûts des matières premières. Les certifications de fabrication écologique, telles que ISO 14001, deviennent un avantage concurrentiel.

Impact sur l'application : la fabrication écologique répond aux exigences de durabilité des clients mondiaux et stimule la croissance de la part des entreprises chinoises sur les marchés haut de gamme tels que l'éclairage automobile.

7.5 Normes de l'industrie et spécifications d'entreprise pour le fil de molybdène pour l'éclairage

En plus des normes nationales et internationales, les associations industrielles et les spécifications internes des entreprises affinent encore les exigences relatives au fil de molybdène pour l'éclairage.

7.5.1 Normes de l'Association chinoise de l'industrie des métaux non ferreux

L'Association chinoise de l'industrie des métaux non ferreux (norme YS/T) a formulé un certain nombre de normes sur le molybdène et les alliages de molybdène, complétant les normes nationales.

YS/T 357-2006 « Doped Molybdenum Strip » : stipule la composition chimique, la taille et les propriétés du molybdène dopé (tel que le molybdène, le lanthane, le molybdène-rhénium), et l'écart d'uniformité des éléments dopés <0,01 %.

YS/T 659-2007 « Méthode d'essai du fil de molybdène » : spécifie la méthode d'analyse XRF et de test mécanique à haute température du fil de molybdène dopé, qui convient au fil de molybdène de lampe.

Impact sur l'application : La norme YS/T accorde plus d'attention aux performances des fils de molybdène dopés et convient aux lampes halogènes et aux lampes HID. Les entreprises chinoises (par exemple, Xiamen Honglu) optimisent le processus de dopage grâce à la norme YS/T afin d'augmenter la valeur ajoutée de leurs produits.

7.5.2 Spécifications internes de l'industrie de l'éclairage

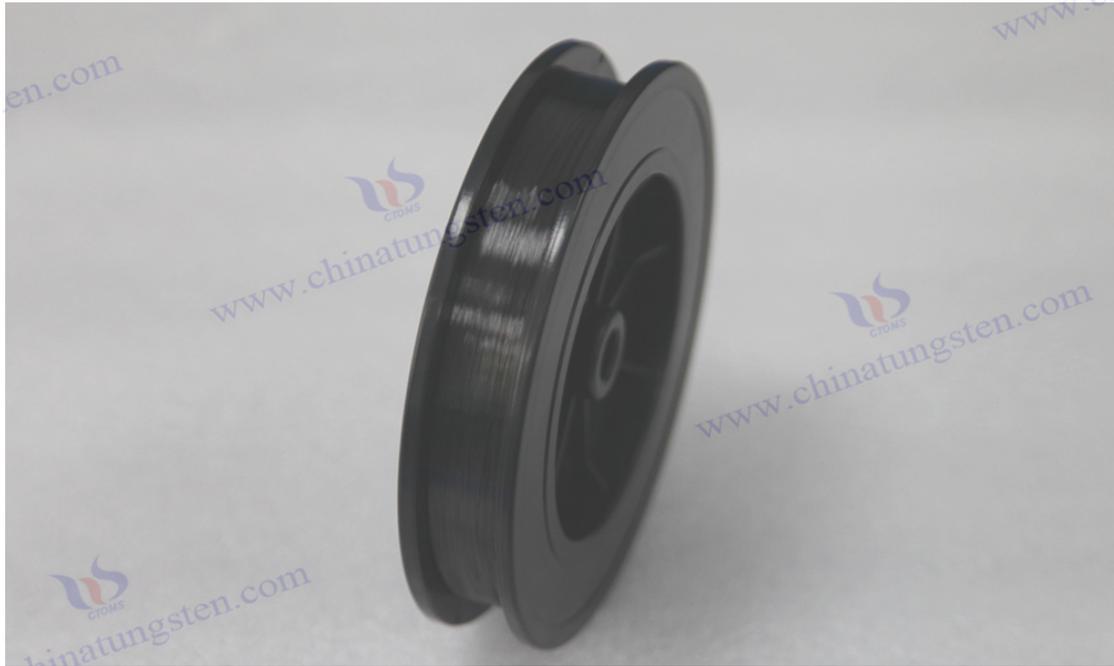
Les spécifications internes de l'industrie de l'éclairage sont élaborées par les fabricants de luminaires et les associations industrielles pour des applications spécifiques du fil de molybdène.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Spécification de la China Lighting Society : La résistance à la corrosion (taux de corrosion $< 0,005$ mg / cm²² ·h) et la stabilité à l'arc (décalage $< 0,1$ mm) du fil de molybdène dans les lampes halogènes sont requises.

La spécification de l'International Institute of Illumination (CIE) spécifie la résistance à la traction à haute température ($1500^{\circ}\text{C} \geq 200$ MPa) et la rugosité de surface ($R_a \leq 0,4$ μm) pour le fil de molybdène pour les lampes HID.

Implications de l'application : Les normes de l'industrie ont conduit à la production personnalisée de fil de molybdène dans des luminaires spécifiques, tels que le fil de molybdène lanthane pour les phares automobiles, qui doivent répondre à des exigences plus strictes en matière de résistance aux vibrations.



fil de molybdène pour l'éclairage de CTIA

Chapitre 8 Technologie de détection du fil de molybdène pour l'éclairage

Les performances du fil de molybdène pour l'éclairage affectent directement la fiabilité, la durée de vie et l'efficacité des appareils d'éclairage, et sa technologie de détection couvre de nombreux aspects tels que la composition chimique, les propriétés physiques, la qualité de surface, les performances à haute température, les propriétés électriques et les tests non destructifs. Ce chapitre aborde en détail les différentes technologies de détection du fil de molybdène pour l'éclairage, analyse les méthodes de détection, les fonctions de l'équipement, la précision et les scénarios d'application, et fournit une explication technique complète basée sur les pratiques technologiques avancées au pays et à l'étranger.

8.1 Essai de composition chimique du fil de molybdène pour l'éclairage

Les tests de composition chimique sont utilisés pour déterminer la pureté ($\geq 99,95$ %) et la teneur en impuretés (telles que Fe, Ni, Si) du fil de molybdène, pour garantir sa stabilité chimique et ses propriétés électriques, et pour répondre aux exigences de l'environnement à haute température des

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

lampes.

8.1.1 Analyse par fluorescence X (XRF)

L'analyse par fluorescence X est une méthode rapide et non destructive pour la détection des composants du fil de molybdène fini et des matières premières.

Principe : Les rayons X excitent les atomes à la surface de l'échantillon pour produire une fluorescence caractéristique, et la teneur en éléments est déterminée par l'analyse spectrale.

Fonction de l'appareil : La portée de détection de l'appareil est de 0,01 % à 100 %, la sensibilité est de 0,01 ppm et le temps d'analyse est de 1 à 5 minutes.

Paramètres techniques :

Éléments détectés : molybdène (Mo), fer (Fe), nickel (Ni), silicium (Si), etc. L'écart de contenu des éléments dopés (tels que La, Re) est de <0,01 %.

Exigences en matière d'échantillon : La surface du fil de molybdène doit être propre, sans oxydes et le diamètre de l'échantillon doit être de 0,01 à 2 mm.

