

Guide complet du fil de pulvérisation de molybdène

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

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

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Spray Wire Introduction

1. Overview of Molybdenum Spray Wire

Molybdenum spray wire is a high-purity molybdenum metal wire that is melted and deposited onto a substrate surface through thermal spray techniques such as flame spraying, plasma spraying, arc spraying, or HVOF (High Velocity Oxy-Fuel). The resulting coating offers excellent resistance to wear, corrosion, and high temperatures. Due to its high melting point and superior performance, molybdenum wire is widely used across various industrial sectors.

2. Characteristics of Molybdenum Spray Wire

High Melting Point: Approximately 2623°C, suitable for high-temperature environments.

Excellent Corrosion Resistance: Resists attack from acids, alkalis, and chemical media.

High Hardness & Wear Resistance: Tough coating that withstands mechanical wear.

Low Friction Coefficient: Reduces component wear and improves efficiency.

Chemical Stability: Maintains performance in harsh environments.

High Thermal Conductivity: Effectively dissipates heat and extends component lifespan.

3. Typical Uses of Molybdenum Spray Wire

Aerospace: Turbine blades, engine parts, thermal barrier coatings.

Automotive Industry: Wear-resistant coatings for piston rings, engine blocks, and brake discs.

Chemical & Energy Sectors: Corrosion-resistant pipelines, heat exchangers, wind power equipment.

Electronics & Semiconductors: Vacuum deposition heating wires, semiconductor leads.

Medical Field: Corrosion-resistant coatings for implants and surgical instruments.

Others: Marine anti-corrosion, wear-resistant construction machinery, high-temperature furnaces.

4. Basic Data of Molybdenum Spray Wire from CTIA GROUP LTD

Purity	≥99.95%
Density	10.2 g/cm ³
Diameter Range	1.0-3.0 mm, customizable
Tensile Strength	Moderate to ensure stable wire feeding
Packaging	Customized Packaging

5. 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

Répertoire

Chapitre 1 : Introduction

- 1.1 Définition et concept du fil de pulvérisation de molybdène
- 1.2 L'évolution historique du fil de pulvérisation de molybdène
- 1.3 Valeur industrielle et perspectives d'application du fil de pulvérisation de molybdène
- 1.4 Recherche et état technique du fil de pulvérisation de molybdène au pays et à l'étranger

Chapitre 2 : Caractéristiques du fil de pulvérisation de molybdène

- 2.1 Propriétés physiques du fil de pulvérisation de molybdène
 - 2.1.1 Point de fusion et conductivité thermique
 - 2.1.2 Densité et dureté
 - 2.1.3 Coefficient de dilatation thermique et stabilité thermique
 - 2.1.4 Conductivité et résistivité
- 2.2 Propriétés chimiques du fil de pulvérisation de molybdène
 - 2.2.1 Résistance à la corrosion
 - 2.2.2 Résistance à l'oxydation
 - 2.2.3 Inertie et réactivité chimiques
- 2.3 Propriétés mécaniques du fil de pulvérisation de molybdène
 - 2.3.1 Résistance à la traction et limite d'élasticité
 - 2.3.2 Ductilité et ténacité à la rupture
 - 2.3.3 Résistance à l'usure et propriétés de fatigue
- 2.4 Performance du revêtement par pulvérisation
 - 2.4.1 Adhérence du revêtement et force d'adhérence
 - 2.4.2 Porosité et uniformité du revêtement
 - 2.4.3 Résistance du revêtement aux hautes températures et aux chocs thermiques
 - 2.4.4 Rugosité de surface et microstructure des revêtements
- 2.5 Fil de pulvérisation de molybdène MSDS de CTIA GROUP LTD

Chapitre 3 : Processus de préparation et de production du fil de pulvérisation de molybdène

- 3.1 Préparation des matières premières
 - 3.1.1 Technologie d'enrichissement et de purification du minerai de molybdène
 - 3.1.2 Procédé de production de poudre de molybdène de haute pureté
 - 3.1.3 Contrôle de la qualité et essais de la poudre de molybdène
- 3.2 Processus de formage de fils de molybdène
 - 3.2.1 Technologie de moulage par métallurgie des poudres
 - 3.2.2 Processus de tréfilage du molybdène
 - 3.2.2.1 Tréfilage à matrice unique
 - 3.2.2.2 Tréfilage continu multimode
 - 3.2.3 Recuit et soulagement des contraintes du fil de molybdène
 - 3.2.4 Nettoyage et polissage des surfaces
- 3.3 Traitement spécial pour le fil de pulvérisation de molybdène
 - 3.3.1 Traitement d'activation de surface

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

- 3.3.2 Personnalisation des spécifications
- 3.3.3 Technologie de modification de surface
- 3.4 Processus de pulvérisation
 - 3.4.1 Prétraitement de surface des substrats
 - 3.4.1.1 Sablage mécanique
 - 3.4.1.2 Nettoyage chimique
 - 3.4.1.3 Nettoyage par ultrasons
 - 3.4.2 Technologie de projection thermique
 - 3.4.2.1 Procédé de pulvérisation à la flamme
 - 3.4.2.2 Procédé de pulvérisation au plasma
 - 3.4.2.3 Procédé de pulvérisation à l'arc
 - 3.4.2.4 Oxy-pulvérisation à grande vitesse (HVOF)
 - 3.4.3 Traitement après la pulvérisation
 - 3.4.3.1 Traitement thermique et recuit
 - 3.4.3.2 Revêtement, polissage et finition
 - 3.4.3.3 Traitement d'étanchéité du revêtement
- 3.5 Optimisation du processus de production
 - 3.5.1 Optimisation et contrôle des paramètres du procédé
 - 3.5.2 Système d'assurance de la qualité
 - 3.5.3 Fabrication écologique et technologies d'économie d'énergie
- 3.6 Points techniques clés
 - 3.6.1 Technologie de préparation du fil de molybdène de haute pureté
 - 3.6.2 Contrôle de la qualité du revêtement par pulvérisation
 - 3.6.3 Efficacité et régularité de la pulvérisation
- 3.7 Application de la technologie de pointe
 - 3.7.1 Technologie de pulvérisation nanométrique
 - 3.7.2 Technologie de pulvérisation assistée par laser
 - 3.7.3 Technologie de pulvérisation à froid
 - 3.7.4 Système de pulvérisation intelligent et automatisé
- 3.8 Défis techniques et solutions
 - 3.8.1 Pelage et fissuration du revêtement
 - 3.8.2 Oxydation à haute température et dégradation du rendement
 - 3.8.3 Équilibre entre le coût de production et l'efficacité
 - 3.8.4 Adaptabilité à la pulvérisation de substrats complexes

Chapitre 4 : Classification du fil de pulvérisation de molybdène

- 4.1 Classification par pureté
 - 4.1.1 Fil de molybdène de haute pureté
 - 4.1.2 Fil de molybdène dopé
- 4.2 Classification par utilisation
 - 4.2.1 Pour la pulvérisation industrielle
 - 4.2.2 Pour le revêtement fonctionnel
- 4.3 Classification selon le processus de pulvérisation

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

- 4.3.1 Pour la pulvérisation à la flamme
- 4.3.2 Pour la pulvérisation à l'arc
- 4.3.3 Pour la pulvérisation de plasma
- 4.3.4 Pour l'oxypulvérisation à grande vitesse (HVOF)
- 4.3.5 Pour la pulvérisation à froid

Chapitre 5 : Utilisations du fil de pulvérisation de molybdène

- 5.1 Domaine aérospatial
 - 5.1.1 Aubes de turbine et composants du moteur
 - 5.1.2 Pièces structurales à haute température et revêtements de barrière thermique
 - 5.1.3 Revêtement résistant à l'usure et anticorrosion des engins spatiaux
- 5.2 Industrie automobile
 - 5.2.1 Revêtement des pistons et des blocs du moteur
 - 5.2.2 Revêtement résistant aux hautes températures pour le système d'échappement
 - 5.2.3 Revêtement résistant à l'usure du système de freinage
- 5.3 Industries chimiques et énergétiques
 - 5.3.1 Tuyaux et vannes résistants à la corrosion
 - 5.3.2 Revêtements des réacteurs et des échangeurs de chaleur
 - 5.3.3 Revêtements pour les équipements d'énergie solaire et éolienne
- 5.4 Industrie de l'électronique et des semi-conducteurs
 - 5.4.1 Fil chauffant pour revêtement sous vide
 - 5.4.2 Fils et électrodes semi-conducteurs
 - 5.4.3 Revêtement par dépôt de couche mince
- 5.5 Médecine et bio-ingénierie
 - 5.5.1 Éléments chauffants pour les instruments médicaux
 - 5.5.2 Revêtements résistants à la corrosion pour les instruments médicaux
- 5.6 Autres domaines d'application
 - 5.6.1 Revêtements anticorrosion pour les navires et l'ingénierie extracôtière
 - 5.6.2 Revêtements résistants à l'usure pour les machines de construction
 - 5.6.3 Fourneaux à haute température et équipement de traitement thermique

Chapitre 6 : Équipement de production pour le fil de pulvérisation de molybdène

- 6.1 Équipement de traitement des matières premières
 - 6.1.1 Équipement de préparation et de réduction de la poudre de molybdène
 - 6.1.2 Fours de frittage et équipement de forgeage
- 6.2 Équipement de production de fil de molybdène
 - 6.2.1 Machines à tréfiler et matrices
 - 6.2.2 Fours de recuit et équipement de traitement thermique
 - 6.2.3 Équipement de nettoyage et de polissage des surfaces
- 6.3 Équipement de pulvérisation
 - 6.3.1 Systèmes de pulvérisation à la flamme
 - 6.3.2 Équipement de pulvérisation de plasma
 - 6.3.3 Dispositif de pulvérisation à l'arc

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

- 6.3.4 Équipement d'oxy-pulvérisation à grande vitesse (HVOF)
- 6.4 Équipement auxiliaire et de post-traitement
 - 6.4.1 Équipement de prétraitement du substrat
 - 6.4.2 Équipement de posttraitement du revêtement
 - 6.4.3 Équipement de détection et de surveillance en ligne
- 6.5 Automatisation et équipement intelligent
 - 6.5.1 Ligne de production de pulvérisation automatique
 - 6.5.2 Systèmes intelligents de contrôle et d'acquisition de données
 - 6.5.3 Systèmes de pulvérisation robotisés

Chapitre 7 : Normes nationales et étrangères pour le fil de pulvérisation de molybdène

- 7.1 Normes nationales
 - 7.1.1 GB/T 4181-2017 « Fil de molybdène » et exigences connexes
 - 7.1.2 GB/T 3462-2017
 - 7.1.3 GB/T 4197-2011
 - 7.1.4 Autres normes nationales pertinentes
- 7.2 Normes internationales
 - 7.2.1 Norme ASTM B387-18
 - 7.2.2 Spécification ISO 20407 pour les matériaux par projection thermique
 - 7.2.3 Fil ISO 14919 pour la projection thermique
 - 7.2.4 Autres normes internationales
- 7.3 Normes de l'industrie et spécifications de l'entreprise
 - 7.3.1 Normes de l'industrie des métaux non ferreux
 - 7.3.2 Normes de l'industrie de la projection thermique
 - 7.3.3 Spécifications relatives au contrôle interne de la qualité
- 7.4 Comparaison des normes et analyse d'applicabilité
 - 7.4.1 Différences entre les normes canadiennes et étrangères
 - 7.4.2 Scénarios d'application standard et sélection

Chapitre 8 : Essais et contrôle de la qualité du fil de pulvérisation de molybdène

- 8.1 Analyse des matières premières
 - 8.1.1 Analyse de la composition chimique
 - 8.1.2 Détection de la taille et de la morphologie des particules
 - 8.1.3 Détection de la teneur en impuretés
- 8.2 Inspection de la qualité du fil de molybdène
 - 8.2.1 Précision dimensionnelle et tolérance
 - 8.2.2 Détection des défauts de surface et de la rugosité
 - 8.2.3 Essais des propriétés mécaniques
- 8.3 Inspection du revêtement par pulvérisation
 - 8.3.1 Épaisseur et uniformité du revêtement
 - 8.3.2 Essai d'adhérence du revêtement
 - 8.3.3 Analyse de la microstructure et de la porosité
 - 8.3.4 Résistance à la corrosion et aux hautes températures

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

- 8.3.5 Performance en matière de chocs thermiques
- 8.4 Technologie et équipement d'essai
 - 8.4.1 Fluorescence X (XRF)
 - 8.4.2 Analyse MEB et EDS
 - 8.4.3 Essai de dureté (Vickers, Rockwell)
 - 8.4.4 Essais d'épaisseur par ultrasons et par laser
 - 8.4.5 Autres technologies de détection évoluées
- 8.5 Système de gestion de la qualité
 - 8.5.1 Certification ISO 9001
 - 8.5.2 Rapports d'essai et traçabilité
 - 8.5.3 Analyse et amélioration des défauts

Chapitre 9 : Tendances de développement et perspectives d'avenir

- 9.1 Tendances au développement technique
 - 9.1.1 Nouveaux matériaux et procédés de pulvérisation
 - 9.1.2 Production intelligente et numérique
 - 9.1.3 Technologie de revêtement composite
- 9.2 Demande du marché et expansion des applications
 - 9.2.1 Potentiel des industries émergentes
 - 9.2.2 Analyse des tendances du marché mondial
- 9.3 Protection de l'environnement et durabilité
 - 9.3.1 Technologie de pulvérisation écologique
 - 9.3.2 Récupération et recyclage des déchets
- 9.4 Échanges et coopération techniques internationaux
 - 9.4.1 Harmonisation des normes internationales
 - 9.4.2 R et D transfrontalières

Appendice

- A. Glossaire des termes
- B. Références

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Chapitre 1 Introduction

1.1 Définition et concept du fil de pulvérisation de molybdène

1.1.1 Définition de base du fil de pulvérisation de molybdène

Le fil de pulvérisation de molybdène est un matériau de fil métallique spécifiquement utilisé dans le processus de projection thermique, généralement fabriqué en molybdène de haute pureté (molybdène, symbole chimique Mo, numéro atomique 42). Le molybdène est un métal de transition avec des propriétés telles qu'un point de fusion élevé (environ 2623°C), une résistance élevée, une résistance à la corrosion et une excellente conductivité thermique, ce qui en fait l'un des matériaux importants dans le domaine de la pulvérisation thermique. La projection thermique est une technique d'ingénierie de surface qui crée une couche de revêtement avec une fonction spécifique en pulvérisant un matériau fondu ou semi-fondu sur la surface d'un substrat à grande vitesse. En tant que matière première pour la pulvérisation thermique, le fil de molybdène pulvérisé est généralement utilisé sous forme de pulvérisation à l'arc ou de pulvérisation à la flamme, et son objectif principal est de former une couche de revêtement en molybdène résistant à l'usure, aux hautes températures ou à la corrosion à la surface du substrat.

La forme typique du fil de pulvérisation de molybdène est un fil métallique mince, généralement entre 1,0 mm et 3,2 mm de diamètre, en fonction de l'équipement de pulvérisation et des exigences du processus. Le fil de molybdène est chauffé à l'état fondu ou semi-fondu par un pistolet de pulvérisation pendant le processus de pulvérisation, puis accéléré par un gaz comprimé (tel que de l'azote ou de l'air) sur le substrat cible pour former un revêtement uniforme. Ces revêtements ont généralement une dureté élevée, un faible coefficient de frottement et une bonne force d'adhérence, ce qui peut améliorer considérablement les propriétés de surface du substrat.

1.1.2 Propriétés physiques et chimiques du molybdène

Les propriétés physiques et chimiques uniques du molybdène sont à la base de son utilisation comme matériau de revêtement. Le molybdène a une densité de 10,28 g/cm³, ce qui est inférieur au tungstène (19,25 g/cm³) mais supérieur à de nombreux métaux courants, ce qui permet aux revêtements en molybdène d'atteindre un bon équilibre entre poids et performances. Le molybdène a un point de fusion élevé de 2623°C, juste derrière le tungstène et le rhénium, ce qui lui permet de maintenir sa stabilité structurelle et sa résistance mécanique à haute température. De plus, le molybdène est plus résistant aux acides, aux alcalis et à certains gaz corrosifs que de nombreux autres métaux, en particulier dans les environnements non oxydants.

Le molybdène a un faible coefficient de dilatation thermique (environ $4,8 \times 10^{-6}/K$), ce qui signifie que dans les environnements avec des changements de température drastiques, il y a moins de stress thermique entre le revêtement de molybdène et le substrat, réduisant ainsi le risque de fissuration ou de décollement du revêtement. Le molybdène a également une bonne conductivité électrique et thermique (conductivité thermique d'environ 138 W/m·K), ce qui rend le revêtement formé par le fil de pulvérisation de molybdène avantageux dans les applications où la conductivité thermique ou électrique est requise. De plus, le molybdène s'autolubrifie dans certaines conditions, en particulier à des températures élevées ou sous vide, ce qui élargit encore ses scénarios d'application.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

1.1.3 Processus de préparation du fil de pulvérisation de molybdène

La préparation du fil de pulvérisation de molybdène nécessite plusieurs processus pour garantir sa grande pureté et ses propriétés physiques constantes. Le fil de molybdène est généralement préparé par la technologie de la métallurgie des poudres, et les étapes spécifiques comprennent :

Extraction du concentré de molybdène : Le concentré de molybdène est extrait du minerai de molybdène (comme la molybdénite) pour éliminer les impuretés par flottation et purification chimique.

Production de poudre de molybdène : le concentré de molybdène est torréfié pour produire de l'oxyde de molybdène (MoO_3), puis une poudre de molybdène de haute pureté est obtenue par réduction de l'hydrogène.

Formation de billettes de molybdène : La poudre de molybdène est pressée dans une tige ou une ébauche de plaque et frittée à haute température pour augmenter la densité.

Tréfilage : Grâce au forgeage à chaud, au laminage et à plusieurs procédés de tréfilage, la billette de molybdène est transformée en filaments pour obtenir le diamètre et la finition de surface requis pour la pulvérisation.

Traitement de surface : Le fil de molybdène est nettoyé, recuit ou dopé pour optimiser ses propriétés mécaniques et son effet de pulvérisation.

La pureté du fil de [molybdène](#) doit généralement atteindre plus de 99,95 % pour garantir la qualité du revêtement par pulvérisation. Certains fils de pulvérisation de molybdène peuvent être dopés avec de petites quantités d'éléments (tels que le lanthane, le cérium ou le potassium) pour améliorer leur résistance à l'oxydation à haute température ou à la ductilité.

1.1.4 Le rôle du fil de pulvérisation de molybdène dans la projection thermique

Dans le processus de pulvérisation thermique, le fil de molybdène est introduit dans le pistolet de pulvérisation par un équipement de pulvérisation à l'arc ou à la flamme, et lorsqu'il est chauffé, il forme des gouttelettes fondues ou des particules semi-fondues. Ces particules frappent la surface du substrat sous l'action de courants d'air à grande vitesse, se refroidissent et se solidifient rapidement, formant un revêtement dense. Les principales fonctions du revêtement en molybdène comprennent :

Protection contre l'usure : La dureté élevée du revêtement en molybdène (environ 5,5 sur l'échelle de Mohs) le rend efficace contre l'usure mécanique.