Précision : $\pm 0,01$ % (éléments à haute concentration), $\pm 0,001$ % (oligo-éléments).

Caractéristiques du processus : La technologie XRF est un contrôle non destructif qui convient au contrôle de la qualité en ligne. L'équipement doit être étalonné régulièrement et des échantillons standard sont utilisés pour garantir la précision. L'environnement d'essai doit être propre (classe ISO 7) pour éviter les interférences de poussière.

Impact de l'application : La technologie XRF est largement utilisée pour détecter l'uniformité du dopage du fil de molybdène pour les lampes halogènes et les lampes HID, garantissant la résistance à la corrosion et la stabilité à haute température, avec une efficacité de détection de 98 %.

8.1.2 Spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES)

L'ICP-OES est une méthode très sensible pour l'analyse des composants, adaptée à la détection d'impuretés à l'état de traces.

Principe : Une fois l'échantillon dissous, il est excité par le plasma et un spectre de longueurs d'onde spécifique est émis pour analyser le contenu de l'élément.

Fonction de l'équipement : La limite de détection de l'appareil est de 0,001 ppm et le temps d'analyse est de 5 à 10 minutes.

Paramètres techniques :

Éléments de détection : Fe, Ni, Si, C, O, etc., plage de détection 0,001-1000 ppm.

Préparation de l'échantillon : Le fil de molybdène doit être dissous avec le mélange HNO₃-HF (rapport 3:1) à une température de 60-80°C.

Précision : $\pm 0,1$ % (élément principal), $\pm 0,001$ % (oligo-élément).

Caractéristiques du processus : L'ICP-OES doit être détruit par l'échantillon, qui convient à l'analyse en laboratoire. L'équipement est équipé d'un gaz argon de haute pureté ($\geq 99,999$ %) pour éviter les interférences de fond. Les déchets liquides doivent être neutralisés et traités pour répondre aux

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

normes de rejet des eaux usées.

Impact sur l'application : L'ICP-OES est utilisé pour détecter la teneur en oxygène (<0,005 %) dans le fil de molybdène, assurer la stabilité chimique des lampes à incandescence et des lampes halogènes, et contrôler la teneur en impuretés inférieure à 0,01 %.

8.1.3 Spectroscopie d'absorption atomique (SAA)

L'AAS est utilisé pour détecter des traces d'éléments spécifiques et convient aux impuretés de métaux lourds dans les fils de molybdène.

Principe : Après atomisation, l'échantillon absorbe une longueur d'onde spécifique de la lumière et l'intensité d'absorption est analysée pour déterminer la teneur en éléments.

Caractéristiques de l'appareil : L'appareil a une limite de détection de 0,01 ppm et un temps d'analyse de 3 à 5 minutes/élément.

Paramètres techniques :

Éléments de détection : Fe, Ni, Cr, Pb, etc., plage de détection 0,01-100 ppm.

Préparation de l'échantillon : Fil de molybdène dissous dans un mélange HNO₃-HCl (rapport 1:3) à 50-70 °C.

Précision : ±0,05 % (oligo-éléments).

Caractéristiques du procédé : L'AAS est une analyse monoélément, adaptée à la détection ciblée (par exemple, Pb<0,01 % pour se conformer à la directive RoHS). L'équipement doit être équipé d'une lampe à cathode creuse et remplacé régulièrement. L'élimination des déchets liquides doit répondre aux exigences de protection de l'environnement.

Implications de l'application : L'AAS est utilisé pour vérifier la conformité RoHS du fil de molybdène et répondre aux exigences du marché de l'UE pour le fil de molybdène pour les phares automobiles.

8.2 Essai des propriétés physiques du fil de molybdène pour l'éclairage

Les tests de propriétés physiques évaluent la taille, la densité et les propriétés mécaniques du fil de molybdène pour s'assurer qu'il répond aux exigences mécaniques et structurelles du luminaire.

8.2.1 Mesure dimensionnelle et de tolérance (micrométrie laser, microscopie)

La taille et la tolérance affectent directement les propriétés électriques et la fiabilité d'étanchéité du fil de molybdène.

Micromètre laser :

Fonction de l'appareil : plage de mesure 0,005-2 mm, précision ± 0,0001 mm.

Principe : Le faisceau laser balaie le fil de molybdène et calcule le diamètre et la circularité.

Paramètres techniques : contrôle de tolérance ± 0,002 mm (fil ultra-fin), vitesse de mesure 1-10 m/min, adapté à l'inspection en ligne.

Caractéristiques du processus : L'équipement a besoin d'un environnement à température constante

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

(20-25 °C) pour éviter les erreurs de dilatation thermique. Le micromètre en ligne peut être intégré à la machine à tréfiler pour surveiller la cohérence du diamètre en temps réel.

Microscopie optique :

Fonction de l'appareil : grossissement 50-1000 fois, précision $\pm 0,001$ mm.

Principe : Le diamètre du fil de molybdène et la topographie de surface sont mesurés par imagerie haute résolution.

Paramètres techniques : adapté à l'inspection hors ligne, plage de mesure 0,01-2 mm, vérification des tolérances $\pm 0,002$ mm.

Caractéristiques du processus : coupe et polissage de l'échantillon, temps de détection 5-10 minutes. Le logiciel d'analyse d'images calcule automatiquement la répartition des tailles.

Impact de l'application : Le micromètre laser est utilisé pour le contrôle de la production de fils de molybdène ultra-fins (0,01-0,05 mm de diamètre), et le microscope est utilisé pour la R&D et l'analyse des défaillances, répondant aux normes GB/T 4191-2015 et ASTM B387.

8.2.2 Essais de masse volumique et analyse de la qualité

Le test de densité évalue la densité du fil de molybdène, qui reflète indirectement la porosité et la teneur en inclusions.

Fonction de l'équipement : Basé sur le principe d'Archimède, la précision $\pm 0,001$ g/cm³.

Paramètres techniques :

La masse volumique théorique du molybdène est de 10,22 g/cm³ et la masse volumique mesurée est de $\geq 9,8$ g/cm³ (masse volumique ≥ 96 %).

Exigences de l'échantillon : longueur du fil de molybdène 10-50 mm, surface propre.

Caractéristiques du processus : Le test nécessite de l'éthanol de haute pureté (densité 0,789 g/cm³) comme solution d'immersion, et la température est contrôlée à 20°C. L'équipement doit être étalonné régulièrement et des échantillons standard sont utilisés.

Impact de l'application : Le fil de molybdène haute densité réduit la volatilisation stomatique à haute température, prolonge la durée de vie des lampes halogènes et des lampes HID.

8.2.3 Essais de résistance à la traction, de ductilité et de dureté

L'essai des propriétés mécaniques évalue la stabilité mécanique du fil de molybdène à température ambiante et à haute température.

Essai de traction :

Fonction de l'appareil : plage de test 0-100 kN, précision $\pm 0,5$ %.

Paramètres techniques : résistance à la traction à température ambiante 800-1200 MPa, allongement à la rupture 10 %-25 % ; Haute température (1500°C) résistance à la traction 200-400 MPa.

Caractéristiques du processus : L'essai à haute température doit être équipé d'un four de protection contre l'hydrogène (point de rosée < -40 °C) et le matériau de fixation est en molybdène ou en tungstène. Vitesse d'essai 0,1-1 mm/min.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Essai de dureté :

Fonction de l'appareil : plage de test HV 0,1-1000, précision $\pm 0,5$ HV.