Protection contre les hautes températures : Le point de fusion élevé du molybdène le rend adapté à une utilisation dans des composants à haute température, tels que les aubes de turbine de moteur d'avion.

Protection contre la corrosion : La résistance à la corrosion du molybdène à certains produits chimiques le rend adapté à une utilisation dans les équipements chimiques ou les environnements marins.

Propriétés autolubrifiantes : Les revêtements en molybdène peuvent former de l'oxyde de molybdène (MoO_3) à des températures élevées ou dans des environnements sous vide, et ont un faible coefficient de frottement, ce qui les rend adaptés à une utilisation dans des pièces coulissantes.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

1.1.5 Comparaison du fil de pulvérisation de molybdène avec d'autres matériaux de pulvérisation

Par rapport aux matériaux pulvérisés courants tels que les alliages à base de nickel, le tungstène ou la céramique, le fil pulvérisé en molybdène offre les avantages suivants :

Rentable : Le molybdène coûte moins cher que le tungstène et certains métaux précieux, mais a des performances similaires et convient aux applications industrielles à grande échelle.

Polyvalence : Les revêtements en molybdène sont résistants à l'abrasion, aux températures élevées et à la corrosion, et conviennent à un large éventail d'applications.

Facilité de mise en œuvre : La ductilité du fil de molybdène permet de l'étirer facilement selon différentes spécifications et de s'adapter à une variété d'équipements de pulvérisation.

Cependant, le molybdène est sujet à la formation d'oxydes volatils (MoO_3) dans les atmosphères oxydantes, ce qui limite son application dans certains environnements oxydants à haute température. En revanche, les revêtements céramiques peuvent être meilleurs en termes de résistance à l'oxydation, mais ils sont plus fragiles et n'ont pas une force de liaison aussi forte que les revêtements en molybdène.

1.1.6 Spécifications et classification du fil de pulvérisation de molybdène

Le fil de pulvérisation de molybdène peut être divisé en une variété de spécifications en fonction de l'utilisation et des exigences du processus, et les classifications courantes comprennent :

Fil de molybdène pur : pureté $\geq 99,95\%$, utilisé dans les processus de pulvérisation standard.

Fil de molybdène dopé : Dopé avec des éléments tels que le lanthane (La), le cérium (Ce) ou le potassium (K) pour améliorer la résistance à l'oxydation ou la ductilité.

Classification du diamètre : Les diamètres courants comprennent 1,0 mm, 1,6 mm, 2,0 mm, 3,2 mm, etc., qui conviennent à différents équipements de pulvérisation.

Classification du traitement de surface : tel que le [fil de molybdène noir](#) (non nettoyé, avec une couche d'oxyde sur la surface) et le [fil de molybdène blanc](#) (surface brillante après nettoyage).

Ces classifications permettent au fil de pulvérisation de molybdène de répondre aux besoins de différentes applications industrielles, telles que l'aérospatiale, la construction automobile et les équipements énergétiques.

1.2 L'évolution historique du fil de pulvérisation de molybdène

1.2.1 Découverte et application précoce du molybdène

La découverte du molybdène remonte au 18^{ème} siècle. En 1778, le chimiste suédois Carl Wilhelm Scheele a été le premier à isoler l'oxyde de molybdène de la molybdénite et l'a nommé « molybdène » (dérivé du mot grec « molybdos », signifiant une substance semblable au plomb). En 1781, le chimiste suédois Peter Jacob Hjelm a préparé pour la première fois le molybdène métal par réduction du carbone, jetant ainsi les bases de l'application industrielle du molybdène.

À la fin du 19^{ème} siècle, le molybdène a commencé à être utilisé comme élément d'alliage dans

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

l'industrie sidérurgique pour améliorer la résistance et la résistance à la corrosion de l'acier. Cependant, en raison des limites de la technologie de purification et de traitement du molybdène, son champ d'application est relativement étroit, principalement limité au domaine métallurgique. Jusqu'au début du XXe siècle, avec les progrès de la métallurgie des poudres et de la technologie du tréfilage, la préparation du fil de molybdène est devenue possible, offrant les conditions de son application dans le domaine de la pulvérisation.

1.2.2 Origine de la technologie de projection thermique

La technologie de projection thermique est apparue au début du 20e siècle. En 1910, l'ingénieur suisse Max Ulrich Schoop a inventé la technique de pulvérisation à la flamme, qui fondait et pulvérisait de la poudre ou du fil métallique sur la surface du substrat en brûlant du gaz combustible. L'émergence de cette technologie offre la possibilité d'appliquer du fil de pulvérisation de molybdène. Dans les années 1920, la technologie de pulvérisation à l'arc a été introduite, qui utilisait un arc électrique pour chauffer le fil afin de générer des gouttelettes fondues, améliorant ainsi l'efficacité de la pulvérisation et la qualité du revêtement.

Les premières projections thermiques utilisaient principalement des métaux fondables, tels que le zinc et l'aluminium, pour les revêtements anticorrosion. En tant que métal à point de fusion élevé, l'application du molybdène dans la projection thermique a commencé tardivement, et ce n'est qu'au milieu du 20ème siècle, avec le développement des superalliages et de l'industrie aérospatiale, que l'application par pulvérisation du fil de molybdène a progressivement attiré l'attention.

1.2.3 Développement précoce du fil de pulvérisation de molybdène

Dans les années 50 du 20ème siècle, le fil de molybdène a commencé à émerger dans le domaine industriel. L'industrie aérospatiale aux États-Unis a été la première à appliquer des revêtements en molybdène sur les aubes de turbine et les composants de la chambre de combustion pour lutter contre les températures élevées et les problèmes d'usure. Le point de fusion élevé et la résistance à l'usure du molybdène en font un matériau de revêtement idéal, en particulier dans les turbines à gaz et les moteurs à réaction. Dans le même temps, l'industrie en Europe et au Japon a commencé à explorer l'application de la pulvérisation de fils de molybdène dans la construction de machines, comme les revêtements résistants à l'usure pour les segments de piston et les roulements.

Au cours de cette période, la technologie de préparation du fil de molybdène pulvérisé était encore relativement rugueuse, et la pureté et la qualité de surface du fil de molybdène étaient instables, ce qui entraînait de grandes fluctuations des propriétés du revêtement. Dans les années 1960, grâce aux progrès de la technologie de fusion sous vide et de réduction de l'hydrogène, la pureté du fil de molybdène a été considérablement améliorée, et la force de liaison et la durabilité des revêtements par pulvérisation ont été améliorées.

1.2.4 Développement de la technologie moderne du fil de pulvérisation de molybdène

Après les années 70 du 20e siècle, la technologie de projection thermique est entrée dans une phase de développement rapide. L'avènement de la pulvérisation au plasma et de la pulvérisation à la flamme à grande vitesse (HVOF) a considérablement amélioré la qualité des revêtements par

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

pulvérisation, permettant aux revêtements en molybdène d'être utilisés dans des environnements plus exigeants. Par exemple, la pulvérisation à la flamme à grande vitesse peut créer un revêtement de molybdène plus dense, réduire la porosité et améliorer la force d'adhérence du revêtement au substrat.

Au cours de la même période, une percée a été réalisée dans la technologie de dopage du fil de molybdène. Le fil de molybdène dopé au lanthane ou au cérium présente une meilleure résistance à l'oxydation et une meilleure ductilité dans des environnements à haute température, élargissant ainsi le champ d'application du fil de pulvérisation de molybdène. Dans les années 1980, le fil de molybdène pulvérisé a commencé à être largement utilisé dans l'industrie automobile pour fabriquer des segments de piston et des segments de synchronisation résistants à l'usure, prolongeant ainsi considérablement la durée de vie des pièces.

1.2.5 Le développement du fil de pulvérisation de molybdène en Chine

L'industrie chinoise du molybdène a démarré tardivement, mais elle se développe rapidement. Dans les années 60 du 20ème siècle, la Chine a commencé à extraire le molybdène de la molybdénite et a progressivement établi une capacité de production de fil de molybdène. Dans les années 1980, avec l'avancement de la réforme, de l'ouverture et de la modernisation industrielle, les entreprises chinoises de produits en molybdène ont commencé à introduire des équipements de tréfilage et de pulvérisation avancés à l'étranger, et la production et l'application de fil de pulvérisation de molybdène sont entrées dans une période de développement rapide.

Dans les années 1990, la Chine est devenue le plus grand producteur mondial de molybdène, et la technologie de production du fil de molybdène a progressivement mûri. Grâce à l'innovation technologique, les principales entreprises chinoises de produits en molybdène ont développé du fil de molybdène de haute pureté et du fil de molybdène dopé pour répondre aux besoins des marchés nationaux et étrangers de la pulvérisation. Après 2000, le fil de pulvérisation de molybdène de la Chine a commencé à être exporté vers l'Europe, l'Amérique et les marchés d'Asie du Sud-Est, devenant une partie importante de la chaîne d'approvisionnement mondiale des produits en molybdène.

1.2.6 Jalons dans le revêtement du fil de molybdène

1910 : La technologie de pulvérisation thermique est inventée, jetant les bases de l'application du fil de pulvérisation de molybdène.

Années 1950 : La pulvérisation de fil de molybdène est utilisée pour la première fois dans le secteur aérospatial.

Années 1970 : Les technologies de pulvérisation au plasma et de pulvérisation à la flamme à grande vitesse améliorent les performances du revêtement en molybdène.

Années 1980 : Développement du fil de molybdène dopé pour améliorer la résistance à l'oxydation des revêtements.

Après 2000, la Chine est devenue une base importante pour la production mondiale de fils de molybdène et la technologie de pulvérisation.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

1.3 Valeur industrielle et perspectives d'application du fil de pulvérisation de molybdène

1.3.1 Valeur industrielle du fil de molybdène pulvérisé

En tant que matériau de base de la technologie de projection thermique, la valeur industrielle du fil de molybdène se reflète dans ses propriétés physiques et chimiques uniques, un large éventail de scénarios d'application et sa contribution à l'efficacité et à la durabilité de l'industrie moderne. Le point de fusion élevé, la dureté élevée, la résistance à la corrosion et les propriétés autolubrifiantes du molybdène le rendent irremplaçable dans le domaine de l'ingénierie de surface. Voici une analyse détaillée de sa valeur industrielle à partir de plusieurs dimensions.

1.3.1.1 Améliorer la durabilité et la durée de vie des composants

Le revêtement formé par le fil de molybdène pulvérisé prolonge considérablement la durée de vie des composants mécaniques grâce à sa dureté élevée (environ 5,5-6,0 sur l'échelle de Mohs) et à sa résistance à l'usure. Par exemple, dans l'industrie automobile, les segments de piston et les segments de synchronisation sont des composants essentiels dans les moteurs et les transmissions qui sont soumis à des frottements à haute fréquence et à des environnements à haute température pendant de longues périodes. Alors que les segments de piston conventionnels non revêtus peuvent s'user pendant des milliers d'heures sous des charges élevées, les segments de piston revêtus de molybdène peuvent prolonger leur durée de vie d'un facteur 2 à 3, certains cas affichant une durée de vie de plus de 100 000 km. Cette durabilité accrue réduit directement les coûts de maintenance et les temps d'arrêt de l'équipement.

De plus, la stabilité des revêtements en molybdène dans des environnements à haute température les rend d'une grande valeur dans l'industrie aérospatiale. Par exemple, les pales de turbine des turbines à gaz fonctionnent dans des environnements de combustion supérieurs à 1000°C, et les revêtements en molybdène sont efficaces pour résister à la fatigue thermique et à l'usure, prolongeant ainsi la durée de vie des pales. Selon les données de l'industrie, l'intervalle d'entretien des aubes de turbine revêtues de molybdène peut être prolongé de 20 à 30 %, ce qui réduit considérablement le coût du cycle de vie complet des moteurs d'avion.

1.3.1.2 Améliorer l'efficacité du fonctionnement de l'équipement

Le faible coefficient de frottement (aussi bas que 0,1-0,2 dans certaines conditions) des revêtements en molybdène les rend autolubrifiants, ce qui peut réduire considérablement les pertes par frottement dans les composants mécaniques et ainsi améliorer l'efficacité de fonctionnement de l'équipement. Dans l'industrie automobile, l'application de segments de piston recouverts de molybdène peut réduire la consommation d'énergie par frottement à l'intérieur du moteur et améliorer l'efficacité énergétique d'environ 1 à 2 %. Sur la base d'une production annuelle mondiale de 80 millions de véhicules, si 10 % du moteur utilise des segments de piston recouverts de molybdène, des millions de tonnes de carburant peuvent être économisées chaque année, et les avantages économiques et environnementaux sont significatifs.

Dans le secteur aérospatial, les revêtements en molybdène sont utilisés dans les chambres de combustion et les tuyères des moteurs à réaction pour réduire les pertes de matériau à haute température et assurer une poussée stable. Des études ont montré que l'efficacité thermique des

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

chambres de combustion revêtues de molybdène peut être améliorée d'environ 0,5 %, ce qui est important dans le secteur aérospatial, car même de petits gains d'efficacité peuvent réduire considérablement la consommation de carburant et les coûts d'exploitation.

1.3.1.3 Réduire les coûts de production et de maintenance

Comparé aux revêtements métalliques ou céramiques à point de fusion élevé tels que le tungstène et le rhénium, le molybdène a une performance de coût plus élevée. Les réserves mondiales de molybdène sont relativement abondantes (environ 25 millions de tonnes, dont plus de 50 % en Chine), et les coûts de purification et de traitement sont inférieurs à ceux du tungstène (environ 1/2-1/3). Le coût du fil de molybdène pulvérisé est d'environ 50 à 100 dollars par kilogramme, tandis que le coût du fil de tungstène peut atteindre plus de 200 dollars. Cela rend les revêtements en molybdène plus économiquement avantageux pour les applications industrielles à grande échelle.

De plus, les propriétés réparatrices des revêtements en molybdène sont l'une de ses valeurs importantes. Les revêtements en molybdène usés peuvent être réparés par repulvérisation sans remplacer la pièce entière. Par exemple, dans la réparation des roulements de machines lourdes, l'application d'un revêtement en molybdène peut réduire les coûts de réparation de plus de 50 % tout en réduisant les temps d'arrêt. Cette nature réparatrice est particulièrement importante dans les secteurs de l'exploitation minière, de l'acier et de l'énergie, où le remplacement de gros équipements est coûteux et prend du temps.

1.3.1.4 Répondre aux exigences de la protection de l'environnement et du développement durable

Le molybdène est un matériau métallique non toxique et respectueux de l'environnement qui répond aux exigences de la directive RoHS de l'UE et des réglementations REACH. Par rapport aux revêtements traditionnels à base de plomb ou de cadmium, les revêtements en molybdène ne libèrent pas de substances nocives lors de la production et de l'utilisation, et sont inoffensifs pour l'environnement et la santé humaine. De plus, la durabilité du revêtement en molybdène réduit la fréquence des remplacements de pièces, réduisant ainsi la consommation de ressources et la production de déchets, conformément au concept de fabrication écologique.

En termes d'efficacité énergétique, les propriétés autolubrifiantes des revêtements en molybdène réduisent l'utilisation d'huiles lubrifiantes. Par exemple, dans les moteurs automobiles, les segments de piston recouverts de molybdène peuvent réduire la consommation de lubrifiant d'environ 10 %, réduisant ainsi les coûts d'élimination des huiles usagées. Cela est d'une grande importance pour la promotion mondiale d'une économie à faible émission de carbone et d'une économie circulaire.

1.3.1.5 Promouvoir l'intelligence industrielle et l'efficacité

Avec les progrès de l'industrie 4.0, la demande de matériaux haute performance pour la fabrication intelligente augmente. La précision du traitement et l'uniformité du revêtement du fil de pulvérisation de molybdène lui permettent de répondre aux exigences d'une fabrication de précision. Par exemple, dans les assemblages robotisés et les outils de coupe à grande vitesse, les revêtements en molybdène peuvent réduire la friction et l'accumulation de chaleur, améliorant ainsi la précision

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

des mouvements et la durée de vie de l'outil. Des études ont montré que la durée de vie des outils de coupe revêtus de molybdène peut être prolongée de 30 à 50 %, ce qui présente des avantages significatifs dans les lignes de production automatisées.

De plus, la conductivité du revêtement en molybdène (résistivité d'environ $5,5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) et la conductivité thermique (environ $138 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) le rendent unique dans les appareils électroniques et énergétiques. Par exemple, dans les équipements de fabrication de semi-conducteurs, les revêtements en molybdène peuvent être utilisés pour les électrodes et les composants thermoconducteurs afin d'améliorer la stabilité et l'efficacité de dissipation thermique de l'équipement.

1.3.2 Principaux domaines d'application

Le revêtement du fil de pulvérisation de molybdène est largement utilisé dans de nombreux domaines industriels en raison de sa polyvalence, et ce qui suit est une analyse détaillée de ses principaux scénarios d'application :

1.3.2.1 Aérospatiale

L'aérospatiale est l'un des domaines d'application les plus importants du fil de pulvérisation de molybdène. Les revêtements en molybdène sont principalement utilisés pour les composants à haute température tels que les aubes de turbine, les chambres de combustion, les buses et les aubes directrices. Par exemple, dans les turboréacteurs à double flux du Boeing 737 et de l'Airbus A320, des revêtements en molybdène sont utilisés pour protéger les aubes de turbine de l'usure et maintenir des performances stables au-dessus de 1200°C . Le coefficient de dilatation thermique du revêtement de molybdène (environ $4,8 \times 10^{-6}/\text{K}$) est proche de celui des superalliages à base de nickel, réduisant l'écaillage du revêtement causé par le stress thermique.

De plus, les revêtements en molybdène sont également utilisés dans les systèmes de protection thermique des engins spatiaux. Par exemple, certaines parties du Starship de SpaceX sont recouvertes de molybdène pour résister à la chaleur extrême lors de la rentrée. Des études ont montré que les propriétés autolubrifiantes des revêtements en molybdène dans un environnement sous vide les rendent particulièrement adaptés aux pièces coulissantes des engins spatiaux, telles que les mécanismes d'entraînement d'antennes de satellites.

1.3.2.2 Industrie automobile

L'industrie automobile est l'un des plus grands marchés pour le fil de molybdène, avec environ 30 % du fil de molybdène utilisé dans la fabrication de pièces automobiles. Les revêtements en molybdène sont principalement utilisés dans des composants tels que les segments de piston, les segments de synchronisation, les vilebrequins et les soupapes. Par exemple, le groupe Volkswagen a fait un usage intensif de segments de piston recouverts de molybdène dans ses moteurs TSI pour améliorer l'efficacité énergétique et la durabilité. Les données montrent que les segments de piston recouverts de molybdène peuvent réduire les pertes par frottement d'environ 15 %, améliorant considérablement les performances du moteur.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

En outre, le revêtement en molybdène a également un potentiel dans le domaine des véhicules à énergie nouvelle. Par exemple, les roulements de moteur et les engrenages de transmission des véhicules électriques peuvent être recouverts de molybdène pour améliorer la résistance à l'usure et la conductivité thermique et prolonger la durée de vie. On estime que d'ici 2030, la production mondiale de véhicules à énergie nouvelle dépassera les 30 millions et que la demande du marché pour le revêtement en molybdène augmentera encore.

1.3.2.3 Équipement énergétique

Dans le secteur de l'énergie, les revêtements en molybdène sont largement utilisés dans les chaudières, les échangeurs de chaleur, les turbines à gaz et les équipements nucléaires. Par exemple, dans les tuyaux de chaudière des centrales électriques au charbon, les revêtements en molybdène sont capables de résister à la corrosion et à l'abrasion à haute température, prolongeant la durée de vie des tuyaux d'environ 2 fois. Dans le secteur nucléaire, les revêtements en molybdène sont utilisés dans les composants de protection contre les rayonnements des réacteurs et sont efficaces pour absorber le rayonnement neutronique en raison de leur densité élevée (10,28 g/cm³) et de leur non-toxicité.

Les équipements d'énergie renouvelable sont également un domaine d'application important pour les revêtements en molybdène. Par exemple, le revêtement en molybdène sur la surface de l'engrenage de la boîte de vitesses de l'éolienne réduit l'usure et la lubrification et réduit les coûts de maintenance. Alors que la capacité éolienne installée mondiale dépasse 1 000 GW d'ici 2024, la demande de revêtements en molybdène dans les équipements éoliens continue de croître.

1.3.2.4 Fabrication de machines

Dans le domaine de l'ingénierie mécanique, les revêtements en molybdène sont utilisés pour la protection de surface des roulements, des engrenages, des moules et des outils de coupe. Par exemple, dans les équipements miniers, les forets revêtus de molybdène peuvent prolonger la durée de vie de plus de 50 % et réduire la fréquence de remplacement de l'équipement. Dans les moules d'injection, le revêtement en molybdène peut réduire l'adhérence des moules sur les plastiques, améliorer l'efficacité de libération du moule et la qualité de la surface du produit.

1.3.2.5 Génie chimique et maritime

La résistance à la corrosion des revêtements en molybdène les rend largement utilisés dans les équipements chimiques et l'ingénierie offshore. Par exemple, dans les réacteurs pétrochimiques, les revêtements en molybdène résistent aux gaz acides et à la corrosion à haute température, ce qui prolonge la durée de vie de l'équipement. Dans les plates-formes offshore et les équipements marins, les revêtements en molybdène protègent les structures en acier de la corrosion de l'eau de mer et sont particulièrement adaptés à une utilisation dans les tuyaux et les vannes des plates-formes de forage en haute mer.

1.3.2.6 Industries médicales et électroniques

Dans le domaine médical, les revêtements en molybdène sont utilisés dans les composants de protection contre les radiations des appareils à rayons X et des appareils de tomodensitométrie en

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

raison de leur non-toxicité et de leur haute densité. Par exemple, dans les tomographes de Siemens Healthineers, des revêtements en molybdène sont utilisés pour protéger contre les radiations et garantir la qualité de l'image et la sécurité des patients. Dans l'industrie électronique, les revêtements de molybdène sont utilisés dans les pièces thermiques et conductrices d'électricité des équipements de fabrication de semi-conducteurs, telles que les électrodes des machines de gravure au plasma, et leur conductivité thermique peut améliorer l'efficacité de dissipation thermique de l'équipement d'environ 20 %.

1.3.3 Perspectives d'application et tendances du marché

1.3.3.1 Potentiel dans le domaine des nouvelles énergies

Avec la transition énergétique mondiale, la demande de revêtements haute performance pour les équipements à énergie nouvelle augmente rapidement. Les revêtements en molybdène ont un avenir prometteur dans l'éolien, l'énergie nucléaire et les équipements solaires. Par exemple, le revêtement en molybdène sur la surface des engrenages des boîtes de vitesses des éoliennes réduit l'usure et améliore l'efficacité de la transmission. Dans le domaine de l'énergie nucléaire, les revêtements en molybdène peuvent être utilisés dans les coques des barres de combustible des réacteurs nucléaires de génération IV pour résister aux températures élevées et aux dommages causés par les radiations. On estime que d'ici 2030, le marché mondial des équipements à énergie nouvelle dépassera 1,5 trillion de dollars américains et que la demande de revêtement en molybdène augmentera à un taux annuel moyen de 6 %.

1.3.3.2 Fabrication intelligente et industrie 4.0

L'industrie 4.0 met l'accent sur l'intelligence, l'automatisation et la haute efficacité, et les perspectives d'application du revêtement en molybdène dans la fabrication de précision sont importantes. Par exemple, dans les articulations de robots, les revêtements en molybdène réduisent la friction et l'accumulation de chaleur, améliorant ainsi la précision du mouvement et la longévité. Dans les équipements d'impression 3D, les buses recouvertes de molybdène sont capables de résister à l'usure des matériaux fondus à haute température et de prolonger leur durée de vie. Le marché mondial de la fabrication intelligente devrait atteindre 500 milliards de dollars d'ici 2028, et les revêtements en molybdène en bénéficieront en tant que matériau clé.

1.3.3.3 Génie maritime et navires verts

Il existe une demande croissante de revêtements résistants à la corrosion dans l'ingénierie offshore. Les revêtements en molybdène sont largement utilisés dans les plates-formes de forage en haute mer, les équipements d'énergie éolienne offshore et les navires écologiques. Par exemple, les revêtements en molybdène peuvent être utilisés pour protéger la surface des hélices de navires, réduire la corrosion de l'eau de mer et l'adhérence biologique, et améliorer l'efficacité de la propulsion. Le marché mondial de l'offshore devrait atteindre 200 milliards de dollars d'ici 2030, et les revêtements en molybdène seront une solution importante.

1.3.3.4 Médecine et biotechnologie

La non-toxicité et la biocompatibilité des revêtements en molybdène leur confèrent un potentiel dans les dispositifs médicaux. Par exemple, dans les implants orthopédiques, les revêtements en

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

molybdène peuvent améliorer la résistance à l'usure et à la corrosion des implants et prolonger leur durée de vie. De plus, l'utilisation de revêtements en molybdène dans les outils dentaires et les instruments chirurgicaux augmente progressivement. Le marché mondial des dispositifs médicaux devrait atteindre 600 milliards de dollars d'ici 2027, et la demande de revêtements en molybdène continuera de croître.

1.3.3.5 Taille du marché et avantages économiques

Selon les données de l'industrie, la taille du marché mondial du molybdène sera d'environ 5 milliards de dollars en 2024, dont le fil de pulvérisation de molybdène représente environ 10 % de la part. On s'attend à ce que d'ici 2030, le marché du fil de pulvérisation de molybdène croît à un taux annuel moyen de 5,5 % pour atteindre 800 millions de dollars. En tant que plus grand producteur de molybdène au monde, la Chine représente plus de 50 % de la production mondiale, et de nombreuses entreprises chinoises sont devenues d'importants fournisseurs du marché mondial du fil de pulvérisation de molybdène grâce à l'innovation technologique et à la production à grande échelle.

1.3.4 Étude de cas

1.3.4.1 Cas aérospatial : GE Aviation

General Electric (GE) Aviation utilise largement des revêtements en molybdène dans ses moteurs GEnx pour la protection contre l'usure des aubes de turbine. Les moteurs GEnx sont utilisés dans le Boeing 787 Dreamliner, et le revêtement en molybdène maintient les pales de turbine stables dans des environnements à haute température et à haute pression, prolongeant les intervalles de maintenance de 25 %. Cette application permet à GE Aviation d'économiser des centaines de millions de dollars en coûts de maintenance chaque année.

1.3.4.2 Cas de l'industrie automobile : Volkswagen

Volkswagen utilise des segments de piston recouverts de molybdène dans son moteur TSI de 1,4 L, ce qui améliore considérablement l'efficacité énergétique et la durabilité. Des tests ont montré que les segments de piston recouverts de molybdène réduisent les pertes par frottement de 15 % et prolongent la durée de vie du moteur à plus de 150 000 km. Cette technologie a été déployée sur plusieurs modèles du Groupe Volkswagen, avec une production annuelle de plus de 5 millions d'unités dans le monde.

1.3.4.3 Cas de l'équipement énergétique : énergie éolienne Siemens

Siemens Gamesa utilise un revêtement en molybdène dans ses réducteurs éoliens offshore pour réduire l'usure des engrenages et l'utilisation de lubrifiants. Les tests ont montré une durée de vie 40 % plus longue et une réduction de 30 % des coûts de maintenance des engrenages revêtus de molybdène. Cette technologie a été appliquée à plusieurs projets éoliens offshore à travers le monde.

1.4 Recherche et état technique du fil de pulvérisation de molybdène au pays et à l'étranger

1.4.1 État actuel de la recherche nationale

En tant que plus grand producteur de molybdène au monde (environ 150 000 tonnes en 2024, soit 50 % du total mondial), la Chine dispose d'avantages significatifs dans la recherche, le développement et l'application du fil de pulvérisation de molybdène. Les instituts de recherche et

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

les entreprises nationales ont fait d'importants progrès dans la préparation du fil de molybdène, l'optimisation du processus de pulvérisation et l'amélioration des performances du revêtement. Voici une analyse détaillée de l'état actuel de la recherche en Chine :

1.4.1.1 Principales institutions de recherche

Institut de recherche sur les métaux, Académie chinoise des sciences : L'équipe d'ingénierie de surface de l'institut se concentre sur la recherche de revêtements à base de molybdène et a développé une technologie de préparation de fils de molybdène dopée au lanthane (La) et au cérium (Ce). Les résultats montrent que la résistance à l'oxydation du fil de molybdène dopé à 1 % de lanthane est augmentée de 30 % et que la durée de vie du revêtement est prolongée de 50 % dans une atmosphère oxydante à 1000°C. De plus, l'institut a étudié la microstructure des revêtements de molybdène et a amélioré la dureté et la force de liaison des revêtements en contrôlant la taille des grains (10-50 nm).

Université des sciences et de la technologie de Pékin : L'École des sciences et de l'ingénierie des matériaux de la même université a étudié les effets de la technologie de pulvérisation au plasma et de pulvérisation à la flamme à grande vitesse (HVOF) sur les performances des revêtements en molybdène. Les résultats expérimentaux montrent que la porosité du revêtement en molybdène formé par le procédé HVOF est réduite à moins de 1 % et que la force de liaison atteint 80 MPa, ce qui est nettement meilleur que celui de la pulvérisation à l'arc traditionnelle (la porosité est d'environ 5 % et la force de liaison est d'environ 50 MPa).

Université de Tsinghua : Le département des matériaux de l'Université de Tsinghua a mis au point une technologie de pulvérisation à froid pour la préparation de revêtements de molybdène, qui forment des revêtements à haute densité par impact de particules à ultra-grande vitesse, réduisant ainsi le stress thermique et la formation d'oxydes. Les revêtements en molybdène par projection à froid sont disponibles jusqu'à la dureté HV800 pour les applications de composants de haute précision.

1.4.1.2 Grandes entreprises

CTIA GROUP LTD. : En tant que société leader de produits en molybdène en Chine, Chinatungsten Online se concentre sur la production de fil de molybdène de haute pureté (pureté $\geq 99,95\%$), fournissant un fil de pulvérisation de molybdène d'un diamètre de 1,0 à 3,2 mm.

1.4.1.3 Objet de la recherche

Technologie de dopage : Dopage d'éléments de terres rares ou de métaux alcalins (tels que le potassium) pour améliorer la résistance à l'oxydation à haute température et les propriétés mécaniques du fil de molybdène. Par exemple, un fil de molybdène dopé à 0,8 % de cérium réduit le taux d'oxydation de 40 % à 1200°C.

Optimisation du processus de pulvérisation : La pulvérisation plasma et l'optimisation des paramètres du processus HVOF, tels que la distance de pulvérisation (100-150 mm), le débit de gaz (50-80 L/min) et l'intensité du courant (400-600 A), sont étudiées pour réduire la porosité du

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

revêtement et améliorer la force d'adhérence.

Fabrication écologique : Développer des équipements de pulvérisation à faible consommation d'énergie et un processus de revêtement en molybdène respectueux de l'environnement pour réduire les émissions de gaz d'échappement et la consommation d'énergie dans le processus de pulvérisation. Par exemple, l'utilisation d'azote au lieu d'argon comme gaz de pulvérisation peut réduire les coûts d'environ 15 %.

1.4.1.4 Cas d'application

Système de freinage ferroviaire à grande vitesse : le disque de frein EMU de CRRC adopte un revêtement en molybdène, ce qui améliore la résistance à l'usure et la résistance aux hautes températures de 50 %, et prolonge la durée de vie du disque de frein à 10 ans.

Équipement pétrochimique : Sinopec a appliqué un revêtement de molybdène sur la canalisation de l'unité de craquage catalytique pour résister à la corrosion des gaz acides, et la durée de vie de la canalisation a été prolongée de 3 fois.

1.4.2 Situation actuelle de la recherche étrangère

La recherche et l'application du fil de pulvérisation de molybdène dans les pays étrangers ont commencé plus tôt, en particulier aux États-Unis, en Allemagne et au Japon, et la technologie associée occupe la position de leader dans le monde. Voici une analyse détaillée de l'état actuel de la recherche à l'étranger :

1.4.2.1 Principaux établissements et entreprises de recherche

Praxair, États-Unis : Praxair, leader mondial de la technologie de projection thermique, a mis au point un système de pulvérisation plasma capable de produire des revêtements de molybdène avec une porosité inférieure à 0,5 % et une force d'adhérence allant jusqu'à 100 MPa. La société a étudié des revêtements composites à base de molybdène pour améliorer la dureté et la résistance à l'usure du revêtement en ajoutant des particules céramiques telles que Al_2O_3 .

Höganäs, Allemagne : Höganäs se concentre sur le développement de revêtements composites à base de molybdène, en recherchant un processus de pulvérisation hybride d'alliages à base de molybdène et de nickel pour former des revêtements à la fois résistants à l'usure et à la corrosion. Ses produits sont largement utilisés sur les marchés de l'automobile et des équipements énergétiques en Europe.

Toshiba du Japon : Toshiba a étudié la résistance à l'oxydation à haute température des revêtements de molybdène dans le domaine de l'aérospatiale et a développé un fil de molybdène dopé à l'yttrium (Y), qui améliore la résistance à l'oxydation de 40 % à 1300°C. Le revêtement en molybdène de Toshiba est utilisé dans la chambre de combustion des turbines à gaz, ce qui prolonge la durée de vie des composants d'environ 30 %.

Massachusetts Institute of Technology (MIT) : Le laboratoire de science des matériaux du MIT a

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

étudié la préparation de revêtements de molybdène à l'échelle nanométrique pour améliorer la dureté (HV900) et la résistance à l'usure en contrôlant la taille des grains du revêtement (5-20 nm). Les revêtements en nano-molybdène sont largement utilisés dans les équipements à semi-conducteurs.

1.4.2.2 Objet de la recherche

Revêtements composites : Recherche sur les revêtements composites de molybdène avec des céramiques (par exemple, ZrO_2 , Al_2O_3) ou des métaux (par exemple, Ni, Cr) pour améliorer la polyvalence des revêtements. Par exemple, les revêtements composites molybdène- Al_2O_3 peuvent atteindre une dureté de HV1000 et une augmentation de 50 % de la résistance à l'usure.

Nano-revêtement : Le revêtement de molybdène à l'échelle nanométrique est préparé par pulvérisation à froid et par pulvérisation assistée par laser pour réduire la porosité et la rugosité de surface ($Ra \leq 0,1 \mu m$) et améliorer les performances du revêtement.

Pulvérisation intelligente : Développez des équipements de pulvérisation automatisés qui combinent l'intelligence artificielle et la technologie des capteurs pour surveiller les paramètres de pulvérisation (par exemple, la température, la vitesse du flux d'air) en temps réel afin d'améliorer l'uniformité du revêtement et l'efficacité de la production.

1.4.2.3 Cas d'application

Boeing : Le turboréacteur à double flux du Boeing 787 utilise des aubes de turbine recouvertes de molybdène, ce qui améliore les performances à haute température de 20 % et prolonge les intervalles de maintenance de 25 %.

Mitsubishi Heavy Industries : Mitsubishi Heavy Industries a appliqué un revêtement en molybdène dans la chambre de combustion de la turbine à gaz pour résister à la corrosion à haute température à $1400^\circ C$ et prolonger la durée de vie des composants de 40 %.

1.4.3 Situation technique et défis

1.4.3.1 État de l'art

À l'heure actuelle, la technologie du fil de pulvérisation de molybdène est relativement mature et les principales caractéristiques techniques comprennent :

Fil de molybdène de haute pureté : La pureté du fil de pulvérisation de molybdène le plus courant dans le monde a atteint plus de 99,95 % et la résistance à l'oxydation de certains fils de molybdène dopés a été considérablement améliorée.

Procédés de pulvérisation avancés : La pulvérisation au plasma et les procédés HVOF peuvent former des revêtements de molybdène avec une porosité inférieure à 1 % et une force de liaison de 80 à 100 MPa.

Production automatisée : L'équipement de pulvérisation intelligent surveille les paramètres de pulvérisation à l'aide du capteur, et l'uniformité de l'épaisseur du revêtement est contrôlée à $\pm 5 \mu m$.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

1.4.3.2 Défis techniques

Résistance insuffisante à l'oxydation : Le molybdène est sujet à la formation d'oxydes volatils (MoO_3) dans les atmosphères oxydantes à haute température, ce qui limite son application dans certains environnements à haute température.

Porosité du revêtement : Les revêtements en molybdène avec pulvérisation à l'arc traditionnelle ont une porosité élevée (3 % à 5 %), ce qui affecte la durabilité et la résistance à la corrosion.

Contrôle des coûts : Le coût de production du fil de molybdène de haute pureté est élevé (environ 50 à 100 dollars américains / kg), et le processus de purification et d'étirage doit être encore optimisé.

Adaptabilité des substrats complexes : L'uniformité du revêtement en molybdène est difficile à contrôler sur des substrats non plats ou de forme complexe, et de nouveaux équipements de pulvérisation doivent être développés.

1.4.4 Orientations futures de la recherche

1.4.4.1 Nouvelles technologies de dopage

Mettre au point des éléments de dopage plus efficaces (p. ex., yttrium, cérium, zirconium) et des procédés de dopage pour améliorer la résistance à l'oxydation et la ductilité des fils de molybdène. Par exemple, le taux d'oxydation d'un fil de molybdène dopé à 0,5 % de zirconium peut être réduit de 50 % à 1400°C.

1.4.4.2 Technologie de pulvérisation avancée

Promouvoir la technologie de pulvérisation à froid et de pulvérisation assistée par laser pour réduire le stress thermique et la formation d'oxyde dans les revêtements. Les revêtements en molybdène pulvérisés à froid peuvent être utilisés avec une porosité aussi faible que 0,2 % et une force de liaison allant jusqu'à 120 MPa, ce qui les rend adaptés aux applications de haute précision.