Paramètres techniques : fil de molybdène pur HV 200-250, fil de molybdène dopé HV 250-300, profondeur d'indentation $< 0,01$ mm.

Caractéristiques du processus : la surface de l'échantillon doit être polie, la force d'essai est de 0,1 à 0,5 N et le temps de maintien est de 10 secondes.

Impact de l'application : Les essais de traction et de dureté garantissent la fiabilité mécanique du filament de molybdène dans les supports de filament et les électrodes, répondant ainsi aux exigences des phares et des lampes de projection automobiles.

8.3 Contrôle de la qualité de surface du fil de molybdène pour l'éclairage

La qualité de surface affecte la stabilité de l'arc, la résistance à la corrosion et les propriétés optiques du fil de molybdène, qui doivent être évaluées par microscopie et des techniques de détection des défauts.

8.3.1 Microscope optique et rugosité de surface

Les microscopes optiques et les rugomètres sont utilisés pour évaluer la surface, la topographie et la finition des fils de molybdène.

Microscopie optique :

Fonction de l'appareil : grossissement 50-1000x, précision $\pm 0,001$ μm .

Paramètres techniques : Détection des rayures, des fissures et des oxydes avec une résolution d'image de 0,1 μm .

Caractéristiques du processus : un polissage de l'échantillon est nécessaire, équipé d'un logiciel d'analyse d'images, et le nombre de défauts est automatiquement compté. Le temps de détection est de 5 à 10 minutes.

Testeur de rugosité de surface :

Fonction de l'appareil : plage de mesure Ra 0,01-10 μm , précision $\pm 0,001$ μm .

Paramètres techniques : fil de molybdène nettoyé Ra 0,1-0,5 μm , fil de molybdène noir Ra 0,5-2,0 μm .

Caractéristiques du processus : mesure de la sonde de contact, rayon de la sonde 2 μm , vitesse de déplacement 0,5 mm/s. L'inspection en ligne peut être intégrée à un équipement de polissage.

Impact de l'application : Le fil de molybdène de haute finition (Ra $<0,4$ μm) améliore la stabilité de l'arc, convient aux lampes HID et aux lampes UV, et contrôle le taux de défauts de surface $< 0,5$ %.

8.3.2 Microscopie électronique à balayage (MEB) et spectroscopie d'énergie (EDS)

Le MEB et l'EDS sont utilisés pour l'analyse de la topographie et de la composition de surface à haute résolution.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

SANS:

Caractéristiques de l'appareil : résolution 1 nm, grossissement 100-100 000x.

Paramètres techniques : détection des fissures de surface, de la porosité et de la topographie de corrosion, adapté aux fils de molybdène ultra-fins (diamètre 0,01-0,05 mm).

Caractéristiques du procédé : Un environnement de vide ($<10^{-6}$ Pa) est nécessaire et un revêtement conducteur (par exemple, un film de carbone) est nécessaire à la surface de l'échantillon. Capacités d'imagerie 3D pour analyser la topographie de surface.

EDS:

Paramètres techniques : détection de la distribution des éléments dopés (par exemple, La, Re), précision $\pm 0,1$ %, profondeur de détection 1-2 μm .

Caractéristiques du procédé : intégré au MEB pour analyser l'uniformité du dopage (espacement des particules de 0,5 à 2 μm). Temps de détection 10-20 minutes.

Implications pour l'application : Le SEM-EDS est utilisé pour l'analyse des défaillances (par exemple, la corrosion des électrodes de lampe halogène), pour optimiser le processus de dopage et pour améliorer les performances du fil de molybdène lanthane.

8.3.3 Technologie de détection des défauts de surface

La technologie de détection des défauts de surface est utilisée pour identifier les fissures et les inclusions microscopiques.

Microscope à balayage laser :

Caractéristiques de l'appareil : résolution 0,1 μm , profondeur d'imagerie 3D 10-100 μm .

Paramètres techniques : Détection des rayures, fissures et oxydes, taille du défaut $> 0,5$ μm .

Caractéristiques du processus : détection sans contact, adapté au contrôle qualité en ligne. La vitesse de détection est de 1 à 5 m/min.

Systèmes de vision automatisés :

Caractéristiques de l'appareil : Équipé d'une caméra CCD haute résolution d'une résolution de 0,01 μm .

Paramètres techniques : Le taux de détection des défauts de surface est de $<0,5$ %, ce qui convient à la production à grande échelle.

Caractéristiques du processus : intégré au tréfilage, retour en temps réel de la localisation des défauts, efficacité augmentée de 50 %.

Impact sur l'application : La technologie de détection des défauts réduit le taux de défaillance, répond aux exigences strictes des lampes de projection et des phares automobiles, et le taux de rendement atteint 98 %.

8.4 Test de performance à haute température du fil de molybdène pour l'éclairage

Le test de performance à haute température évalue la stabilité du fil de molybdène dans l'environnement de travail (1500-3000°C) du luminaire, couvrant la résistance à l'oxydation, les

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

cycles thermiques et les propriétés mécaniques.

8.4.1 Essai de résistance à l'oxydation à haute température et de stabilité thermique

Le test antioxydant évalue la stabilité chimique du fil de molybdène à haute température.

Fonction de l'équipement : plage de température 500-2000°C, précision $\pm 5^\circ\text{C}$.

Paramètres techniques :

Conditions d'essai : protection contre l'argon ou l'hydrogène (point de rosée $< -40^\circ\text{C}$), température 1500-1800°C, conservation de la chaleur 1-100 heures.

Indice : Gain de poids oxydatif $< 0,01 \text{ mg/cm}^2$, pas de volatilisation MoO_3 en surface.

Caractéristiques du processus : Il doit être équipé d'un système de traitement des gaz d'échappement (absorption des alcalis) pour traiter les oxydes volatils. La surface de l'échantillon doit être polie ($R_a < 0,5 \mu\text{m}$) pour réduire le point d'initiation de l'oxydation.

Impact de l'application : La performance antioxydante garantit la stabilité chimique du fil de molybdène dans les lampes à incandescence et les lampes halogènes, et prolonge la durée de vie de 10 à 20 %.

8.4.2 Essais de résistance aux cycles thermiques et au fluage

Les tests de résistance au cyclage thermique et au fluage évaluent la stabilité du fil de molybdène sous des changements de température et des températures élevées sur de longues périodes.

Test de cyclage thermique :

Fonction de l'équipement : plage de température -40°C à 800°C , cadence 10-20°C/min.

Paramètres techniques : 100-1000 cycles, détection des fissures et des défaillances d'étanchéité.

Caractéristiques du processus : Simulez le processus de commutation des lampes et des lanternes, et testez l'adaptation de la dilatation thermique de la partie d'étanchéité (fil de molybdène-verre).

Test de résistance au fluage :

Fonction de l'équipement : température 1500-1800°C, contrainte 50-200 MPa.

Paramètres techniques : taux de fluage $< 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (fil de molybdène lanthane), temps d'essai 100-1000 heures.

Caractéristiques du processus : une protection contre l'hydrogène est nécessaire et le matériau de la fixation est du molybdène ou du tungstène. Le taux de fluage est mesuré par un capteur de déplacement avec une précision de $\pm 0,001 \text{ mm}$.

Impact de l'application : Le test de cyclage thermique garantit la fiabilité du fil de molybdène dans les phares automobiles, et le test de résistance au fluage optimise le fil de molybdène dopé (tel que le fil de molybdène lanthane) pour prolonger la durée de vie des lampes HID.

8.4.3 Essai des propriétés mécaniques à haute température

Des essais mécaniques à haute température évaluent les propriétés mécaniques du fil de molybdène à la température de fonctionnement du luminaire.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Fonction de l'équipement : plage de température 500-2000°C, précision $\pm 0,5$ %.

Paramètres techniques :

Conditions d'essai : 1500°C, protection contre l'hydrogène, vitesse de traction 0,1-1 mm/min.

Indice : résistance à la traction 200-400 MPa, allongement à la rupture 5 %-15 %.

Caractéristiques du processus : Il doit être équipé de dispositifs à haute température (matériau en molybdène ou tungstène) et d'un système de contrôle de l'atmosphère (argon ou hydrogène, pureté $\geq 99,999$ %). Les données d'essai sont enregistrées par jauge de contrainte (précision $\pm 0,01$ %).

Impact de l'application : Le test des propriétés mécaniques à haute température garantit la stabilité mécanique du fil de molybdène dans les lampes halogènes et les lampes infrarouges, et répond aux exigences des normes ASTM B387 et GB/T 4191-2015.

8.5 Essai de performance électrique du fil de molybdène pour l'éclairage

Le test de performance électrique évalue la conductivité et la stabilité de l'arc du fil de molybdène, ce qui affecte l'efficacité lumineuse et la durée de vie du luminaire.

8.5.1 Essais de résistivité et de conductivité

Le test de résistivité évalue la conductivité électrique du fil de molybdène.

Fonction de l'appareil : Testeur à quatre sondes, plage de mesure 10^{-8} - 10^6 $\Omega \cdot m$, précision $\pm 0,01$ %.

Paramètres techniques :

Résistivité : Fil de molybdène pur $5,5 \times 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$ (20 °C), fil de molybdène dopé légèrement plus élevé ($6-7 \times 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$).

Conditions d'essai : longueur de l'échantillon 50-100 mm, courant 1-10 mA.

Caractéristiques du processus : un environnement à température constante (20°C) est nécessaire et la sonde de contact est en or ou en tungstène pour éviter la résistance de contact. Les résultats des tests sont calculés par la loi d'Ohm.

Impact de l'application : Le fil de molybdène à faible résistivité réduit les pertes de chaleur par effet Joule et améliore l'efficacité énergétique des lampes à incandescence et halogènes.

8.5.2 Analyse du coefficient de température et de la stabilité de l'arc

Le coefficient de température et la stabilité de l'arc affectent les performances du fil de molybdène dans un environnement d'arc à haute température.

Test du coefficient de température :

Fonction de l'équipement : plage de température 20-1500°C, précision $\pm 0,1$ %.

Paramètres techniques : coefficient de température de résistance du fil de molybdène $4,5 \times 10^{-3}/^{\circ}C$ (20-1000°C).

Caractéristiques du processus : Le test nécessite une protection contre l'hydrogène et l'échantillon est fixé dans un dispositif en céramique. La résistance en fonction de la température est mesurée par la méthode des quatre sondes.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Essai de stabilité de l'arc :

Fonction de l'appareil : tension 1-30 kV, courant 0,1-100 A.

Paramètres techniques : décalage de l'arc < 0,1 mm, taux de corrosion des électrodes < 0,01 mg/cm²·h.

Caractéristiques du processus : Équipé d'une caméra haute vitesse (1000 fps) pour enregistrer la trajectoire de l'arc. Le test simule l'environnement de travail de la lampe HID (centre d'arc de 6000°C).

Implications pour l'application : Les tests de stabilité de l'arc optimisent la qualité de surface des fils de molybdène (Ra<0,4 µm) et améliorent l'efficacité lumineuse des lampes HID et au xénon.

8.5.3 Essai de performance électrique à haute température

Des tests électriques à haute température évaluent la conductivité du fil de molybdène à la température de fonctionnement du luminaire.

Fonction de l'équipement : analyseur de semi-conducteurs, plage de température 500-1500°C, précision ±0,01 %.

Paramètres techniques :

Résistivité : env. $2,5 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ à 1500°C.

Conditions d'essai : Protection contre l'hydrogène, courant 0,1-1 A.

Caractéristiques du processus : un dispositif à haute température (matériau en molybdène ou en tungstène) et un système de contrôle de l'atmosphère sont nécessaires. Les données de test sont analysées en enregistrant la variation de résistance en temps réel.

Impact de l'application : Les tests électriques à haute température garantissent la stabilité de la conductivité du fil de molybdène dans les lampes halogènes et les lampes de projection pour répondre aux exigences JIS H 4461.

8.6 Contrôle non destructif du fil de molybdène pour l'éclairage

Les essais non destructifs (CND) sont utilisés pour évaluer les défauts internes et l'intégrité structurelle des fils de molybdène sans affecter leurs performances d'utilisation.

8.6.1 Technologie de détection des défauts par ultrasons

La détection des défauts par ultrasons détecte la porosité et les inclusions à l'intérieur du fil de molybdène.

Fonction de l'appareil : fréquence 5-20 MHz, précision ± 0,01 mm.

Paramètres techniques :

Plage de détection : diamètre 0,05-2 mm, taille du défaut > 0,01 mm.

Sensibilité : détecte les stomates et les inclusions, et l'intensité du signal réfléchi > 10 %.

Caractéristiques du processus : nécessite un couplant d'eau, diamètre de la sonde 2-5 mm. La vitesse de détection est de 1 à 5 m/min, ce qui convient à l'inspection en ligne.

Impact sur l'application : la détection des défauts par ultrasons améliore la qualité interne du fil de

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

molybdène, réduit le risque de défaillance de l'électrode de la lampe HID et le taux de détection des défauts atteint 95 %.

8.6.2 Détection des défauts aux rayons X et tomodensitométrie

La détection des défauts par rayons X et la tomodensitométrie sont utilisées pour détecter de minuscules défauts à l'intérieur et à la surface des fils de molybdène.

Détection des défauts par rayons X :

Fonction de l'appareil : tension 50-225 kV, résolution 1 μm .

Paramètres techniques : Détection de fissures, porosité, taille du défaut > 0,005 mm.

Caractéristiques du processus : l'échantillon doit être tourné et le temps d'imagerie est de 5 à 10 minutes. Convient pour l'inspection hors ligne.

Scanner:

Fonction de l'appareil : résolution 0,5 μm , précision de reconstruction 3D $\pm 0,001$ mm.

Paramètres techniques : Détection des inclusions internes et des défauts de joints de grains, adapté aux fils de molybdène ultra-fins.

Caractéristiques du processus : un environnement de vide poussé est requis et le temps de balayage est de 10 à 30 minutes. Reconstruction 3D pour analyser la distribution des défauts.