1.4.4.3 Fabrication intelligente et écologique

Développez un système de pulvérisation intelligent qui utilise l'apprentissage automatique pour optimiser les paramètres de pulvérisation et améliorer l'uniformité du revêtement. Recherche de procédés de pulvérisation respectueux de l'environnement pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz d'échappement. Par exemple, les équipements de pulvérisation alimentés par des énergies renouvelables peuvent réduire les émissions de carbone de 20 %.

1.4.4.4 Composites et nano-revêtements

Recherchez des revêtements composites et des nanorevêtements à base de molybdène, combinés à des céramiques, des métaux ou d'autres matériaux haute performance pour former des revêtements multifonctionnels. Par exemple, les revêtements composites molybdène- ZrO_2 peuvent augmenter la résistance à l'usure jusqu'à 60 % et conviennent aux applications aérospatiales et énergétiques.

1.4.4.5 Applications interdisciplinaires

Explorez l'application des revêtements de molybdène dans le biomédical, les nouvelles énergies et l'électronique. Par exemple, dans les appareils électroniques flexibles, les revêtements en molybdène peuvent être utilisés dans la préparation de films conducteurs ; Dans les implants biologiques, les revêtements en molybdène améliorent la résistance à la corrosion et la

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

biocompatibilité.



CTIA GROUP LTD fil de pulvérisation de molybdène

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Spray Wire Introduction

1. Overview of Molybdenum Spray Wire

Molybdenum spray wire is a high-purity molybdenum metal wire that is melted and deposited onto a substrate surface through thermal spray techniques such as flame spraying, plasma spraying, arc spraying, or HVOF (High Velocity Oxy-Fuel). The resulting coating offers excellent resistance to wear, corrosion, and high temperatures. Due to its high melting point and superior performance, molybdenum wire is widely used across various industrial sectors.

2. Characteristics of Molybdenum Spray Wire

High Melting Point: Approximately 2623°C, suitable for high-temperature environments.

Excellent Corrosion Resistance: Resists attack from acids, alkalis, and chemical media.

High Hardness & Wear Resistance: Tough coating that withstands mechanical wear.

Low Friction Coefficient: Reduces component wear and improves efficiency.

Chemical Stability: Maintains performance in harsh environments.

High Thermal Conductivity: Effectively dissipates heat and extends component lifespan.

3. Typical Uses of Molybdenum Spray Wire

Aerospace: Turbine blades, engine parts, thermal barrier coatings.

Automotive Industry: Wear-resistant coatings for piston rings, engine blocks, and brake discs.

Chemical & Energy Sectors: Corrosion-resistant pipelines, heat exchangers, wind power equipment.

Electronics & Semiconductors: Vacuum deposition heating wires, semiconductor leads.

Medical Field: Corrosion-resistant coatings for implants and surgical instruments.

Others: Marine anti-corrosion, wear-resistant construction machinery, high-temperature furnaces.

4. Basic Data of Molybdenum Spray Wire from CTIA GROUP LTD

Purity	≥99.95%
Density	10.2 g/cm ³
Diameter Range	1.0-3.0 mm, customizable
Tensile Strength	Moderate to ensure stable wire feeding
Packaging	Customized Packaging

5. 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 2 Caractéristiques du fil de pulvérisation de molybdène

2.1 Propriétés physiques du fil de pulvérisation de molybdène

Les propriétés physiques du fil de pulvérisation de molybdène sont à la base de son matériau de projection thermique, ce qui détermine son applicabilité à haute température, à haute pression et dans des conditions de travail complexes. En tant que métal de transition à point de fusion élevé, le molybdène a une excellente conductivité thermique, un faible coefficient de dilatation thermique et une densité élevée, ce qui le rend largement utilisé dans l'aérospatiale, l'industrie automobile et les équipements énergétiques. Ce qui suit est une analyse détaillée sous quatre aspects : point de fusion et conductivité thermique, densité et dureté, coefficient de dilatation thermique et stabilité thermique, conductivité et résistivité.

2.1.1 Point de fusion et conductivité thermique du fil de pulvérisation de molybdène

Le point de fusion du molybdène est de 2623 °C (4753 °F), ce qui n'est devancé que par le tungstène (3422 °C) et le rhénium (3186 °C) parmi les métaux courants, et beaucoup plus élevé que le fer (1538 °C) et le nickel (1455 °C). Ce point de fusion élevé permet au fil de pulvérisation de molybdène de rester structurellement stable dans des environnements à très haute température, ce qui le rend particulièrement adapté au revêtement de surface de composants à haute température tels que les aubes de turbines d'avion, les chambres de combustion de turbines à gaz et les réacteurs pétrochimiques. Par exemple, le revêtement formé par le fil de pulvérisation de molybdène peut résister à des températures élevées transitoires allant jusqu'à 1400°C dans les turbines à gaz sans fondre ni ramollir de manière significative.

Dans le processus de projection thermique, le fil de molybdène est chauffé à l'état fondu ou semi-fondu par un arc électrique ou une flamme. Le point de fusion élevé signifie que l'équipement de pulvérisation nécessite un apport d'énergie élevé (par exemple, la pulvérisation de plasma peut atteindre des températures allant jusqu'à 15 000 °C), mais il garantit également que les particules de molybdène fondu maintiennent une viscosité élevée pendant le processus de pulvérisation, ce qui permet d'obtenir un revêtement dense. Les résultats montrent que les propriétés du point de fusion des revêtements de molybdène leur permettent de maintenir un certain degré de stabilité dans des atmosphères oxydantes à haute température, bien que la résistance à l'oxydation doive être encore améliorée par des revêtements dopants ou composites.

Conductivité thermique : La conductivité thermique du molybdène est de 138 W/m·K (à 20°C), ce qui est supérieur à celui de l'acier (environ 50 W/m·K) mais inférieur à celui du cuivre (environ 400 W/m·K). Cette propriété donne aux revêtements en molybdène un avantage dans les scénarios où une dissipation rapide de la chaleur est requise. Par exemple, dans les machines de gravure au plasma pour les équipements de fabrication de semi-conducteurs, les électrodes recouvertes de molybdène peuvent conduire efficacement la chaleur, empêcher la surchauffe de l'équipement et améliorer la stabilité opérationnelle. La conductivité thermique affecte également la vitesse de refroidissement des gouttelettes pendant la pulvérisation, et une conductivité thermique plus élevée aide les gouttelettes à se solidifier rapidement à la surface du substrat, réduisant ainsi le stress thermique et la porosité du revêtement.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

En pratique, la conductivité thermique du revêtement en molybdène diminue légèrement à haute température. Par exemple, à 1000°C, la conductivité thermique du molybdène tombe à environ 110 W/m·K, mais reste suffisante pour la plupart des besoins industriels. En revanche, les revêtements céramiques (par exemple, la zircone, avec une conductivité thermique d'environ 2 W/m·K) ont une faible conductivité thermique et sont sujets à l'accumulation de chaleur, tandis que les revêtements en molybdène présentent plus d'avantages en termes d'équilibre entre conductivité thermique et résistance mécanique.

2.1.2 Densité et dureté du fil de pulvérisation de molybdène

La densité du molybdène est de 10,28 g/cm³, ce qui est inférieur à celui du tungstène (19,25 g/cm³) mais supérieur à celui du nickel (8,91 g/cm³) et du fer (7,87 g/cm³). Cette densité moyenne offre un bon équilibre entre poids et performances, ce qui la rend particulièrement adaptée aux composants des industries aérospatiale et automobile où la légèreté est requise. Par exemple, dans les segments de piston automobiles, les revêtements en molybdène offrent une excellente résistance à l'usure sans augmenter considérablement le poids.

La densité du revêtement en molybdène affecte directement sa qualité de pulvérisation. La densité plus faible aide les gouttelettes à maintenir un bon débit pendant le processus de pulvérisation, réduisant ainsi les pertes d'éclaboussures pendant le processus de pulvérisation. Les résultats montrent que la densité du revêtement formé par le fil de pulvérisation de molybdène à l'arc peut atteindre 9,8-10,0 g/cm³, ce qui est proche de la valeur théorique, indiquant que le revêtement a une grande compacité.

La dureté du molybdène est de 5,5 à 6,0 sur l'échelle de Mohs (environ 200 à 250 sur l'échelle de Vickers), et la dureté du revêtement de molybdène formé par pulvérisation est généralement comprise entre 300 et 500 HV, selon le processus de pulvérisation et le post-traitement. Par exemple, le procédé de pulvérisation à la flamme à grande vitesse (HVOF) peut former des revêtements de molybdène d'une dureté allant jusqu'à HV450, tandis que les revêtements de pulvérisation au plasma sont généralement d'environ HV350. La dureté élevée du revêtement en molybdène le rend résistant à l'usure mécanique et convient particulièrement aux composants à fort frottement tels que les segments de piston, les roulements et les outils de coupe.

La dureté est également étroitement liée à la microstructure du revêtement. La taille des grains des revêtements en molybdène est généralement de 10 à 50 µm, et la taille plus petite des grains contribue à améliorer la dureté et la résistance à l'usure. En dotant avec des éléments de terres rares tels que le lanthane ou le cérium, le grain peut être affiné et la dureté peut être augmentée à HV550. Par exemple, des recherches menées par l'Institut de recherche sur les métaux de l'Académie chinoise des sciences ont montré que les revêtements de molybdène dopés à 1 % de lanthane augmentaient leur dureté de 15 % et leur résistance à l'usure de 20 %.

2.1.3 Coefficient de dilatation thermique et stabilité thermique du fil de pulvérisation de molybdène

Le coefficient de dilatation thermique du molybdène est de $4,8 \times 10^{-6}/K$ (20-1000°C), ce qui est

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

beaucoup plus bas que celui de l'acier (environ $12 \times 10^{-6}/K$) et de l'aluminium (environ $23 \times 10^{-6}/K$), et proche de celui des superalliages à base de nickel (environ $5,0 \times 10^{-6}/K$). Le faible coefficient de dilatation thermique permet aux revêtements en molybdène de réduire les contraintes thermiques dans des environnements avec des changements de température drastiques, réduisant ainsi le risque de fissuration ou d'écaillage du revêtement. Par exemple, dans les moteurs d'avion, le revêtement en molybdène est bien adapté à la dilatation thermique du substrat d'alliage à base de nickel, assurant la stabilité du revêtement pendant les cycles chauds et froids.

Lors de la projection thermique, le coefficient de dilatation thermique affecte la qualité de la liaison du revêtement au substrat. Si la différence de coefficient de dilatation thermique entre le substrat et le revêtement est trop importante, une contrainte résiduelle importante sera générée lorsque le revêtement est refroidi après une pulvérisation à haute température, provoquant le décollement du revêtement. Le faible coefficient de dilatation thermique des revêtements en molybdène les rend adaptés à une large gamme de substrats métalliques tels que les aciers inoxydables, les alliages de titane et les superalliages.

Stabilité thermique La stabilité thermique des revêtements en molybdène est due à leur point de fusion élevé et à leur faible volatilité. Dans des atmosphères non oxydantes telles que l'azote ou le vide, les revêtements en molybdène sont stables au-dessus de $1600^{\circ}C$ et conviennent à une utilisation dans les fours à vide, les électrodes et les composants d'engins spatiaux. Cependant, dans une atmosphère oxydante, le molybdène génère des oxydes volatils (MoO_3) supérieurs à $500^{\circ}C$, entraînant une diminution de la qualité du revêtement. Pour résoudre ce problème, les chercheurs ont mis au point des fils de molybdène dopés (tels que le potassium dopé ou le cérium) et des revêtements composites (tels que le molybdène- Al_2O_3) pour améliorer la stabilité thermique. Par exemple, un revêtement en molybdène dopé à 0,8 % de cérium peut prolonger sa durée de vie de 30 % dans une atmosphère oxydante à $1000^{\circ}C$.

2.1.4 Conductivité et résistivité du fil de pulvérisation de molybdène

Conductivité : La conductivité du molybdène est d'environ $1,8 \times 10^7$ S/m ($20^{\circ}C$), ce qui est inférieur à celui du cuivre ($5,9 \times 10^7$ S/m) mais supérieur à celui de l'acier inoxydable (environ $1,4 \times 10^6$ S/m). Cette propriété confère aux revêtements de molybdène un avantage dans les applications où la conductivité électrique est requise, telles que les électrodes dans les équipements de fabrication de semi-conducteurs et les couches conductrices pour les composants électroniques. La conductivité élevée du revêtement en molybdène réduit également la résistance à l'arc pendant la pulvérisation, ce qui contribue à stabiliser le processus de pulvérisation à l'arc.

Résistivité La résistivité du molybdène est de $5,5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ($20^{\circ}C$) avec une légère augmentation de la température (environ $2,0 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$) à $1000^{\circ}C$). La faible résistivité permet au revêtement en molybdène de maintenir une bonne conductivité dans les environnements à haute température, ce qui le rend adapté aux électrodes à haute température et aux éléments chauffants résistifs. Par exemple, dans les électrodes d'un four à verre, le revêtement en molybdène est capable de conduire de manière stable l'électricité à $1400^{\circ}C$, prolongeant la durée de vie de l'électrode d'environ 40 %.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Dans le processus de pulvérisation thermique, la résistivité du fil de molybdène affecte l'efficacité énergétique de la pulvérisation à l'arc. Une résistivité plus faible signifie une perte de puissance plus faible, ce qui le rend adapté à la production industrielle à grande échelle. Des études ont montré que l'optimisation des paramètres de pulvérisation à l'arc (par exemple, des courants de 400 à 600 A) peut augmenter la consommation d'énergie jusqu'à 15 %.

2.2 Propriétés chimiques du fil de pulvérisation de molybdène

Les propriétés chimiques du fil de pulvérisation de molybdène déterminent ses performances dans les environnements corrosifs et les conditions d'oxydation à haute température. L'inertie chimique, la résistance à la corrosion et la résistance à l'oxydation (dans certaines conditions) du molybdène le rendent largement utilisé dans les équipements chimiques, offshore et énergétiques. Trois aspects sont analysés : la résistance à la corrosion, la résistance à l'oxydation, l'inertie chimique et la réactivité.

2.2.1 Résistance à la corrosion du fil de pulvérisation de molybdène

Le molybdène a une excellente résistance à la corrosion aux acides non oxydants (par exemple, l'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique) et aux solutions alcalines. Par exemple, dans l'acide chlorhydrique à une concentration de 10 %, le molybdène a un taux de corrosion de seulement 0,01 mm/an, ce qui est bien inférieur à l'acier inoxydable (environ 0,1 mm/an). Cette propriété rend les revêtements en molybdène importants pour les applications dans les réacteurs pétrochimiques, les pipelines chimiques et les équipements marins. Dans l'eau de mer, les revêtements en molybdène sont plus résistants à la corrosion que les revêtements en zinc, résistants aux ions chlorure et conviennent à la protection des structures en acier sur les plates-formes offshore.

Cependant, le molybdène est moins résistant à la corrosion dans les acides oxydants tels que l'acide nitrique et est sujet à une dissolution rapide. Pour résoudre ce problème, les chercheurs ont mis au point des revêtements composites à base de molybdène qui améliorent la résistance à la corrosion en ajoutant du nickel ou du chrome. Par exemple, les revêtements composites molybdène-Ni réduisent le taux de corrosion de 50 % dans les environnements d'acide nitrique.

2.2.2 Résistance à l'oxydation du fil de pulvérisation de molybdène

Le molybdène a une bonne résistance à l'oxydation à basse température (<500°C), mais les oxydes volatils (MoO_3) sont faciles à former dans une atmosphère oxydante à haute température (>500°C), ce qui entraîne une détérioration de la qualité du revêtement. Par exemple, dans l'air à 800°C, les revêtements de molybdène pur peuvent s'oxyder à un taux allant jusqu'à 0,1 mm/h, limitant leur application dans des environnements oxydants à haute température.

Pour améliorer l'activité antioxydante, les chercheurs ont utilisé :

Technologie de dopage : Le dopage des éléments de terres rares (par exemple, le lanthane, le cérium) ou des métaux alcalins (par exemple, le potassium) peut former une couche protectrice d'oxyde stable. Par exemple, un revêtement en molybdène dopé à 1 % de lanthane réduit le taux d'oxydation de 40 % à 1000°C.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Revêtement composite : Crée une barrière antioxydante en ajoutant des matériaux céramiques (par exemple Al_2O_3 , ZrO_2). Par exemple, les revêtements composites molybdène- Al_2O_3 ont une augmentation de 50 % de la résistance à l'oxydation à 1200°C.

Atmosphère protectrice : Les revêtements en molybdène sont nettement plus résistants à l'oxydation lorsqu'ils sont protégés par de l'azote ou de l'argon, ce qui les rend adaptés à une utilisation dans les fours à vide et les composants d'engins spatiaux.

2.2.3 Inertie chimique et réactivité du fil de pulvérisation de molybdène

Le molybdène est chimiquement inerte à température ambiante et ne réagit pas avec la plupart des éléments non métalliques (par exemple, l'oxygène, l'azote) ou ne réagit pas de manière significative avec l'eau ou la vapeur. Cette propriété confère aux revêtements en molybdène un avantage dans les scénarios où la stabilité chimique est critique, comme les électrodes dans les fours à verre et le revêtement dans les réacteurs chimiques.

Cependant, à des températures élevées, le molybdène a une certaine réactivité avec l'oxygène, le chlore et le fluor. Par exemple, au-dessus de 600 °C, le molybdène réagit avec l'oxygène pour former MoO_3 , ce qui entraîne une perte de revêtement. Afin de réduire la réactivité, les chercheurs ont mis au point des techniques de modification de surface, telles que la silicination pour former une couche protectrice de MoSi_2 , ce qui améliore considérablement la stabilité chimique.

2.3 Propriétés mécaniques du fil de pulvérisation de molybdène

Les propriétés mécaniques du fil de pulvérisation de molybdène déterminent ses performances dans des environnements à charge élevée, à friction élevée et à contraintes complexes. La haute résistance, la ductilité et la résistance à l'usure du molybdène permettent à ses revêtements de répondre aux besoins des applications aérospatiales, automobiles et de génie mécanique. Ce qui suit est analysé sous trois aspects : la résistance à la traction et la limite d'élasticité, la ductilité et la ténacité à la rupture, la résistance à l'usure et les performances en fatigue.

2.3.1 Résistance à la traction et limite d'élasticité du fil de pulvérisation de molybdène

Résistance à la traction La résistance à la traction du fil de molybdène est d'environ 800-1000 MPa à 20°C, ce qui est beaucoup plus élevé que l'aluminium (environ 200 MPa) mais inférieur à celui du tungstène (environ 1500 MPa). La résistance à la traction du revêtement de molybdène formé par pulvérisation est généralement comprise entre 500 et 700 MPa en raison de changements de microstructure tels que le raffinement et la porosité du grain. Le procédé de pulvérisation à la flamme à grande vitesse (HVOF) augmente la résistance à la traction du revêtement à environ 800 MPa, car il forme un revêtement plus dense.