Implications pour l'application : Les radiographies et les tomodensitogrammes sont utilisés pour les fils de molybdène haut de gamme (par exemple pour les lampes de projection) afin de garantir l'absence de défauts internes et d'améliorer la fiabilité.

8.6.3 Magnétoscopie et courants de Toncault

L'analyse par magnétoscopie et par courants de Révolution est utilisée pour le dépistage rapide des défauts de surface et près de la surface.

Inspection par magnétoscopie :

Fonction de l'appareil : intensité du champ magnétique 0,1-1 T, sensibilité 0,01 mm.

Paramètres techniques : Détection des fissures et des rayures de surface, adapté aux fils de molybdène d'un diamètre de >0,1 mm.

Caractéristiques du processus : une suspension de poudre magnétique (fluorescente ou non fluorescente) est nécessaire et le temps de détection est de 1 à 3 minutes. Uniquement pour les inclusions ferromagnétiques.

Essais par courants de Foucault :

Fonction de l'appareil : fréquence 10 kHz-10 MHz, sensibilité 0,01 mm.

Paramètres techniques : détection des fissures de surface et près de la surface, adapté à l'inspection en ligne, vitesse 1-10 m/min.

Caractéristiques du processus : La bobine doit être calibrée pour détecter les interférences de revêtement non conducteur ou de couche d'oxyde. Le système d'automatisation augmente l'efficacité de 50 %.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Implications d'application : L'essai par courants de Foucault est utilisé pour la production de masse, l'essai par magnétoscopie est utilisé pour l'analyse des défaillances, garantissant la qualité de surface du fil de molybdène dans les phares automobiles.



fil de molybdène pour l'éclairage de CTIA

Chapitre 9 La tendance future du développement du fil de molybdène pour l'éclairage

En tant que matériau important dans l'industrie de l'éclairage, le fil de molybdène pour l'éclairage est confronté à des changements rapides dans la technologie des nouveaux matériaux, la mise à niveau des processus de production, la concurrence des matériaux alternatifs et la demande du marché. Ce chapitre discutera de la tendance future du développement du fil de molybdène pour l'éclairage dans les nouvelles technologies de dopage, les processus de production intelligents et écologiques, la recherche et le développement de matériaux alternatifs et l'expansion du marché et des applications, et fournira une analyse prospective basée sur les progrès technologiques mondiaux et les tendances de l'industrie.

9.1 Nouveaux matériaux et technologies de dopage

Les progrès réalisés dans le domaine des nouveaux matériaux et des technologies de dopage amélioreront les performances du fil de molybdène pour l'éclairage afin de répondre aux besoins des applications d'éclairage plus exigeantes, telles que la stabilité à haute température, la résistance à la corrosion et les propriétés électriques.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

9.1.1 Exploration de nouveaux éléments dopés (par exemple, terres rares, métaux précieux).

La technologie de dopage améliore considérablement la résistance à haute température, la résistance au fluage et la résistance à la corrosion du fil de molybdène en introduisant des éléments de terres rares ou de métaux précieux.

Tendances technologiques : La recherche se concentre sur de nouveaux éléments dopés tels que le cérium (Ce), l'yttrium (Y), le rhénium (Re) et le platine (Pt). Les éléments de terres rares (par exemple, CeO₂, dopage 0,2 % à 1,0 %) affinent les grains (taille de grain de 20 µm à 10 µm) et augmentent la résistance à la traction (augmentation de 20 % à 1500°C). Les métaux précieux (par exemple, Re, dopage 1 % à 5 %) améliorent la résistance à la corrosion par arc, réduisent le taux de corrosion de 30 % et conviennent aux lampes à décharge à haute intensité (HID).

Caractéristiques du processus : dopage humide combiné à la technologie de séchage par atomisation pour assurer une répartition uniforme des éléments dopés (écart < 0,01 %). Le frittage à haute température (2000-2300°C) nécessite un contrôle précis de l'atmosphère (hydrogène, point de rosée < -40°C) pour éviter la volatilisation des éléments.

Défis et perspectives : Le coût des nouveaux éléments dopants est élevé (par exemple, Re est 10 fois supérieur à celui du molybdène) et la quantité de dopage doit être optimisée pour équilibrer les performances et les coûts. Au cours des 5 à 10 prochaines années, le fil de molybdène dopé aux terres rares devrait représenter 20 % de la part de marché des phares et des lampes de projection automobiles haut de gamme.

Impact sur l'application : Le nouveau fil de molybdène dopé prolongera la durée de vie de la lampe (30 % à 50 %) et répondra aux besoins d'éclairage haute luminosité et longue durée.

9.1.2 R-D et application du fil de molybdène à l'échelle nanométrique

Le fil de molybdène à l'échelle nanométrique (<0,01 mm de diamètre) est optimisé par la nanostructure pour améliorer les propriétés mécaniques et électriques.

Tendances technologiques : Préparation de filaments de molybdène d'un diamètre de 5 à 10 nm par technologie de nano-emboutissage et dépôt chimique en phase vapeur (CVD). La nanostructure peut améliorer la résistance à la traction (jusqu'à 1500 MPa à température ambiante) et l'allongement à la rupture (15 %). Le nanotraitement de surface (par exemple, dépôt d'un revêtement Al₂O₃, épaisseur 50-100 nm) améliore la résistance à l'oxydation et le gain de poids oxydatif < 0,005 mg/cm².

Caractéristiques du procédé : un équipement de tréfilage de très haute précision (tolérance ± 0,0005 mm) et des moules à l'échelle nanométrique (précision d'ouverture ± 0,001 µm) sont nécessaires. Le procédé de recuit (900-1100°C, protection hydrogène) permet d'optimiser la taille des grains (<100 nm).

Défis et perspectives : Le coût de l'équipement de tréfilage nano est élevé et le taux de rendement

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

est faible (environ 70 %). Au cours des 10 prochaines années, avec les progrès de la technologie de fabrication de précision, le fil de molybdène à l'échelle nanométrique devrait être utilisé dans les lampes miniaturisées (telles que l'éclairage médical), avec une part de marché estimée à 10 %.

Implications de l'application : Le fil de molybdène à l'échelle nanométrique convient à l'éclairage de haute précision (par exemple, la projection laser) afin d'améliorer la stabilité de l'arc et les performances optiques.

9.1.3 Composites et alliages à base de molybdène

Les composites et alliages à matrice de molybdène élargissent la gamme d'applications du fil de molybdène en les combinant avec d'autres matériaux à haute température.

Tendances technologiques : Développement de composites molybdène-tungstène (Mo-W), molybdène-céramique (par exemple, Mo-ZrO₂) et molybdène-nanotubes de carbone (CNT). L'alliage Mo-W (teneur en 10 % à 30 % en W) augmente le point de fusion (jusqu'à 2800 °C) et la résistance au fluage (taux de fluage <math><10^{-7}</math> s⁻¹). Les composites Mo-ZrO₂ améliorent la résistance à l'oxydation et conviennent aux lampes infrarouges.

Caractéristiques du procédé : métallurgie des poudres combinée au frittage plasma (température 2000-2200 °C, pression 50 MPa) pour préparer des ébauches composites. Les composites nécessitent une distribution de phase contrôlée avec précision (écart < 0,1 µm) pour garantir l'uniformité des propriétés mécaniques.

Défis et perspectives : Les composites sont difficiles à usiner et leur coût augmente de 20 à 30 %. Au cours des 5 à 10 prochaines années, l'alliage Mo-W devrait remplacer une partie du fil de molybdène pur, représentant 15 % du marché du fil de molybdène de lampe.

Impact sur l'application : Les composites améliorent la fiabilité du fil de molybdène dans des environnements extrêmes (tels que les lampes ultraviolettes, les fours à haute température) et répondent aux besoins d'éclairage spéciaux.

9.2 Processus de production intelligent et vert

Des processus de production intelligents et écologiques amélioreront l'efficacité de la production, l'uniformité de la qualité et la durabilité environnementale du fil de molybdène pour l'éclairage.

9.2.1 Fabrication intelligente et technologies de l'industrie 4.0

La fabrication intelligente optimise la production de fils de molybdène grâce à l'automatisation, à l'analyse des données et à l'Internet des objets (IoT).

Tendances technologiques : Adoption des technologies de l'industrie 4.0 telles que les systèmes de surveillance en ligne, l'intelligence artificielle (IA) et l'analyse des mégadonnées. Le pied à coulisse laser en ligne (précision ±0,001 mm) surveille le diamètre du fil de molybdène en temps réel, et l'algorithme d'IA prédit le risque de rupture du fil (taux de précision > 95 %). L'IIoT intègre des

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

équipements de dessin, de recuit et d'inspection pour automatiser l'ensemble du processus.

Caractéristiques du processus : La machine de tréfilage intelligente contrôle la tension ($\pm 0,5$ N) par le biais du servomoteur, ce qui réduit le taux de rupture du fil de 10 %. La technologie du jumeau numérique simule le processus de frittage et de tréfilage, optimise les paramètres du processus (température, vitesse) et augmente le taux de rendement à 98 %.

Défis et perspectives : L'investissement initial des appareils intelligents est élevé (représentant environ 30 % du coût total), mais il peut réduire les coûts de main-d'œuvre de 20 %. Au cours des 5 prochaines années, la fabrication intelligente devrait être popularisée dans les entreprises chinoises de fil de molybdène, et l'efficacité de la production sera augmentée de 15 % à 20 %.

Impact sur l'application : la production intelligente garantit la cohérence dimensionnelle et la stabilité des performances du fil de molybdène, et répond aux exigences de haute précision des lampes haut de gamme (telles que les lampes HID).

9.2.2 Procédés de production écologiques et recyclage des déchets

La production verte réduit l'impact environnemental grâce au recyclage des déchets et à des processus respectueux de l'environnement.

Tendances technologiques : Développement de systèmes de recyclage en boucle fermée pour la récupération des fils cassés broyés et des déchets frittés (récupération de 30 à 40 %). Les déchets liquides de nettoyage chimique sont neutralisés et précipités, et le rejet de métaux lourds $< 0,1$ mg/L, ce qui répond à la norme de rejet des eaux usées. Le système de traitement des gaz d'échappement (absorption caustique) contrôle les émissions d'oxydes $< 0,05$ mg/m³.

Caractéristiques du processus : L'utilisation de lubrifiants peu volatils (tels que les lubrifiants à base d'eau) pour réduire les émissions de COV dans le processus d'étirage (50 %). Les déchets sont reproduits à partir de poudre de molybdène par réduction de l'hydrogène (température 800-1000°C), ce qui réduit le coût de 10 %.

Défis et perspectives : Le recyclage des équipements nécessite un investissement initial élevé, et l'efficacité du recyclage est limitée par la pureté des déchets. Au cours des 10 prochaines années, la production verte deviendra la norme de l'industrie, conformément aux exigences RoHS et ISO 14001.

Impact de l'application : La technologie verte améliore l'image environnementale de l'entreprise et répond aux besoins de conformité des marchés européens et américains (tels que l'éclairage automobile).

9.2.3 Optimisation énergétique et fabrication à faibles émissions de carbone

La fabrication à faible émission de carbone permet de réduire les coûts de production et les émissions de carbone en optimisant la consommation d'énergie.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Tendances technologiques : fours de frittage économes en énergie (consommation d'énergie réduite de 15 %) et tréfileuses à haut rendement (rendement moteur > 90 %). Le chauffage par induction remplace le chauffage par résistance et l'efficacité de chauffage est augmentée de 20 %. L'optimisation des paramètres du processus (par exemple, une réduction de 50 °C de la température de recuit) réduit la consommation d'énergie de 10 %.

Caractéristiques du processus : Le système de gestion de l'énergie (EMS) surveille la consommation d'énergie en temps réel et optimise la planification de la production. Le système de récupération de chaleur résiduelle utilise la chaleur résiduelle du four de frittage pour préchauffer l'ébauche, ce qui permet d'économiser de l'énergie de 5 à 10 %.

Défis et perspectives : La mise à niveau des équipements économes en énergie est coûteuse et il faut 5 à 7 ans pour récupérer l'investissement. Au cours des 10 prochaines années, la fabrication à faible émission de carbone favorisera une réduction de 20 % des émissions de carbone provenant de la production de fil de molybdène, conformément à l'objectif mondial de neutralité carbone.

Impact sur l'application : La fabrication à faible émission de carbone réduit les coûts de production (environ 5 %), améliore la compétitivité du marché et répond à la demande du marché de l'éclairage vert.

9.3 Matériaux alternatifs pour le fil de molybdène pour l'éclairage

Avec les progrès de la technologie d'éclairage, des matériaux alternatifs peuvent remplacer partiellement le fil de molybdène, mais ses propriétés uniques présentent toujours des avantages.

9.3.1 Matériaux à base de tungstène et nouveaux alliages

Les matériaux à base de tungstène sont considérés comme une alternative potentielle au fil de molybdène en raison de leur point de fusion élevé et de leur résistance.

Tendance technologique : Alliage tungstène-rhénium (W-Re, 3 %-10 % Re) pour améliorer la résistance à la traction (500 MPa à 1500°C) et la résistance à la corrosion par arc. Les composites à matrice de tungstène (par exemple, W-ZrO₂) améliorent la résistance à l'oxydation et augmentent le poids oxydatif < 0,005 mg/cm².

Caractéristiques du processus : Les matériaux à base de tungstène nécessitent une température de frittage plus élevée (2500-2800°C) et un équipement de tréfilage de précision (tolérance ± 0,001 mm). Les revêtements de surface (par exemple Si₃N₄) améliorent la stabilité chimique.

Défis et perspectives : Le coût des matériaux à base de tungstène est 2 à 3 fois supérieur à celui du molybdène, et il est difficile à traiter. Au cours des 5 à 10 prochaines années, l'alliage W-Re pourrait représenter 10 % de la part de marché des lampes HID haut de gamme, mais le fil de molybdène reste le courant dominant en raison des avantages en termes de coûts.

Implications pour l'application : Les matériaux à base de tungstène conviennent aux applications à

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

ultra-haute température (par exemple, les lampes au xénon), mais le fil de molybdène est plus économique dans les lampes halogènes et à incandescence.

9.3.2 Céramiques et matériaux à base de carbone

Les céramiques et les matériaux à base de carbone attirent l'attention pour leur stabilité à haute température et leurs propriétés légères.