Limite d'élasticité La limite d'élasticité du molybdène est d'environ 600-800 MPa, et la limite d'élasticité des revêtements pulvérisés est généralement comprise entre 400-600 MPa. La limite d'élasticité affecte directement la résistance à la déformation du revêtement. Par exemple, dans les segments de piston automobiles, la limite d'élasticité élevée des revêtements en molybdène est capable de résister aux vibrations à haute fréquence et aux contraintes thermiques, empêchant ainsi la fissuration du revêtement.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

2.3.2 Ductilité et résistance à la rupture du fil de pulvérisation de molybdène

Le fil de molybdène malléable a une bonne ductilité et l'allongement à la rupture est d'environ 10 % à 15 %. Le dopage avec des éléments de terres rares tels que le lanthane peut encore améliorer la ductilité, par exemple un fil de molybdène dopé à 1 % de lanthane peut atteindre un allongement à la rupture allant jusqu'à 20 %. La ductilité du revêtement par pulvérisation est légèrement inférieure à celle du corps du fil de molybdène, qui est d'environ 5 à 10 %, mais elle est suffisante pour la plupart des applications industrielles. Par exemple, dans les aubes de turbine des moteurs d'avion, la ductilité des revêtements en molybdène est capable de s'adapter à la dilatation thermique et aux vibrations mécaniques, réduisant ainsi l'écaillage du revêtement.

Résistance à la rupture La résistance à la rupture (K_{IC}) des revêtements en molybdène est généralement comprise entre 10 et 15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, ce qui est inférieur à celui des revêtements céramiques (par exemple, la zircone, environ 5 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) mais supérieur à celui des revêtements à base de nickel (environ 8 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). La résistance élevée à la rupture permet au revêtement en molybdène de résister à la propagation des fissures et convient à une utilisation dans des composants à fortes charges de choc, tels que les trépan miniers et les matrices de forgeage.

2.3.3 Résistance à l'usure et propriétés de fatigue du fil de pulvérisation de molybdène

Résistance à l'abrasion La résistance à l'usure des revêtements en molybdène est due à leur dureté élevée et à leur faible coefficient de frottement (environ 0,1-0,2). Dans des conditions de frottement de glissement, le taux d'usure du revêtement en molybdène n'est que de 0,01 à 0,05 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, ce qui est nettement inférieur à celui de l'acier (environ 0,1 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$). Par exemple, dans les bagues de synchronisation automobiles, la résistance à l'usure du revêtement en molybdène prolonge la durée de vie des composants d'un facteur 3.

Propriétés de fatigue La résistance à la fatigue des revêtements en molybdène se comporte bien dans l'essai de fatigue à cycle élevé (HCF). Par exemple, la résistance à la fatigue des revêtements en molybdène est d'environ 400 MPa sous des contraintes de 10^7 cycles, ce qui les rend adaptés aux pièces rotatives des moteurs d'avion. Des études ont montré que l'optimisation du processus de pulvérisation, comme la réduction de la porosité, peut augmenter la durée de vie à la fatigue jusqu'à 20 %.

2.4 Performance du revêtement par pulvérisation

Les propriétés de revêtement formées par le fil de pulvérisation de molybdène affectent directement son efficacité dans les applications industrielles. L'adhérence, la porosité, la résistance aux hautes températures et les propriétés de surface des revêtements sont des indicateurs clés pour évaluer leur qualité. Ce qui suit est analysé sous quatre aspects.

2.4.1 Adhérence du revêtement et force d'adhérence

L'adhérence des revêtements de molybdène est généralement mesurée par un essai de traction (ASTM C633) avec une force d'adhérence comprise entre 50 et 100 MPa. Le procédé de pulvérisation à la flamme à grande vitesse (HVOF) peut former des revêtements avec une force d'adhérence allant jusqu'à 100 MPa, tandis que la pulvérisation à l'arc a généralement une force

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

d'adhérence de 50 à 70 MPa. La résistance de la liaison dépend des paramètres du revêtement (par exemple, distance de pulvérisation de 100 à 150 mm, débit de gaz de 50 à 80 L/min) et du traitement de surface du support (par exemple, dégrossissage par sablage).

2.4.2 Porosité et uniformité du revêtement

La porosité des revêtements en molybdène est généralement comprise entre 0,5 % et 5 %, selon le processus de pulvérisation. La porosité du procédé HVOF peut être aussi faible que 0,5 %, tandis que la porosité de la pulvérisation à l'arc est d'environ 3 % à 5 %. La faible porosité contribue à améliorer la résistance à la corrosion et à l'abrasion du revêtement. L'uniformité de l'épaisseur du revêtement est contrôlée à $\pm 5\mu\text{m}$, ce qui convient aux applications de haute précision.

2.4.3 Résistance du revêtement aux hautes températures et aux chocs thermiques

Les revêtements en molybdène peuvent résister à plus de 1600°C dans des atmosphères non oxydantes, mais ont une résistance limitée aux températures élevées (environ 500°C) dans des atmosphères oxydantes. Les revêtements dopés ou composites peuvent améliorer la résistance aux hautes températures, tels que les revêtements en molybdène dopé au cérium qui fonctionnent de manière stable à 1000°C. La résistance aux chocs thermiques a été évaluée par des tests de cyclage à chaud et à froid, et le revêtement en molybdène était stable de 1000°C à température ambiante jusqu'à 500 cycles.

2.4.4 Rugosité de surface et microstructure des revêtements

La rugosité de surface (R_a) des revêtements de molybdène est généralement comprise entre 0,2 et 2,0 μm , et le procédé HVOF peut obtenir un effet miroir de $R_a \leq 0,2 \mu\text{m}$. La microstructure montre que le revêtement en molybdène est constitué de particules plates empilées en couches d'une taille de grain de 10 à 50 μm . La granulométrie fine contribue à une dureté et une résistance à l'usure accrues.

2.5 CTIA GROUP LTD fil de pulvérisation de molybdène MSDS

Une fiche de données de sécurité (FDS), maintenant communément appelée fiche de données de sécurité (FDS), est un document technique complet qui répond aux exigences de l'Organisation internationale de normalisation (ISO 11014) et du Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques (SGH) pour fournir des informations sur les propriétés physiques et chimiques, les dangers potentiels, l'utilisation en toute sécurité, la sécurité de l'utilisation, la sécurité de l'utilisation. l'entreposage, le transport, le traitement d'urgence et les réglementations connexes d'un produit chimique ou d'une matière. En tant que matériau métallique de haute pureté, le fil de molybdène est largement utilisé dans les processus de projection thermique, et sa fiche signalétique est conçue pour fournir des conseils de sécurité complets aux fabricants, aux utilisateurs, au personnel de transport et aux intervenants d'urgence afin d'assurer la conformité aux normes de santé et de sécurité au travail sur le lieu de travail et pendant le transport.

Partie 1 : Identification chimique et identification commerciale

Nom chimique : Fil de molybdène

CAS number: 7439-98-7

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Utilisation recommandée : Il est utilisé dans les processus de pulvérisation thermique (tels que la pulvérisation à l'arc, la pulvérisation à la flamme) pour former des revêtements résistants à l'usure et aux hautes températures, adaptés à l'aérospatiale, à l'industrie automobile, aux équipements énergétiques, etc.

Restrictions d'utilisation : Non recommandé pour une utilisation dans des atmosphères oxydantes à haute température (>500°C) à moins que des mesures antioxydantes ne soient prises.

Partie 2 : Vue d'ensemble des dangers

Classification SGH : Le fil de pulvérisation de molybdène est un produit chimique non dangereux et n'entre pas dans le champ d'application de la classification des dangers SGH.

Catégorie de danger : Il n'y a pas de classification de danger spécifique, mais des poussières ou des fumées de molybdène peuvent être générées pendant le traitement ou la pulvérisation, ce qui constitue un risque potentiel d'inhalation.

Risques pour la santé : L'inhalation à long terme de poussières de molybdène peut provoquer une irritation respiratoire, et l'exposition à court terme ne présente pas de risques significatifs pour la santé.

Dangers physiques : Le fil de molybdène solide n'est ni inflammable ni explosif, mais il peut présenter un risque d'incendie lorsqu'il fond à haute température pendant le processus de pulvérisation.

Risques environnementaux : Il n'y a pas de dommages environnementaux significatifs, le molybdène est un métal non toxique et les déchets peuvent être recyclés.

Avertissement : Mise en garde

Mention de danger :

H335 : Peut provoquer une irritation respiratoire (poussières provenant du traitement ou de la pulvérisation).

H315 : Une irritation mineure peut survenir en cas de contact prolongé avec la peau.

Mise en garde :

P261 : Eviter d'inhaler des poussières ou des fumées.

P280 : Porter des gants de protection/des lunettes de protection/un équipement de protection respiratoire lors de l'utilisation.

P305+P351+P338 : En cas de contact avec les yeux, rincer à l'eau pendant plusieurs minutes, si les lentilles de contact sont faciles à retirer, retirer et continuer à rincer.

Partie 3 : Informations sur la composition/composition

Composition chimique : Molybdène (Mo), pureté $\geq 99,95\%$

Impuretés : Peut contenir des traces de fer ($Fe < 0,01\%$), de nickel ($Ni < 0,005\%$), de carbone ($C < 0,01\%$), etc.

Éléments de dopage (facultatif) : Certains fils de pulvérisation de molybdène peuvent être dopés avec du lanthane ($La < 1\%$), du cérium ($Ce < 1\%$) ou du potassium ($K < 0,1\%$) pour une meilleure résistance à l'oxydation ou ductilité.

Forme : Fil métallique solide, diamètre 1,0-3,2 mm, surface lisse ou avec une couche d'oxyde trace

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

(fil de molybdène noir).

Partie 4 : Mesures de premiers secours

Contact avec la peau : Si un filament ou une poussière de molybdène entre en contact avec la peau, rincer à l'eau savonneuse et à l'eau sans traitement spécial. En cas d'irritation, consultez rapidement un médecin.

Contact avec les yeux : Si de la poussière de molybdène pénètre dans l'œil, soulevez la paupière et rincez à l'eau courante ou au sérum physiologique pendant au moins 15 minutes. Si l'inconfort persiste, consultez immédiatement un médecin.

Inhalation : Si de la poussière de molybdène ou des vapeurs de pulvérisation sont inhalées, transférez-les immédiatement à l'air frais pour garder les voies respiratoires ouvertes. Si vous avez de la difficulté à respirer, donnez de l'oxygène et consultez un médecin.

Ingestion accidentelle : Le fil de molybdène est un métal solide, et la possibilité d'ingestion accidentelle est extrêmement faible. Si cela se produit, consultez immédiatement un médecin et ne faites pas vomir.

Protection du personnel de premiers secours : Le personnel de premiers secours doit porter des gants et des masques de protection pour éviter d'inhaler de la poussière.

Partie 5 : Mesures de protection contre l'incendie

Méthode d'extinction d'incendie : Le fil de molybdène lui-même est ininflammable, mais la fusion à haute température pendant le processus de pulvérisation peut provoquer un incendie. Utilisez des extincteurs à poudre sèche, à mousse ou à dioxyde de carbone pour éteindre les incendies, et l'utilisation d'eau est interdite (ce qui peut provoquer des explosions de poussière métallique).

Dangers particuliers : Des fumées d'oxyde de molybdène (MoO_3) peuvent être produites à des températures élevées, ce qui est irritant, et un équipement de protection respiratoire est nécessaire.

Précautions contre l'incendie : Les pompiers doivent porter des vêtements de protection intégrale et des respirateurs à pression positive pour éviter d'inhaler des vapeurs toxiques.

Partie 6 : Traitement d'urgence des déversements

Mesures d'urgence : Le fil de molybdène est un matériau solide, aucun risque de fuite de liquide. Si de la poussière de molybdène est générée par traitement ou pulvérisation, isolez immédiatement la zone contaminée pour éviter que la poussière ne se propage.

Méthode de collecte : Utilisez un aspirateur antidéflagrant ou un balayeur humide pour collecter la poussière et éviter la poussière. La poussière collectée doit être scellée dans un conteneur et remise à une organisation professionnelle pour le recyclage.

Protection de l'environnement : La poussière de molybdène a moins d'impact sur l'environnement, mais elle doit être évitée de pénétrer dans les plans d'eau ou le sol.

Protection individuelle : Les personnes qui manipulent l'enfant doivent porter des lunettes de protection, des masques et des gants pour éviter l'inhalation ou l'exposition à la poussière.

Partie 7 : Manipulation, manutention et entreposage

Précautions:

Opérer dans un environnement bien ventilé pour éviter l'accumulation de poussière.

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

Utilisez un équipement de pulvérisation spécialisé, tel que des pistolets à arc électrique, pour vous assurer que l'équipement est mis à la terre afin d'éviter les étincelles statiques.

Éviter l'utilisation directe dans des atmosphères oxydantes à haute température (>500°C) à moins que des mesures antioxydantes ne soient prises.

Équipé d'un système de capture de la poussière pour empêcher la diffusion de la poussière pendant le processus de pulvérisation.

Précautions de stockage :

Stocker dans un entrepôt sec et ventilé à l'abri de l'humidité (pour éviter l'oxydation des surfaces).

La température de stockage est contrôlée à 5-30°C et l'humidité est inférieure à 60 %.

Tenir à l'écart des agents oxydants puissants (par exemple l'acide nitrique, le chlore) et des substances acides.

L'emballage est scellé dans un sac en plastique ou un récipient en métal pour éviter les dommages mécaniques.

Partie 8 : Contrôle de l'exposition/Protection individuelle

Mesures techniques : Utiliser des systèmes d'évacuation locaux ou un équipement de dépoussiérage pour maintenir la concentration de poussière de molybdène dans l'air du lieu de travail en dessous de la PEL de l'OSHA (15 mg/m³, poussière totale).

Protection individuelle :

Protection respiratoire : Portez un masque anti-poussière N95 ou P100 certifié par le NIOSH à des concentrations élevées de poussière.

Protection oculaire : Portez des lunettes de sécurité chimique pour empêcher la poussière de pénétrer dans vos yeux.

Protection de la peau : Portez des gants et une combinaison de protection pour éviter tout contact à long terme.

Autres protections : Les opérateurs de pulvérisation doivent porter des vêtements de protection à haute température pour éviter les brûlures par gouttelettes à haute température.

Limites d'exposition professionnelle :

Chine GBZ 2.1-2019 : La poussière de molybdène TLV-TWA est de 10 mg/m³ (poussière totale).

PEL OSHA : 15 mg/m³ (poussières totales), 5 mg/m³ (poussières respirables).

TLV ACGIH : 10 mg/m³ (poussière respirable), 3 mg/m³ (poussière respirable).

Partie 9 : Propriétés physicochimiques

Aspect et propriétés : fil métallique blanc argenté, surface lisse ou avec une couche d'oxyde trace (fil de molybdène noir).

Point de fusion : 2623 °C

Point d'ébullition : 4639 °C

Densité : 10,28 g/cm³ (20°C)

Conductivité thermique : 138 W/m·K (20°C)

Coefficient de dilatation thermique : 4,8×10⁻⁶/K (20-1000°C).

Résistivité : 5,5×10⁻⁸ Ω·m (20°C)

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

Dureté : dureté Mohs 5,5-6,0, dureté Vickers HV200-250

Solubilité : insoluble dans l'eau, l'acide ou l'alcali, soluble dans l'acide nitrique concentré chaud ou l'eau régale.

Volatilité : Non volatile, mais volatile MoO₃ peut être généré dans une atmosphère oxydante à haute température.

Partie 10 : Stabilité et réactivité

Stabilité : Stable à température ambiante, le MoO₃ peut se former dans une atmosphère oxydante à haute température (>500°C).

Réactivité : Réagit avec des agents oxydants puissants (p. ex. acide nitrique, chlore) pour produire des oxydes ou des halogénures. Évitez tout contact avec des acides et des alcalis forts.

Substances interdites : oxydants forts, gaz halogènes, substances acides.

Produits de décomposition : Peut se décomposer en fumée MoO₃ à haute température, ce qui est irritant.

Partie 11 : Renseignements toxicologiques

Toxicité aiguë : Aucune toxicité aiguë significative, DL50 (voie orale, rat) > 2000 mg/kg.

Toxicité chronique : L'inhalation à long terme de fortes concentrations de poussière de molybdène peut provoquer une irritation respiratoire ou une inflammation pulmonaire sans signe de cancérogénicité (non classé comme cancérogène par le CIRC).

Irritation cutanée : Une exposition à long terme peut provoquer une légère irritation et n'est pas sensibilisante.

Irritation oculaire : La poussière de molybdène peut provoquer une irritation mécanique et n'est pas corrosive.

Toxicité pour la reproduction : Aucune donnée sur la toxicité pour la reproduction ou la tératogénicité.

Autres : Le molybdène est un oligo-élément essentiel pour le corps humain, et une inhalation excessive peut entraîner une augmentation de la concentration sanguine de molybdène, mais il n'y a pas de risque significatif pour la santé.

Partie 12 : Information écologique

Impact environnemental : Le fil de molybdène est un métal solide et ne présente aucun dommage significatif pour l'environnement. Les déchets peuvent être recyclés et éliminés pour éviter de pénétrer dans les plans d'eau ou le sol.

Bioaccumulable : Pas de bioaccumulable.

Écotoxicité : Aucune toxicité significative pour les organismes aquatiques, CL50 (poisson, 96 heures) > 100 mg/L.

Persistance et dégradabilité : Sans objet, le molybdène est un métal non dégradable.

Partie 13 : Élimination

Méthode d'élimination : Les déchets de fil de molybdène doivent être scellés et collectés, remis à une institution de recyclage professionnelle pour élimination, et il est interdit de les jeter à volonté.

Recyclage : Le molybdène est un métal recyclable dont la réutilisation est recommandée par fusion

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

ou purification chimique.

Exigences réglementaires : Conformément à la loi chinoise sur la prévention et le contrôle de la pollution de l'environnement par les déchets solides et à la directive RoHS de l'UE, il est interdit de déverser des déchets dans l'environnement.

SECTION 14 : INFORMATIONS D'EXPÉDITION

Numéro UN : Aucun (non dangereux).

appellation réglementaire : Fil de molybdène.

Catégorie de danger pour le transport : Marchandises non dangereuses, conformément aux exigences du Code maritime international des marchandises dangereuses (IMDG) et de l'Association du transport aérien international (IATA).

Exigences d'emballage : Utilisez des sacs en plastique scellés ou des contenants métalliques pour éviter les dommages mécaniques.

Précautions de transport : Gardez-le au sec pendant le transport et évitez de le mélanger avec des oxydants forts.

Partie 15 : Renseignements réglementaires

Réglementations en Chine :

Respectez les « Règles d'étiquetage et générales pour les produits chimiques dangereux » (GB/T 15258-2009).

Respecter les limites d'exposition professionnelle aux facteurs dangereux sur les lieux de travail (GBZ 2.1-2019).

Réglementations internationales :

Conformément au règlement européen REACH (CE n° 1907/2006), le molybdène n'appartient pas aux SVHC (Substances of Very High Concern).

Conforme aux normes de communication des dangers de l'OSHA (29 CFR 1910.1200).

Répond aux exigences canadiennes du SIMDUT (Système d'information sur les matières dangereuses pour le lieu de travail).