Tendances technologiques : Les céramiques de zircon (ZrO₂) et de nitrure de silicium (Si₃N₄) ont une excellente résistance à l'oxydation (stable à 2000°C) et une excellente isolation électrique, ce qui les rend adaptées aux structures de support des luminaires. Les nanotubes de carbone (NTC) et le graphène sont utilisés dans les électrodes en raison de leur conductivité élevée (10⁶ S/m) et de leur résistance (>1 GPa).

Caractéristiques du processus : les céramiques doivent être frittées au plasma (1800-2000 °C), les matériaux à base de carbone sont déposés par CVD (800-1200 °C). Le traitement de la céramique nécessite des moules de haute précision, et les matériaux à base de carbone doivent résoudre le problème du décalage de dilatation thermique avec l'étanchéité du verre.

Défis et perspectives : Les céramiques et les matériaux à base de carbone sont coûteux (3 à 5 fois plus chers que le molybdène) et ont des échelles de production limitées. Au cours des 10 à 15 prochaines années, il pourrait représenter 5 % de la part de marché de l'éclairage spécialisé (comme les lampes ultraviolettes).

Impact de l'application : Les matériaux à base de céramique et de carbone conviennent aux luminaires miniatures de haute précision, mais la dominance du fil de molybdène dans l'éclairage traditionnel est difficile à remplacer à court terme.

9.3.3 Matériaux conducteurs à haute température émergents

Les matériaux conducteurs émergents offrent plus de possibilités pour le fil de molybdène pour l'éclairage.

Tendances technologiques : Les composites à matrice métallique (par exemple, TiC-Ni) et les supraconducteurs à haute température (par exemple, YBCO) ont une excellente conductivité électrique (résistivité < 10⁻⁸ Ω·m) et une résistance à haute température (>2000°C). Les matériaux bidimensionnels, tels que les films MoS₂, attirent l'attention en raison de leur conductivité électrique élevée et de leur résistance à la corrosion.

Caractéristiques du processus : Les matériaux émergents nécessitent des technologies de dépôt avancées (telles que PVD, ALD), et l'épaisseur est contrôlée à 10-100 nm. La production doit être ultra-propre (classe ISO 5) pour éviter la contamination par les impuretés.

Défis et perspectives : Les technologies émergentes des matériaux ne sont pas encore matures et leur coût est 5 à 10 fois supérieur à celui du molybdène. Au cours des 15 à 20 prochaines années,

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

des percées pourraient être réalisées dans le domaine de l'éclairage laser et de l'aérospatiale, représentant <5 % du marché.

Impact sur l'application : Les matériaux émergents conviennent aux applications de pointe, mais le fil de molybdène reste dominant en raison de son processus mature et de ses avantages en termes de coûts.

9.4 Expansion du marché et des applications

Le domaine d'application et la demande du marché du fil de molybdène pour l'éclairage se développeront avec les changements dans la technologie d'éclairage et le marché mondial.

9.4.1 Applications potentielles dans l'éclairage LED et laser

Bien que l'éclairage LED et laser réduise le besoin de fil de molybdène traditionnel, il a encore du potentiel dans des domaines spécifiques.

Tendance technologique : Le fil de molybdène, en tant que plomb conducteur et substrat de dissipation thermique pour les lampes LED, nécessite une conductivité électrique ($>10^7$ S/m) et une conductivité thermique (>130 W/m·K) élevées. Dans l'éclairage laser, le fil de molybdène est utilisé pour supporter des phosphores ou des électrodes et est soumis à des densités d'énergie élevées ($>10^4$ W/cm²).

Caractéristiques du processus : Un étirage ultrafin (diamètre $<0,02$ mm) et un revêtement de surface (Al₂O₃, épaisseur 50 nm) sont nécessaires pour améliorer la dissipation de la chaleur et la résistance à la corrosion. Le processus d'étanchéité doit être adapté au substrat saphir (coefficient de dilatation thermique $< 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$).

Défis et perspectives : Le marché de l'éclairage LED et laser connaît une croissance rapide (10 % de croissance annuelle), mais l'utilisation de fils de molybdène représente 5 % du marché total. Au cours des 10 prochaines années, la demande de fil de molybdène dans les LED haut de gamme (par exemple, l'éclairage automobile) et la projection laser devrait augmenter de 15 %.

Impact sur l'application : L'application de fil de molybdène dans l'éclairage LED et laser prolonge sa durée de vie sur le marché et compense le rétrécissement du marché de l'éclairage traditionnel.

9.4.2 Expansion dans l'industrie aérospatiale et l'industrie des hautes températures

L'industrie aérospatiale et l'industrie des hautes températures offrent de nouvelles applications pour le fil de molybdène.

Tendances technologiques : Le fil de molybdène est nécessaire dans l'industrie aérospatiale comme électrode à haute température ($>2000^{\circ}\text{C}$) et matériau de capteur, avec une résistance à la traction de 1500 MPa (température ambiante). Les industries à haute température (par exemple, la pulvérisation de plasma, les fours de traitement thermique) utilisent du fil de molybdène comme élément chauffant et ont besoin d'une résistance au fluage (taux de fluage $< 10^{-7}$ s⁻¹).

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire for Lighting Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire for Lighting

As one of the core materials in modern lighting technology, molybdenum wire is widely used in various light sources including incandescent lamps, halogen lamps, fluorescent lamps, and gas discharge lamps, due to its high melting point, high strength, excellent corrosion resistance, and superior electrical conductivity. It is an irreplaceable and critical component in the lighting industry.

2. Typical Applications of Molybdenum Wire for Lighting

Residential and Commercial Lighting: Used in incandescent and halogen lamps to provide warm light and long service life.

Automotive Lighting: Functions as electrodes in HID and xenon lamps, offering high brightness and vibration resistance.

Specialty Lighting: Utilized in projection lamps, ultraviolet (UV) lamps, and infrared (IR) lamps to meet high-temperature and high-precision requirements in medical, industrial, and scientific applications.

Emerging Fields: Serves as conductive leads for LED lamps and supports for phosphors in laser lighting, aligning with future lighting technology development.

3. Basic Data of Molybdenum Wire for Lighting (Reference)

Parameter	Pure Mo Wire	Mo-La Wire	Mo-Re Wire
Mo Content	≥99.95%	≥99.0%	52.5%–86.0%
Diameter Range	0.03–3.2 mm	0.03–1.5 mm	0.03–1.0 mm
Tolerance	±0.002 mm	±0.002 mm	±0.002 mm
Tensile Strength (Room Temp)	800–1200 MPa	900–1400 MPa	1000–1500 MPa
Tensile Strength (at 1500°C)	150–300 MPa	200–400 MPa	250–450 MPa
Elongation at Break	10%–25%	12%–20%	15%–25%
Electrical Resistivity (20°C)	$5.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$6.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
Main Applications	Incandescent, Halogen	Halogen, Auto Headlights	HID, Projection Lamps

4. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.molybdenum.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Caractéristiques du processus : Il faut développer un alliage molybdène-rhénium (5 % Re) et un revêtement de surface (par exemple MoSi₂, épaisseur 1-2 µm). La production nécessite un frittage sous vide poussé (<10⁻³ Pa) et des processus de moulage de précision.