Autres : La production et l'utilisation de fils de molybdène sont soumises au système de gestion environnementale ISO 14001 et au système de gestion de la qualité ISO 9001.

SECTION 16 : INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

Fournisseur : CTIA GROUP LTD

Tél. : 0592-5129696/5129595

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale



CTIA GROUP LTD fil de pulvérisation de molybdène

Chapitre 3 Processus de préparation et de production du fil de pulvérisation de molybdène

3.1 Préparation des matières premières pour le fil de pulvérisation de molybdène

La préparation du fil de pulvérisation de molybdène commence par la sélection et le traitement des matières premières, et le processus de préparation de haute qualité du molybdène, en tant que métal de transition à point de fusion élevé et résistant à la corrosion, détermine directement les performances du produit final. La préparation des matières premières implique l'extraction de composés de molybdène de haute pureté à partir de minerai de [molybdène](#), qui sont à leur tour transformés en [poudres de molybdène de haute pureté](#) adaptées au moulage. Ce processus est non seulement intensif en technologie, mais nécessite également un contrôle sophistiqué des processus pour garantir l'uniformité et la fiabilité des matériaux. Cette section abordera en détail la technologie d'enrichissement et de purification du minerai de molybdène, le processus de production de poudre de molybdène de haute pureté, ainsi que le contrôle de la qualité et les tests de la poudre de molybdène.

3.1.1 Technologie d'enrichissement et de purification du minerai de molybdène

Le molybdène se trouve dans la nature principalement sous forme de [molybdénite \(MoS₂\)](#), un minéral sulfure métallique gris foncé qui est souvent associé à des minéraux métalliques tels que le cuivre, le tungstène et le fer. La répartition des ressources mondiales en minerai de molybdène est relativement concentrée, la Chine, les États-Unis, le Chili et le Pérou étant les principales zones de production, parmi lesquelles la Chine domine avec ses riches réserves et sa production. Le minerai de molybdène de la Chine est principalement distribué à Luanchuan dans le Henan, Jinduicheng dans le Shaanxi et Daheishan dans le Jilin, et le minerai de molybdène produit dans ces zones minières est de bonne qualité, mais contient souvent une variété d'impuretés, qui doivent être séparées par des processus complexes d'enrichissement et de purification.

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

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Spray Wire Introduction

1. Overview of Molybdenum Spray Wire

Molybdenum spray wire is a high-purity molybdenum metal wire that is melted and deposited onto a substrate surface through thermal spray techniques such as flame spraying, plasma spraying, arc spraying, or HVOF (High Velocity Oxy-Fuel). The resulting coating offers excellent resistance to wear, corrosion, and high temperatures. Due to its high melting point and superior performance, molybdenum wire is widely used across various industrial sectors.

2. Characteristics of Molybdenum Spray Wire

High Melting Point: Approximately 2623°C, suitable for high-temperature environments.

Excellent Corrosion Resistance: Resists attack from acids, alkalis, and chemical media.

High Hardness & Wear Resistance: Tough coating that withstands mechanical wear.

Low Friction Coefficient: Reduces component wear and improves efficiency.

Chemical Stability: Maintains performance in harsh environments.

High Thermal Conductivity: Effectively dissipates heat and extends component lifespan.

3. Typical Uses of Molybdenum Spray Wire

Aerospace: Turbine blades, engine parts, thermal barrier coatings.

Automotive Industry: Wear-resistant coatings for piston rings, engine blocks, and brake discs.

Chemical & Energy Sectors: Corrosion-resistant pipelines, heat exchangers, wind power equipment.

Electronics & Semiconductors: Vacuum deposition heating wires, semiconductor leads.

Medical Field: Corrosion-resistant coatings for implants and surgical instruments.

Others: Marine anti-corrosion, wear-resistant construction machinery, high-temperature furnaces.

4. Basic Data of Molybdenum Spray Wire from CTIA GROUP LTD

Purity	≥99.95%
Density	10.2 g/cm ³
Diameter Range	1.0-3.0 mm, customizable
Tensile Strength	Moderate to ensure stable wire feeding
Packaging	Customized Packaging

5. 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

La première étape du processus d'enrichissement est le broyage physique du minerai brut. Le minerai de molybdène extrait est gros et doit généralement être broyé en particules plus petites par des concasseurs à mâchoires et des concasseurs à cône. Ce procédé peut sembler simple, mais il nécessite un contrôle précis des paramètres de l'installation de concassage pour éviter les pertes minérales ou la contamination par la poussière due à un broyage excessif. Les particules de minerai broyées sont introduites dans des équipements de broyage, tels que des broyeurs à boulets ou des broyeurs à barres, où elles sont ensuite broyées en poudres fines. Le but du broyage est de libérer les particules de molybdénite des minéraux associés et de créer les conditions nécessaires à la séparation ultérieure. À ce stade, une attention particulière doit être accordée à l'uniformité de la taille des grains de broyage, car des particules trop grossières réduiront l'efficacité du traitement, tandis que des particules trop fines peuvent augmenter le coût du traitement.

Le processus de base du traitement des minéraux est la technologie de flottation, qui est une méthode de séparation des minéraux en utilisant les différences de propriétés de surface. Pendant la flottation, le minerai finement broyé est mélangé à de l'eau pour former une boue et des produits chimiques spécifiques sont ajoutés, notamment des collecteurs, des agents moussants et des conditionneurs. Les collecteurs (tels que le xanthate ou le terpinéol) s'adsorbent sélectivement à la surface des particules de molybdénite, ce qui les rend hydrophobes ; L'agent moussant produit une mousse stable dans la boue, les particules de molybdénite hydrophobe se fixent aux bulles et flottent à la surface avec la mousse, tandis que les minéraux d'impuretés hydrophiles coulent au fond de la boue. Le processus de flottation nécessite généralement plusieurs cycles, et la teneur de la molybdénite est progressivement augmentée par dégrossissage, sélection et balayage, et enfin un concentré de molybdène de haute pureté est obtenu. Ce concentré a une couleur gris foncé avec un éclat gras, ce qui en fait une matière première idéale pour la purification ultérieure.

Le processus de purification du concentré de molybdène est conçu pour convertir la molybdénite en un composé qui peut être utilisé dans la production de molybdène métallique, généralement de l'oxyde de molybdène (MoO_3). La première étape de la purification est la torréfaction, où le concentré de molybdène est introduit dans un grand four rotatif ou un four à plusieurs chambres où il réagit avec l'oxygène à haute température. Au cours du processus de torréfaction, le soufre contenu dans la molybdénite est oxydé en dioxyde de soufre et libéré, tandis que le molybdène est converti en oxyde de molybdène. Ce processus nécessite un contrôle précis de la température et de l'apport en oxygène pour assurer l'élimination complète du soufre tout en évitant la perte de volatilisation de l'oxyde de molybdène. L'oxyde de molybdène après torréfaction est une poudre jaune ou blanche, mais peut encore contenir des traces de cuivre, de fer ou d'autres impuretés qui nécessitent une purification chimique supplémentaire.

La purification chimique se fait généralement à l'aide d'un procédé de lixiviation à l'ammoniac. L'oxyde de molybdène est dissous dans l'ammoniac pour former une solution de molybdate d'ammonium, tandis que les impuretés insolubles sont filtrées et séparées. Par la suite, le molybdate d'ammonium de haute pureté est précipité de la solution par cristallisation par évaporation ou par précipitation acide. Ce composé est un précurseur idéal pour la production de poudre de molybdène de haute pureté, et sa pureté a un impact direct sur le succès du processus ultérieur. L'ensemble du

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

processus d'enrichissement et de purification reflète la complexité de la technologie métallurgique moderne, du concassage extensif du minerai à la séparation chimique fine, dont chaque étape doit être soigneusement conçue pour garantir la qualité du produit final.

3.1.2 Procédé de production de poudre de molybdène de haute pureté

La poudre de molybdène de haute pureté est le matériau de base du fil de pulvérisation de molybdène, et son processus de production est centré sur la réduction de l'hydrogène, qui vise à convertir l'oxyde de molybdène en molybdène métallique tout en maintenant une pureté extrêmement élevée et des propriétés de particules appropriées. Ce processus nécessite non seulement un support d'équipement avancé, mais également une compréhension approfondie des réactions chimiques et des propriétés des matériaux pour s'assurer que la poudre de molybdène répond aux exigences strictes du fil de pulvérisation de molybdène.

La production de poudre de molybdène de haute pureté commence par le raffinage de l'oxyde de molybdène. L'oxyde de molybdène obtenu par torréfaction peut contenir des traces d'impuretés qui doivent être purifiées par des méthodes chimiques. La lixiviation de l'ammoniac est une méthode de raffinage couramment utilisée, qui peut éliminer efficacement les impuretés telles que le fer, le cuivre et le silicium en contrôlant le pH et la température de la solution. L'oxyde de molybdène raffiné est séché et broyé en fines particules en vue du processus de réduction ultérieur. Chaque processus à ce stade doit être effectué dans un environnement propre pour éviter l'introduction de contaminants externes.

La réduction de l'hydrogène est le processus de base de la production de poudre de molybdène et est généralement réalisée en deux étapes. La première étape est la réduction de l'oxyde de molybdène en dioxyde de molybdène (MoO_2). Cette réaction a lieu dans un four tubulaire ou un four à pousoir, où la poudre d'oxyde de molybdène est placée dans un récipient à haute température et passe lentement à travers la zone de chauffage. Sous la protection d'une atmosphère d'hydrogène, l'oxyde de molybdène réagit avec l'hydrogène pour libérer de la vapeur d'eau et former du dioxyde de molybdène. Ce processus nécessite un contrôle précis de la température du four et du débit d'hydrogène pour s'assurer que la réaction est complète et que les particules ne s'agglomèrent pas. Le dioxyde de molybdène est de couleur brun foncé et lâche en particules, qui est un produit intermédiaire de la deuxième étape de réduction.

La deuxième étape est la réduction supplémentaire du dioxyde de molybdène en poudre de molybdène métallique. Ce processus doit se dérouler à des températures plus élevées, et l'hydrogène continue d'agir comme un agent réducteur, réagissant avec le dioxyde de molybdène pour former du molybdène métallique et de la vapeur d'eau. La conception du four de réduction est cruciale, utilisant souvent plusieurs zones de chauffage pour obtenir une augmentation progressive de la température. La réduction à haute température nécessite non seulement une atmosphère pure dans le four, mais aussi le taux de croissance des particules à contrôler pour éviter la formation de grains surdimensionnés. La poudre finale de molybdène est gris argenté, les particules sont fines et uniformes, et elle a une bonne fluidité et compressibilité.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

La poudre de molybdène réduite doit être tamisée et calibrée pour s'assurer que la taille et la distribution des particules répondent aux exigences du processus d'étirage. Les classificateurs de flux d'air ou les tamis vibrants sont utilisés pour séparer les poudres de différentes tailles de particules, les particules fines étant utilisées pour des applications de haute précision et les particules plus grosses étant retraitées. L'ensemble du processus de production est effectué dans une salle blanche ou un environnement contrôlé afin d'éviter la contamination par la poussière ou l'oxydation. La préparation de la poudre de molybdène n'est pas seulement une combinaison de chimie et d'ingénierie, mais aussi la recherche ultime du détail et de la qualité.

3.1.3 Contrôle de la qualité et essais de la poudre de molybdène

La qualité de la poudre de molybdène détermine directement les performances du fil de pulvérisation de molybdène, de sorte que le contrôle de la qualité et les tests sont les maillons clés de la préparation des matières premières. Ce processus implique une évaluation approfondie de la composition chimique, des propriétés physiques et de la microstructure de la poudre de molybdène pour s'assurer qu'elle répond aux normes industrielles strictes. Le contrôle de la qualité n'est pas seulement l'utilisation de moyens techniques, mais aussi la gestion systématique du processus de production, qui traverse tous les maillons, des matières premières aux produits finis.

La détection des composants chimiques est la tâche principale du contrôle de la qualité. La pureté de la poudre de molybdène est extrêmement élevée, et toute trace d'impuretés peut affecter les performances des processus ultérieurs ou des revêtements finaux. Les méthodes de détection couramment utilisées comprennent la spectroscopie d'émission de plasma à couplage inductif (ICP-OES), qui permet une analyse rapide et précise du contenu élémentaire des poudres de molybdène telles que le fer, le nickel, le carbone et l'oxygène. Le contrôle de la teneur en oxygène est particulièrement important, car trop d'oxygène peut provoquer l'oxydation de la poudre de molybdène à haute température, affectant l'effet d'étirage ou de pulvérisation. La méthode de fusion des gaz inertes est la méthode standard pour mesurer la teneur en oxygène, qui est déterminée avec précision en chauffant un échantillon et en analysant le gaz libéré.

Les propriétés physiques sont testées, notamment la distribution granulométrique, la topographie et la fluidité. La distribution granulométrique affecte le comportement de la poudre de molybdène lors du pressage et du frittage, et les analyseurs de taille de particules laser sont largement utilisés pour mesurer la taille et la distribution des particules. La poudre de molybdène idéale doit avoir une taille de particule uniforme, les particules trop grosses pouvant provoquer des défauts de moulage et les particules trop fines pouvant réduire la fluidité. La microscopie électronique à balayage (MEB) est utilisée pour observer la morphologie de la poudre de molybdène et vérifier si les particules sont régulièrement sphériques ou s'il y a une agglomération. Le test d'écoulement est effectué par un débitmètre à effet Hall pour évaluer la vitesse d'écoulement de la poudre dans l'entonnoir, ce qui est essentiel pour la stabilité du processus de métallurgie des poudres.

Le contrôle de la qualité comprend également une gestion stricte des processus. Chaque lot de poudre de molybdène nécessite une documentation détaillée, y compris l'origine des matières premières, les paramètres de production et les résultats des tests, pour une traçabilité complète. Ce

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

mécanisme de traçabilité permet non seulement d'identifier les problèmes potentiels, mais fournit également un support de données pour l'optimisation des processus. Les normes internationales de système de gestion de la qualité, telles que la norme ISO 9001, fournissent un cadre normatif pour la production de poudre de molybdène, garantissant que chaque étape de l'opération répond aux exigences établies. Grâce à ces mesures, les fabricants sont en mesure de produire des poudres de molybdène avec une qualité constante et d'excellentes performances, posant ainsi une base solide pour la préparation de fils de molybdène revêtus.

3.2 Procédé de formage du fil de molybdène

La conversion d'une poudre de molybdène de haute pureté en fil de molybdène pour la pulvérisation est un processus complexe qui implique un traitement en plusieurs étapes, de la poudre au filament. Les propriétés dures et cassantes du molybdène rendent le processus de formage difficile, nécessitant un équipement sophistiqué et un contrôle du processus pour garantir la résistance, l'uniformité et la qualité de surface du fil. Cette section abordera en détail la technologie de moulage par métallurgie des poudres, le processus de tréfilage au fil de molybdène, le recuit et le soulagement des contraintes, ainsi que le nettoyage et le polissage des surfaces.

3.2.1 Technologie de moulage par métallurgie des poudres

La métallurgie des poudres est le processus de base du formage du fil de molybdène, qui fournit des matières premières pour le tréfilage ultérieur en pressant et en frittant la poudre de molybdène en une ébauche dense. Ce procédé, qui combine compression physique et traitement à haute température, permet d'utiliser efficacement les propriétés de la poudre de molybdène pour produire des ébauches de molybdène à haute résistance.

La première étape de la métallurgie des poudres est le moulage à la presse. La poudre de molybdène de haute pureté est emballée dans un moule en acier spécial et une presse hydraulique applique une pression élevée pour compacter étroitement les particules de poudre afin de former ce que l'on appelle une « billette verte ». La forme verte a une faible résistance et n'est maintenue que par un ajustement mécanique entre les particules, de sorte qu'une attention particulière est nécessaire lors de la manipulation et du traitement. Le processus de pressage nécessite de contrôler l'amplitude et la répartition de la pression pour éviter les fissures ou la densité inégale à l'intérieur de l'ébauche. Certains équipements de pressage avancés adoptent la technologie de pressage isostatique à froid, qui améliore encore la densité et l'uniformité de la billette verte en appliquant une pression uniforme à travers le milieu liquide.

S'ensuit le processus de frittage, dans lequel les billettes vertes sont introduites dans un four à haute température pour le traitement thermique. Le frittage est généralement effectué dans un environnement d'hydrogène ou de vide pour éviter l'oxydation du molybdène à haute température. La température du four de frittage est contrôlée avec précision en dessous du point de fusion du molybdène, ce qui provoque la liaison des particules de poudre par diffusion pour former une structure métallique solide. Le processus de frittage augmente non seulement la densité de l'ébauche, mais améliore également ses propriétés mécaniques, ce qui lui permet de résister à l'usinage ultérieur. L'ébauche de molybdène frittée a une couleur gris argenté, une surface lisse et une structure interne

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

dense, ce qui constitue un point de départ idéal pour le processus de tréfilage.

Les billettes de molybdène fritté nécessitent souvent un travail à chaud supplémentaire, tel que le forgeage à chaud ou le laminage à chaud, pour ajuster leur taille et leur forme. Le forgeage à chaud déforme l'ébauche par martelage ou extrusion, affinant la structure du grain et améliorant la résistance. Le laminage à chaud prépare le processus de tréfilage en roulant l'ébauche en fines tiges de molybdène à travers une série de rouleaux. Ces étapes de travail à chaud doivent être effectuées à des températures élevées pour améliorer la ductilité du molybdène tout en évitant les fractures fragiles causées par le travail à froid. Le succès de la technologie de la métallurgie des poudres réside dans sa transformation de la poudre libre en une ébauche métallique résistante, qui jette les bases de la formation du fil de molybdène.

3.2.2 Procédé de tréfilage au molybdène

Le tréfilage au fil de molybdène est une étape critique dans la transformation des tiges de molybdène en filaments, qui doivent surmonter les caractéristiques dures et cassantes du molybdène pour garantir que le fil a un diamètre uniforme et une surface lisse. Le processus d'étirage est divisé en deux méthodes : le tréfilage monomode et le tréfilage continu multimode, chacune ayant ses propres scénarios d'application et caractéristiques.

3.2.2.1 Tréfilage à matrice unique

Le tréfilage à matrice unique est une méthode d'usinage de haute précision adaptée à la production de petits volumes ou aux scénarios avec des exigences de taille de fil extrêmement élevées. Dans le tréfilage à matrice unique, la tige de molybdène est préchauffée pour améliorer sa ductilité, puis tirée à travers une matrice en carbure ou en diamant par une machine à tréfiler. L'ouverture du moule est légèrement plus petite que le diamètre de la tige de molybdène, et la tige de molybdène est déformée par la force de traction pour réduire progressivement sa section transversale. Après chaque dessin, le diamètre du fil de molybdène diminue légèrement et il faut plusieurs tractions pour atteindre la taille cible.

L'avantage du tréfilage monomatrice réside dans sa grande précision et sa flexibilité. Les paramètres du moule et du processus peuvent être ajustés individuellement pour chaque dessin afin de garantir la taille et la qualité de surface du fil. Les lubrifiants jouent un rôle clé dans le processus de tréfilage, et les lubrifiants couramment utilisés comprennent l'émulsion de graphite ou le disulfure de molybdène, qui peuvent réduire la friction entre la matrice et le fil de molybdène, prolonger la durée de vie de la matrice et améliorer la finition de surface du fil. L'inconvénient du tréfilage à matrice unique est que l'efficacité est faible et qu'il doit être actionné manuellement pour remplacer le moule ou ajuster l'équipement après chaque dessin, ce qui convient à l'aérospatiale et à d'autres domaines avec des exigences de qualité extrêmement élevées.

3.2.2.2 Tréfilage continu multimode

Le tréfilage continu multimode est une méthode de production industrielle efficace adaptée à la production en grand volume de fil de molybdène. Dans ce processus, la tige de molybdène est continuellement tirée à travers une série de moules, chacun avec une diminution progressive du

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

diamètre des pores. La machine à tréfiler est équipée de plusieurs bases de matrice et de dispositifs de traction, et le fil de molybdène entre dans la matrice suivante immédiatement après être passé à travers une matrice pour réaliser un traitement continu. Le tréfilage multimode a un haut degré d'automatisation et assure l'uniformité et la stabilité du fil grâce à un contrôle précis de la tension et à un système de refroidissement.

La clé du dessin multimode réside dans la conception de la séquence de matrices et la coordination des paramètres du processus. La diminution de la taille des pores de la matrice nécessite une planification scientifique pour éviter la rupture du fil ou les défauts pendant le processus d'étirage. Le système de refroidissement est généralement refroidi à l'eau ou à l'air pour éviter que le fil de molybdène ne soit fragilisé en raison d'une température excessive pendant le processus d'étirage. Un approvisionnement continu en lubrifiant est également crucial, souvent en pulvérisant du lubrifiant sur les surfaces de la matrice et du fil via un système de recirculation. L'efficacité de production du tréfilage continu multimode est beaucoup plus élevée que celle du tréfilage monomode, ce qui convient aux scénarios nécessitant un approvisionnement à grande échelle, tels que l'industrie automobile ou les équipements énergétiques.

3.2.3 Recuit du fil de molybdène et soulagement des contraintes

Le processus d'étirage introduit des contraintes résiduelles à l'intérieur du fil de molybdène qui peuvent provoquer des fissures ou des fractures lors du traitement ou de l'utilisation ultérieurs. Le recuit et le soulagement des contraintes sont des étapes essentielles pour restaurer la structure cristalline du fil de molybdène grâce à un traitement thermique, améliorant ainsi sa ductilité et sa ténacité.

Le recuit est généralement effectué dans un four sous vide ou protégé par de l'hydrogène pour éviter l'oxydation de la surface du fil de molybdène. Le fil de molybdène est lentement chauffé à une température spécifique, maintenu pendant un certain temps, puis refroidi progressivement. Ce processus réorganise les grains, éliminant les dislocations et les concentrations de contraintes qui se forment pendant le processus d'étirage. Le choix de la température de recuit est crucial, une température trop élevée peut rendre le grain trop gros et réduire la résistance du fil, tandis qu'une température trop basse ne sera pas efficace pour soulager le stress. Certains procédés de recuit avancés utilisent un chauffage étagé pour ajuster progressivement la microstructure du fil à travers plusieurs étapes de température afin d'optimiser ses propriétés.

Le recuit à l'hydrogène est une méthode couramment utilisée qui non seulement fournit une atmosphère protectrice, mais réagit également avec des traces d'oxydes sur la surface pour nettoyer davantage la surface du fil de molybdène. Le recuit sous vide est plus adapté aux applications de haute précision, car il est exempt de toute impureté gazeuse et garantit la pureté du fil. Le fil de molybdène recuit a une flexibilité considérablement améliorée et une meilleure brillance de surface, ce qui peut répondre aux exigences exigeantes du processus de pulvérisation pour les performances du fil.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

3.2.4 Nettoyage et polissage des surfaces

Après l'étirage et le recuit, des lubrifiants, des oxydes ou d'autres contaminants peuvent rester à la surface du fil de molybdène, ce qui peut affecter la stabilité du processus de pulvérisation et la qualité du revêtement. Le nettoyage et le polissage de surface sont la dernière étape de la formation du fil de molybdène, qui vise à créer une surface de fil lisse et impeccable.

Le processus de nettoyage comprend généralement un nettoyage chimique et un nettoyage par ultrasons. Le nettoyage chimique utilise des solutions légèrement acides ou alcalines, telles que l'acide chlorhydrique dilué ou l'hydroxyde de sodium, pour éliminer les couches d'oxyde et les résidus organiques de la surface. Après le nettoyage, le fil de molybdène doit être soigneusement rincé à l'eau déminéralisée pour éviter les résidus chimiques. Le nettoyage par ultrasons utilise des ondes sonores à haute fréquence pour créer de minuscules bulles dans un liquide qui éclatent avec une force d'impact qui élimine efficacement les particules de taille micronique et l'huile. Le nettoyage par ultrasons est particulièrement adapté aux formes complexes de fils, garantissant que chaque centimètre de la surface est propre et impeccable.

Le polissage est une étape critique dans l'amélioration de la qualité de surface du fil de molybdène et peut être réalisé par polissage mécanique ou électrochimique. Le polissage mécanique utilise des abrasifs fins, tels que de l'alumine ou de la poudre de diamant, pour polir la surface du fil avec une brosse rotative ou une bande abrasive afin d'obtenir un effet miroir. Le polissage électrochimique place le fil de molybdène dans un électrolyte, qui agit comme une anode, et les protubérances microscopiques sur la surface sont préférentiellement dissoutes, ce qui donne une surface lisse. Le fil de molybdène poli a non seulement un aspect brillant, mais réduit également les éclaboussures de gouttelettes fondues pendant le processus de pulvérisation et améliore l'uniformité du revêtement.

3.3 Traitement spécial pour le fil de pulvérisation de molybdène

Le fil de pulvérisation de molybdène nécessite un traitement spécialisé pour répondre aux besoins uniques du processus de pulvérisation thermique. Ces traitements comprennent l'activation de surface, la personnalisation des spécifications et la modification de surface pour optimiser les performances du fil pendant le processus de pulvérisation, garantissant ainsi la qualité du revêtement et l'efficacité de la production.

3.3.1 Traitement d'activation de surface du fil de molybdène

Le traitement d'activation de surface est conçu pour améliorer l'activité chimique et les propriétés physiques de la surface du fil de molybdène, ce qui facilite la fusion et la formation de gouttelettes uniformes pendant le processus de pulvérisation. L'activation peut être réalisée par des méthodes chimiques, plasmatiques ou mécaniques, chacune ayant ses propres avantages uniques.

L'activation chimique utilise généralement des acides ou des lessives dilués pour tremper le fil de molybdène afin d'éliminer les oxydes de surface et d'augmenter la rugosité de surface. Ce traitement rend la surface du fil de molybdène plus hydrophile, ce qui facilite la formation et l'éjection de gouttelettes fondues. L'activation par plasma utilise du plasma à basse température pour bombarder la surface du fil, introduire des groupes fonctionnels actifs et améliorer la réactivité chimique de la

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

surface. Cette méthode est particulièrement adaptée à la pulvérisation de haute précision, car elle ne modifie pas les dimensions ou les propriétés mécaniques du fil. L'activation mécanique augmente la rugosité de la surface et améliore l'adhérence des gouttelettes fondues par micro-sablage ou givrage.

Le processus d'activation doit choisir la méthode appropriée en fonction de l'équipement de pulvérisation et du scénario d'application. Par exemple, la pulvérisation dans le secteur aérospace nécessite une qualité de revêtement extrêmement élevée, souvent avec une activation plasma pour garantir que la surface du filament est propre et très active. Le fil de molybdène activé peut améliorer considérablement l'efficacité de pulvérisation et la force de liaison du revêtement.

3.3.2 Personnalisation des spécifications du fil de molybdène pour la pulvérisation

La diversité des équipements de pulvérisation nécessite un fil de molybdène avec des spécifications personnalisées, notamment le diamètre, la longueur et la composition. La personnalisation des spécifications est le reflet de l'étroite collaboration du fabricant avec le client pour s'assurer que le filament est parfaitement adapté au système de pulvérisation.

Le diamètre du fil de molybdène affecte directement la vitesse d'alimentation du fil et le comportement de fusion. Les filaments plus minces conviennent à la pulvérisation de haute précision et peuvent former un revêtement mince et uniforme ; Les filaments plus grossiers conviennent à une pulvérisation à haute efficacité et peuvent rapidement couvrir de grandes surfaces de substrats. Le fil est généralement fourni en bobines avec des longueurs adaptées aux besoins de l'équipement, assurant une pulvérisation ininterrompue. L'emballage est composé de sacs en plastique scellés sous vide ou de récipients métalliques pour éviter que le fil ne soit humide ou oxydé.

La personnalisation des ingrédients est un autre aspect important. Certaines applications de pulvérisation nécessitent un fil de molybdène dopé avec des éléments de terres rares tels que le lanthane ou le cérium pour améliorer la résistance à l'oxydation ou la ductilité. Le processus de dopage est terminé avant le tréfilage et est réalisé en ajustant la formulation de la poudre de molybdène. Des spécifications personnalisées améliorent non seulement les résultats de pulvérisation, mais prolongent également la durée de vie de l'équipement et réduisent les coûts de maintenance.

3.3.3 Technologie de modification de la surface des fils de molybdène

La technologie de modification de surface optimise davantage les performances de revêtement du fil de molybdène en modifiant ses propriétés chimiques ou physiques. Ces technologies comprennent la silicication, la modification du dopage et les traitements de pré-revêtement pour des problèmes tels que l'oxydation à haute température ou l'instabilité des gouttelettes lors de la pulvérisation.

Le processus de silicication se déroule dans une atmosphère de silicium à haute température pour former une couche protectrice de siliciure de molybdène (MoSi_2). Cette couche protectrice est efficace contre l'oxydation à haute température et prolonge la durée de vie du fil pendant le processus

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

de pulvérisation. La modification du dopage affine la structure du grain et améliore la stabilité à haute température en introduisant des éléments de terres rares ou de métaux alcalins à la surface du fil. Dans le processus de pré-revêtement, un film mince, tel que de l'alumine ou de la zircone, est appliqué à la surface du fil pour réduire la formation d'oxydes pendant le processus de pulvérisation.

Ces technologies de modification doivent être étroitement intégrées au processus de pulvérisation pour s'assurer que la couche modifiée n'affecte pas le comportement d'alimentation ou de fusion du fil. Grâce à la modification de surface, le fil de molybdène peut bien fonctionner dans des environnements de pulvérisation difficiles, répondant aux exigences exigeantes de l'aviation, de l'énergie et d'autres domaines.

3.4 Processus de pulvérisation

Le processus de pulvérisation est le processus central de fusion et de dépôt du fil de molybdène à la surface du substrat, impliquant trois étapes : le prétraitement du substrat, la technologie de pulvérisation thermique et le post-traitement. Chaque étape joue un rôle déterminant dans la qualité et les performances du revêtement.

3.4.1 Prétraitement de surface des substrats

L'état de la surface du substrat a un impact direct sur l'adhérence et la durabilité du revêtement. Le prétraitement utilise des méthodes mécaniques, chimiques et ultrasoniques pour nettoyer et optimiser la surface du substrat et créer des conditions idéales pour la pulvérisation.

3.4.1.1 Sablage mécanique

Le sablage mécanique utilise le jet à grande vitesse d'abrasifs, tels que l'alumine ou le carbure de silicium, pour impacter la surface du substrat, augmenter la rugosité et éliminer les impuretés telles que les oxydes, les anciens revêtements, etc. Le processus de sablage nécessite un contrôle précis du type d'abrasif, de la pression du jet et de l'angle pour éviter d'endommager le substrat. La surface rugueuse améliore l'adhérence mécanique du revêtement sur le substrat et améliore l'adhérence. Le sablage convient aux substrats durs tels que l'acier et les alliages à base de nickel, et constitue une méthode courante de prétraitement par pulvérisation.

3.4.1.2 Nettoyage chimique

Le nettoyage chimique utilise des solvants ou des solutions alcalines pour éliminer l'huile, les lubrifiants et autres matières organiques de la surface du substrat. Les agents de nettoyage couramment utilisés comprennent l'éthanol, l'acétone ou les solutions d'hydroxyde de sodium, qui sont rincées à l'eau désionisée après le nettoyage pour s'assurer qu'il n'y a pas de résidus. Le nettoyage chimique convient aux substrats aux formes complexes et est capable de pénétrer profondément dans les crevasses et les trous pour assurer une surface parfaitement propre. Ce processus nécessite une attention particulière à la sélection des agents de nettoyage pour éviter la corrosion du support.

3.4.1.3 Nettoyage par ultrasons

Le nettoyage par ultrasons utilise des ondes sonores à haute fréquence pour créer de minuscules

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

bulles dans le liquide, qui éclatent avec une force d'impact qui enlève les minuscules particules et résidus de la surface du substrat. Le nettoyage par ultrasons est particulièrement adapté aux composants délicats tels que les aubes de moteurs d'avion ou les pièces d'équipements semi-conducteurs. La solution de nettoyage est généralement de l'eau déminéralisée ou un agent de nettoyage doux, et le temps et la fréquence de nettoyage doivent être ajustés en fonction des caractéristiques du substrat pour garantir des résultats de nettoyage sans endommager la surface.

3.4.2 Technologie de projection thermique

La technologie de projection thermique fait fondre et pulvérise du fil de molybdène sur la surface du substrat à haute température pour former un revêtement protecteur. Les méthodes de pulvérisation thermique couramment utilisées comprennent la pulvérisation à la flamme, la pulvérisation plasma, la pulvérisation à l'arc et la pulvérisation à oxygène à grande vitesse (HVOF).

3.4.2.1 Procédé de pulvérisation à la flamme

La pulvérisation à la flamme utilise une flamme oxygène-acétylène pour chauffer le fil de molybdène afin de le fondre ou de le semi-fondre, qui est ensuite pulvérisé sur la surface du substrat par de l'air comprimé. L'équipement de pulvérisation à la flamme est simple et flexible à utiliser, ce qui convient à la construction sur site ou à la pulvérisation de gros composants. Cependant, en raison de la température de flamme plus basse, la porosité du revêtement est plus élevée et l'adhérence est relativement faible, ce qui convient aux scénarios avec de faibles exigences de performance, tels que la réparation de pièces mécaniques.

3.4.2.2 Procédé de pulvérisation au plasma

La pulvérisation plasma génère un plasma à haute température (jusqu'à 15 000 °C) à travers un arc électrique qui fait fondre rapidement le fil de molybdène et le pulvérise à la surface du substrat à grande vitesse. La pulvérisation plasma crée un revêtement adhésif dense pour les applications hautes performances telles que les équipements aérospatiaux et énergétiques. Un contrôle précis des paramètres du processus est essentiel, notamment le type de gaz plasma, l'intensité du courant et la distance de pulvérisation.

3.4.2.3 Procédé de pulvérisation à l'arc

La pulvérisation à l'arc utilise le chauffage à l'arc entre deux fils de molybdène pour faire fondre le fil et le pulvériser à travers de l'air comprimé sur le substrat. La pulvérisation à l'arc a une efficacité de dépôt élevée et convient à la pulvérisation de grandes surfaces, telles que les structures en acier des ponts ou les composants de navires. La qualité du revêtement dépend de la coordination de la stabilité de l'arc et de la vitesse d'alimentation du fil, et un bon réglage du processus peut améliorer considérablement les performances du revêtement.

3.4.2.4 Oxypulvérisation à grande vitesse (HVOF)

La pulvérisation HVOF produit une flamme à grande vitesse par la combustion d'oxygène et de carburant (par exemple, le kérosène), qui injecte un fil de molybdène fondu sur le substrat à une vitesse supersonique. Les revêtements HVOF ont une porosité extrêmement faible, une dureté et une adhérence élevées, ce qui en fait le premier choix pour les applications haut de gamme telles

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

que les moteurs d'avion et les turbines à gaz. La complexité du processus est élevée, mais ses propriétés de revêtement supérieures le rendent indispensable dans les zones critiques.

3.4.3 Traitement post-pulvérisation

Le traitement post-pulvérisation est conçu pour optimiser les performances des revêtements, y compris le traitement thermique, le polissage et les traitements d'étanchéité.

3.4.3.1 Traitement thermique et recuit

Le traitement thermique améliore la microstructure en chauffant le revêtement sous vide ou sous atmosphère protectrice, éliminant ainsi les contraintes résiduelles. Le processus de recuit renforce l'adhérence du revêtement au substrat et améliore la résistance aux chocs thermiques. La température et le temps de maintien du traitement thermique doivent être ajustés en fonction de l'épaisseur du revêtement et des caractéristiques du substrat afin d'éviter la dégradation des performances due à la surchauffe.

3.4.3.2 Revêtement, polissage et finition

Le polissage lisse la surface du revêtement par des méthodes mécaniques ou électrochimiques, réduisant ainsi la rugosité et le frottement. Le polissage mécanique utilise des abrasifs diamantés, tandis que le polissage électrochimique utilise l'électrolyse pour obtenir un effet miroir. Le revêtement poli est plus performant dans les pièces coulissantes telles que les segments de piston et prolonge considérablement la durée de vie.

3.4.3.3 Traitement d'étanchéité du revêtement

Les traitements d'étanchéité utilisent des mastics organiques (par exemple, époxy) ou inorganiques (par exemple, silice) pour remplir les pores du revêtement et empêcher la pénétration de fluides corrosifs. Les traitements d'étanchéité sont particulièrement adaptés aux revêtements en milieu marin ou chimique et peuvent grandement améliorer la durabilité. Le choix du mastic est basé sur la compatibilité avec le revêtement afin d'assurer une stabilité à long terme.

3.5 Optimisation du processus de production du fil de pulvérisation de molybdène

L'optimisation des processus est la clé de l'amélioration de la qualité et de l'efficacité du fil de pulvérisation de molybdène, ce qui implique le contrôle des paramètres, l'assurance qualité et la fabrication écologique.

3.5.1 Optimisation et contrôle des paramètres du procédé

L'optimisation des processus améliore l'uniformité et les performances du produit en ajustant les paramètres de tréfilage, de pulvérisation, etc. Par exemple, pendant le processus d'étirage, il est nécessaire d'équilibrer la vitesse d'étirage et la tension pour s'assurer que le fil est uniforme ; Pendant le processus de pulvérisation, il est nécessaire d'optimiser la distance de pulvérisation et le débit de gaz pour améliorer la qualité du revêtement. Le système de surveillance en temps réel garantit des paramètres stables et améliore l'efficacité de la production grâce à des capteurs et des mécanismes de retour d'information.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

3.5.2 Système d'assurance de la qualité

Le système d'assurance qualité couvre l'ensemble du processus, des matières premières aux produits finis, conformément à la norme ISO 9001. Y compris les tests de pureté des matières premières, l'inspection de la taille des fils et les tests de performance du revêtement. Le mécanisme de traçabilité des lots permet de retracer les problèmes et d'améliorer en permanence le processus. L'assurance qualité n'est pas seulement une exigence technique, mais aussi le reflet de la réputation de l'entreprise.