Défis et perspectives : Le marché de l'aérospatiale a des exigences de fiabilité extrêmement élevées, et les fils de molybdène doivent être certifiés (par exemple AS9100). Au cours des 10 prochaines années, la demande dans ce domaine devrait représenter 10 % du marché du fil de molybdène.

Impact sur l'application : Les industries aérospatiale et haute température élargissent les applications à haute valeur ajoutée du fil de molybdène pour compenser la contraction du marché de l'éclairage.

9.4.3 Analyse de la demande du marché mondial et des marchés émergents

L'évolution de la demande du marché mondial et l'essor de nouveaux marchés offrent des opportunités de croissance pour le fil de molybdène.

Tendances technologiques : Le marché de l'éclairage conventionnel (par exemple, halogène, HID) continue de croître à un taux annuel de 5 % à 7 % dans les pays en développement (par exemple, l'Inde, l'Asie du Sud-Est). La demande d'éclairage haut de gamme (par exemple, phares automobiles, lampes de projection) a entraîné une augmentation de 10 % des fils de molybdène dopés (molybdène, lanthane, molybdène-rhénium). Le marché mondial du fil de molybdène devrait maintenir un taux de croissance annuel moyen de 3 % de 2025 à 2030.

Caractéristiques du marché : La Chine représente 70 % de la production mondiale de fil de molybdène, qui est exporté vers l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Asie. Les marchés émergents (par exemple, l'Afrique, l'Amérique latine) devraient représenter 15 % du marché mondial en raison de la demande accrue de construction d'infrastructures.

Défis et perspectives : Les marchés européen et américain ont des exigences strictes en matière de protection de l'environnement (RoHS, REACH) et exigent des processus de production écologiques. Au cours des 10 prochaines années, la demande d'éclairage à faible coût dans les marchés émergents entraînera une augmentation de 20 % des ventes de fils de molybdène.

Impact de l'application : La croissance des marchés émergents et l'expansion des applications haut de gamme garantiront la compétitivité continue du fil de molybdène sur le marché mondial de l'éclairage.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale



fil de molybdène pour l'éclairage de CTIA

Appendice

A. Glossaire

Fil de molybdène : Un fil métallique mince avec du molybdène comme composant principal, qui est largement utilisé dans les appareils d'éclairage à haute température.

Fil de molybdène pur : Fil de molybdène d'une pureté de $\geq 99,95\%$, sans ajout d'éléments dopants.

Fil de molybdène et de lanthane : Fil de molybdène dopé à l'oxyde de lanthane pour améliorer la résistance à haute température et la résistance au fluage.

Fil de molybdène et de rhénium : Fil de molybdène dopé à l'élément rhénium pour améliorer la ductilité et la résistance à l'oxydation.

Fil de molybdène noir : Fil de molybdène avec une couche d'oxyde noir à la surface, non poli.

Fil de molybdène nettoyé : Fil de molybdène qui a été poli ou nettoyé, avec une surface brillante.

Métallurgie des poudres : La technologie de préparation des matériaux métalliques par pressage de poudre, frittage et autres processus.

Processus de tréfilage : Une méthode de traitement permettant d'étirer une ébauche métallique à travers une matrice pour former un filament.

Résistance à haute température : La résistance à la traction et à la déformation du matériau à haute température.

Résistance à l'oxydation : La capacité d'un matériau à résister à la corrosion oxydative à des températures élevées.

Cycle halogène : Le processus de prolongation de la durée de vie du filament par la réaction chimique du gaz halogène avec le filament dans une lampe halogène.

Fluorescence X (XRF) : Technique de détection qui utilise les rayons X pour exciter un échantillon en vue de son analyse élémentaire.

Spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES) : Technique de

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

quantification élémentaire par excitation plasmatique.

Microscopie électronique à balayage (MEB) : Un microscope à haute résolution utilisé pour observer la topographie de surface des matériaux.

Résistivité : Mesure de la capacité d'un matériau à résister à un courant électrique, mesurée en ohms-mètres.

Coefficient de dilatation thermique : Le degré auquel un matériau se dilate en volume lorsqu'il augmente avec la température.

RoHS : Restriction des substances dangereuses.

Green Manufacturing : Une méthode de production dans un but d'économie d'énergie, de protection de l'environnement et de faible émission de carbone.

B. Références

- [1] Manuel des matériaux en molybdène et en alliage de molybdène, Metallurgical Industry Press, 2018.
- [2] « Processus de préparation et technologie du fil de molybdène », Journal chinois des métaux non ferreux, 2022.
- [3] ASTM B386-03, Standard Specification for Molybdenum and Molybdenum Alloy Plate, Sheet, Strip, and Feul.
- [4] GB/T 3462-2017, Barres et plaques en molybdène.
- [5] Progrès de la technologie de la métallurgie des poudres, Science et génie des matériaux, 2023.
- [6] « Optimisation du processus de tréfilage au fil de molybdène », Metal Processing, 2021.
- [7] « Mécanisme d'amélioration des performances du fil de molybdène dopé », International Materials Review, 2020.
- [8] « Application de la technologie de traitement de surface dans le fil de molybdène », Ingénierie de surface, 2022.
- [9] Directive RoHS 2011/65/UE, Union européenne, 2011.
- [10] Rapport d'analyse du marché mondial du molybdène, Market Research Future, 2024.
- [11] Matériaux et technologie des dispositifs d'éclairage, Journal of Lighting Engineering, 2023.
- [12] « Lampes halogènes et technologie des lampes à décharge », Rapport technique de l'Institut international de l'éclairage, 2022.
- [13] Recherche sur les matériaux d'éclairage automobile, Ingénierie automobile, 2021.
- [14] « Progrès de la technologie d'éclairage spéciale », Optique et technologie optoélectronique, 2023.
- [15] Matériaux pour dispositifs électroniques sous vide, Maison d'édition de l'industrie électronique, 2020.
- [16] Technologie EDM, Journal of Mechanical Engineering, 2022.
- [17] « Matériaux et applications des fours à haute température », Science et génie des matériaux, 2021.
- [18] Matériaux avancés et technologie de fabrication, Science Press, 2023.
- [19] Fabrication intelligente et industrie 4.0, China Machine Press, 2022.
- [20] « Avancées dans la technologie de fabrication verte », Sciences et technologies de l'environnement, 2023.
- [21] Matériaux et technologie de l'éclairage, Journal of Lighting Engineering, 2024.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

- [22] ISO 22447, Molybdène et produits en alliage de molybdène, Organisation internationale de normalisation, 2019.
- [23] Directive RoHS 2011/65/UE, Union européenne, 2011.
- [24] Journal of Aerospace Materials Technology, Journal of Aeronautical Materials, 2023.
- [25] Technologie d'essai des matériaux, Science Press, 2022.
- [26] GB/T 4182-2000 « Méthodes d'analyse chimique du molybdène et des alliages de molybdène », Administration de normalisation de la République populaire de Chine, 2000.
- [27] « Technologie des essais non destructifs », Société chinoise d'ingénierie mécanique, 2023.
- [28] « Essais de performance des matériaux à haute température », Science et génie des matériaux, 2021.
- [29] « Technologie d'essai de performance électrique », Electronic Industry Press, 2020.