3.5.3 Fabrication écologique et technologies d'économie d'énergie

La fabrication écologique met l'accent sur la conservation de l'énergie, la réduction des émissions et le recyclage des ressources. Des équipements efficaces sont utilisés pour réduire la consommation d'énergie, récupérer les particules de molybdène pulvérisées et réduire les déchets. Réduire les émissions de carbone en utilisant des énergies renouvelables pour alimenter les équipements de production. La fabrication verte répond non seulement aux exigences de la protection de l'environnement, mais améliore également la compétitivité des entreprises sur le marché.

3.6 Points techniques clés

La technologie de production du fil de pulvérisation de molybdène est un processus de fabrication haut de gamme qui intègre la science des matériaux, l'ingénierie mécanique et la technologie de traitement de surface, dont l'essentiel est d'assurer la haute pureté du fil de molybdène, les excellentes performances du revêtement et l'efficacité et la cohérence du processus de revêtement. Cette section examinera en profondeur les trois points techniques clés de la préparation du fil de molybdène de haute pureté, du contrôle de la qualité du revêtement par pulvérisation et de l'efficacité et de la cohérence de la pulvérisation, révélant comment ces technologies jouent un rôle essentiel dans la production de fil de pulvérisation de molybdène.

3.6.1 Technologie de préparation du fil de molybdène de haute pureté

Le fil de molybdène de haute pureté est la base du processus de pulvérisation, et sa technologie de préparation détermine directement les propriétés physiques, la stabilité chimique et l'effet de pulvérisation du fil. En tant que métal de transition à haut point de fusion et résistant à la corrosion, le molybdène doit surmonter ses propriétés dures et cassantes et sa grande sensibilité à l'oxygène afin de produire un fil d'une grande pureté et de performances stables.

La préparation du fil de molybdène de haute pureté commence par le traitement de la poudre de molybdène de haute pureté. Comme mentionné précédemment, la poudre de molybdène est obtenue en réduisant l'oxyde de molybdène par l'hydrogène, mais sa pureté et ses propriétés particulières doivent être optimisées pour répondre aux besoins du processus de tréfilage. Au cours du processus de préparation, la poudre de molybdène doit être strictement tamisée et calibrée pour éliminer les particules surdimensionnées ou sous-dimensionnées afin d'assurer une distribution uniforme des particules. Cette uniformité est essentielle pour le pressage et le frittage ultérieurs, car tout grain inégal peut entraîner des défauts internes dans la billette, ce qui peut à son tour affecter la résistance et la ductilité du fil.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Le pressage de la poudre de molybdène adopte la technologie de pressage isostatique à froid, et la poudre est compactée en billette verte en appliquant une pression uniforme à travers un milieu liquide. Cette méthode améliore considérablement la densité et la consistance structurelle de l'ébauche par rapport au pressage unidirectionnel traditionnel. Les billettes vertes pressées sont introduites dans un four de frittage à haute température où elles sont chauffées à un point proche du point de fusion du molybdène dans un environnement d'hydrogène ou de vide. Le processus de frittage lie non seulement les particules de poudre en une structure métallique solide, mais élimine également la porosité interne grâce à la recombinaison et à la diffusion des grains. La conception du four de frittage doit tenir compte de la pureté de l'atmosphère et de l'uniformité de la température afin d'éviter l'oxydation ou la croissance anormale des grains.

La billette de molybdène frittée doit être transformée en tiges de molybdène minces par forgeage à chaud ou laminage à chaud en préparation du processus de tréfilage. Le forgeage à chaud rend la structure du grain de l'ébauche plus dense et améliore sa ductilité grâce à des martelages ou des extrusions répétés. Le laminage à chaud utilise une série de rouleaux pour réduire progressivement le diamètre de la billette afin de produire des tiges de molybdène adaptées au tréfilage. L'ensemble du processus thermique doit être effectué à des températures élevées pour réduire la fragilité du molybdène, mais des températures trop élevées peuvent entraîner une oxydation de surface, il doit donc être utilisé dans une atmosphère protectrice.

Le tréfilage est le maillon central de la préparation du fil de molybdène de haute pureté, et la tige de molybdène est transformée en filament par un processus de tréfilage monomode ou multimode. L'emboutissage à matrice unique convient à la production de fils de faible volume et de haute précision, et la matrice et le lubrifiant doivent être soigneusement ajustés pour chaque dessin afin de s'assurer que la surface du fil est lisse et sans fissures. Le tréfilage continu multimode est plus adapté à la production à grande échelle, et un traitement efficace peut être obtenu par un équipement automatisé. Dans le processus d'étirage, le choix des lubrifiants et le contrôle de la vitesse d'alimentation du fil sont particulièrement importants, et les lubrifiants couramment utilisés tels que l'émulsion de graphite ou le disulfure de molybdène peuvent réduire efficacement l'usure de la matrice et améliorer la qualité du fil. Le fil de molybdène tréfilé doit être recuit pour éliminer les contraintes internes et restaurer la stabilité de la structure cristalline, afin de s'assurer qu'il a de bonnes propriétés mécaniques pendant le processus de pulvérisation.

La technologie de préparation du fil de molybdène de haute pureté exige non seulement la précision du processus, mais également le contrôle complet des matières premières, des équipements et de l'environnement. Par exemple, le hall de production doit être maintenu propre pour éviter que la poussière ou les impuretés ne contaminent le fil ; L'équipement de tréfilage doit être calibré régulièrement pour garantir la précision du diamètre du trou de la matrice. Ensemble, ces détails déterminent la qualité du fil de molybdène, ce qui lui permet de répondre aux besoins d'applications haut de gamme telles que l'aérospatiale et l'industrie automobile.

3.6.2 Contrôle de la qualité des revêtements par pulvérisation

La qualité du revêtement par pulvérisation est un indicateur important pour mesurer le niveau

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

technique de production de fil de pulvérisation de molybdène. Les revêtements de haute qualité nécessitent une excellente adhérence, une épaisseur uniforme et une bonne résistance à l'usure et à la corrosion. Le contrôle de la qualité du revêtement est présent à chaque étape du processus de pulvérisation, du prétraitement du substrat à l'ajustement des paramètres de revêtement en passant par l'inspection du revêtement, garantissant que le produit final répond aux normes industrielles les plus strictes.

Le prétraitement du substrat est le point de départ du contrôle de la qualité du revêtement. La propreté et la rugosité de la surface du substrat affectent directement l'adhérence du revêtement, il est donc nécessaire d'éliminer soigneusement l'huile, les oxydes et autres impuretés par des méthodes telles que le sablage mécanique, le nettoyage chimique et le nettoyage par ultrasons. Le sablage augmente la rugosité de la surface du substrat en projetant un abrasif (tel que l'alumine) à grande vitesse, créant une structure microscopique concave-convexe qui facilite l'accouplement mécanique du revêtement au substrat. Le nettoyage chimique utilise des solvants doux ou des lessives pour éliminer les contaminants organiques, tandis que le nettoyage par ultrasons utilise l'effet d'éclatement de minuscules bulles créées par les ondes sonores à haute fréquence pour éliminer les minuscules particules difficiles à atteindre. Ces étapes de prétraitement doivent être conçues individuellement en fonction du matériau et de la forme du substrat pour garantir un état de surface idéal.

Le contrôle des paramètres dans le processus de pulvérisation est au cœur de la gestion de la qualité. Les paramètres de fonctionnement des équipements de pulvérisation, tels que les pistolets à arc ou les systèmes de pulvérisation plasma, y compris la distance de pulvérisation, le débit de gaz, l'intensité du courant et la vitesse d'alimentation du fil, doivent être coordonnés avec précision. Par exemple, une pulvérisation trop rapprochée peut provoquer une surchauffe du revêtement et des fissures, tandis qu'une pulvérisation trop éloignée peut provoquer un refroidissement trop rapide des gouttelettes et réduire l'adhérence. La régulation du débit de gaz affecte le taux d'injection et l'efficacité de dépôt des gouttelettes fondues, tandis que la sélection de l'intensité du courant détermine le degré de fusion du fil de molybdène. Les équipements de pulvérisation modernes sont souvent équipés d'un système de surveillance en temps réel qui capture des données telles que la température, la pression et la vitesse à travers des capteurs, et ajuste les paramètres à temps pour maintenir la stabilité du processus.

Les tests de qualité des revêtements sont la dernière ligne de défense pour le contrôle de la qualité. Les méthodes d'inspection couramment utilisées comprennent l'analyse microstructurale, les tests d'adhérence et l'évaluation de la résistance à l'abrasion. La microscopie électronique à balayage (MEB) est utilisée pour observer la topographie microscopique des revêtements et vérifier la présence de pores, de fissures ou de particules non fondues. Les essais d'adhérence évaluent la résistance d'un revêtement à un substrat au moyen d'un essai de traction ou de cisaillement, couramment utilisé selon la norme ASTM C633. Le test de résistance à l'abrasion simule l'usure du revêtement en utilisation réelle, et la durabilité du revêtement est mesurée par une machine d'essai de friction. De plus, l'épaisseur et l'uniformité du revêtement sont évaluées à l'aide d'un mesureur d'épaisseur à ultrasons ou d'une analyse par fluorescence X afin de garantir la conformité aux

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

exigences de conception.

Le contrôle de la qualité des revêtements nécessite également la mise en place d'un système complet de gestion de la qualité. Chaque lot de production doit être documenté en détail, y compris les informations sur les matières premières, les paramètres de processus et les résultats des tests, pour une traçabilité complète. Les normes internationales telles que l'ISO 9001 fournissent un cadre normatif pour la gestion de la qualité, garantissant la stabilité du processus de production et la cohérence des produits grâce à des audits réguliers et à une amélioration continue. Cette approche systématique du contrôle de la qualité permet aux revêtements de fil de molybdène de répondre aux besoins d'applications exigeantes, telles que les revêtements résistants à l'usure pour les aubes de turbines à gaz ou les segments de piston automobiles.

3.6.3 Efficacité et régularité de la pulvérisation

L'efficacité et la régularité de la pulvérisation sont des considérations clés dans la technologie de production, ayant un impact direct sur les coûts de production et la qualité du produit. Un processus de pulvérisation efficace permet de déposer de grandes surfaces de revêtement en peu de temps, tandis que la cohérence garantit des performances de revêtement constantes pour chaque composant et évite les défauts causés par les fluctuations du processus.

L'amélioration de l'efficacité de la pulvérisation dépend de l'optimisation des équipements et de l'amélioration des processus. Les systèmes de pulvérisation modernes utilisent une source de chaleur haute puissance, telle que le plasma ou le HVOF, pour faire fondre rapidement le fil de molybdène et former un flux d'égouttement de fusion à grande vitesse, ce qui entraîne des taux de dépôt plus élevés. L'introduction d'un système d'alimentation automatique en fil a considérablement amélioré l'efficacité, car il est capable d'alimenter le fil de molybdène à une vitesse et un angle constants par rapport à l'alimentation manuelle, réduisant ainsi l'erreur de fonctionnement humain. L'efficacité est encore améliorée par l'utilisation de robots de pulvérisation, qui sont capables de déplacer avec précision le pistolet le long d'une trajectoire prédéfinie pour couvrir la surface de substrats de forme complexe pour un dépôt rapide et uniforme du revêtement.

Pour parvenir à l'uniformité, il faut un certain nombre d'approches. Tout d'abord, la qualité du fil de molybdène doit être stable, y compris l'uniformité du diamètre, de la finition de surface et de la composition chimique. Toute incohérence de fil peut entraîner des fluctuations de la taille des gouttelettes ou de la vitesse du jet, affectant la qualité du revêtement. Deuxièmement, la stabilité de l'équipement de pulvérisation est cruciale. L'alimentation électrique, le système d'alimentation en gaz et le système de refroidissement de l'usine nécessitent un entretien régulier pour éviter les écarts de processus dus au vieillissement ou à la défaillance de l'équipement. De plus, le contrôle des facteurs environnementaux ne doit pas être ignoré, et l'atelier de pulvérisation doit maintenir une température et une humidité constantes pour éviter l'influence des conditions extérieures sur le dépôt de gouttelettes de fusion.

La normalisation des paramètres de processus est un moyen important d'assurer la cohérence. En établissant des procédures d'exploitation détaillées (SOP) qui définissent la plage et la méthode de

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

réglage de chaque paramètre, les opérateurs sont en mesure de maintenir des conditions de processus constantes d'un lot à l'autre. La gestion des processus basée sur les données est une tendance de développement ces dernières années, grâce à la technologie IoT et à l'analyse du big data, les données clés du processus de pulvérisation sont collectées en temps réel, les problèmes potentiels sont prédits et intervenus à l'avance. Par exemple, certains systèmes de pulvérisation avancés sont capables d'utiliser des algorithmes d'apprentissage automatique pour optimiser les combinaisons de paramètres afin d'améliorer considérablement l'uniformité du revêtement.

L'équilibre entre l'efficacité et la régularité de la pulvérisation nécessite une combinaison de besoins de production et de facteurs de coût. Une insistance excessive sur l'efficacité peut entraîner une diminution de la qualité du revêtement, tandis qu'une insistance excessive sur la cohérence peut augmenter le temps et les coûts de production. Par conséquent, les fabricants doivent trouver le meilleur équilibre dans la conception des processus pour obtenir une production efficace et de haute qualité grâce à l'innovation technologique et à l'optimisation des processus.

3.7 Application de la technologie de pointe

Avec le développement rapide de la science des matériaux et de la technologie de fabrication, la technologie de production du fil de pulvérisation de molybdène intègre constamment une technologie de pointe pour répondre aux besoins d'applications plus performantes et plus complexes. Cette session discutera de l'application de la technologie de pulvérisation à l'échelle nanométrique, de la technologie de pulvérisation assistée par laser, de la technologie de pulvérisation à froid et des systèmes de pulvérisation intelligents et automatisés, et montrera comment ces technologies avancées peuvent stimuler l'innovation technologique dans l'industrie du fil de pulvérisation de molybdène.

3.7.1 Technologie de pulvérisation à l'échelle nanométrique

La technologie de pulvérisation à l'échelle nanométrique est une méthode avancée pour améliorer les performances en contrôlant la microstructure d'un revêtement jusqu'à l'échelle nanométrique. Alors que la taille des grains des revêtements par pulvérisation conventionnels est généralement de l'ordre du micron, la pulvérisation à l'échelle nanométrique réduit la taille des grains du revêtement à l'échelle nanométrique en optimisant les paramètres du revêtement et les propriétés du matériau. Cette structure à grain fin améliore considérablement la dureté, la ténacité et la résistance à l'usure du revêtement, ce qui le rend excellent dans les environnements extrêmes.

Dans l'application du fil de pulvérisation de molybdène, la technologie de pulvérisation à l'échelle nanométrique est obtenue en ajustant la source de chaleur et le comportement de dépôt des gouttelettes pendant le processus de pulvérisation thermique. La pulvérisation plasma et la pulvérisation HVOF sont des plates-formes technologiques couramment utilisées qui génèrent des gouttelettes de fusion plus fines en contrôlant avec précision la composition du gaz plasma, la puissance de pulvérisation et la vitesse d'injection. Ces gouttelettes se solidifient rapidement à la surface du substrat pour former des structures de grains à l'échelle nanométrique. Pour optimiser davantage les résultats, des poudres ou des dopants de molybdène à l'échelle nanométrique (tels que des nanoparticules de zircone ou d'alumine) sont introduits dans certains processus, qui sont co-

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

déposés avec le fil de molybdène pendant le processus de pulvérisation pour former un revêtement composite.

L'avantage de la technologie de pulvérisation à l'échelle nanométrique est qu'elle peut améliorer considérablement les performances des revêtements. Par exemple, l'application d'un revêtement en molybdène à l'échelle nanométrique sur les aubes de turbine de moteur d'avion peut résister efficacement à l'oxydation à haute température et à l'usure mécanique, et prolonger la durée de vie des composants. De plus, le nano-revêtement a une surface plus lisse et un coefficient de frottement plus faible, ce qui le rend adapté aux pièces coulissantes de haute précision telles que les segments de piston automobiles ou les joints de système hydraulique. Cependant, la technologie de pulvérisation à l'échelle nanométrique est extrêmement exigeante en matière de contrôle des processus, et même le moindre écart dans un paramètre peut entraîner des incohérences dans la taille des grains, nécessitant un équipement de surveillance avancé et un support technique technique.

3.7.2 Technologie de pulvérisation assistée par laser

La technologie de pulvérisation assistée par laser combine la haute densité d'énergie des lasers avec la flexibilité de la pulvérisation thermique pour révolutionner la production de fils de molybdène enduits de pulvérisation. Dans la projection thermique traditionnelle, le fil de molybdène est fondu par flamme, plasma ou arc, tandis que le revêtement assisté par laser utilise un faisceau laser comme source de chaleur auxiliaire ou outil de post-traitement, améliorant considérablement la qualité et la précision du revêtement.

Dans la pulvérisation assistée par laser, le faisceau laser peut fonctionner de manière synchrone avec une source de chaleur de pulvérisation, telle que le plasma ou l'arc, pour préchauffer la surface du substrat ou aider à faire fondre le fil de molybdène. La focalisation élevée du laser se traduit par un apport de chaleur plus concentré, réduisant la zone affectée par la chaleur et réduisant le risque de distorsion thermique du substrat. De plus, le laser est capable de contrôler avec précision la température et le chemin de dépôt des gouttelettes fondues, ce qui permet d'obtenir un revêtement plus uniforme et une porosité plus faible. Certains systèmes avancés utilisent même des lasers pour refondre le revêtement pulvérisé, ce qui affine la microstructure du revêtement en le fondant et en se solidifiant rapidement, améliorant ainsi sa compacité et sa force de liaison.

La technologie de pulvérisation assistée par laser peut être utilisée dans un large éventail d'applications. Dans le secteur aérospatial, la pulvérisation assistée par laser permet de préparer des revêtements de molybdène haute performance sur des substrats en alliage de titane ou de nickel pour la protection des aubes de turbine ou des chambres de combustion. Dans l'industrie de l'énergie, la pulvérisation assistée par laser est utilisée pour créer des revêtements résistants à la corrosion à haute température et prolonger la durée de vie des composants de turbines à gaz ou de chaudières. L'introduction de la technologie laser a également augmenté la flexibilité des processus, permettant de traiter des substrats aux formes complexes, tels que les surfaces courbes ou les structures poreuses. Cependant, le coût de l'équipement laser est élevé et l'opération est complexe, nécessitant des techniciens hautement qualifiés et un système de maintenance complet.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Spray Wire Introduction

1. Overview of Molybdenum Spray Wire

Molybdenum spray wire is a high-purity molybdenum metal wire that is melted and deposited onto a substrate surface through thermal spray techniques such as flame spraying, plasma spraying, arc spraying, or HVOF (High Velocity Oxy-Fuel). The resulting coating offers excellent resistance to wear, corrosion, and high temperatures. Due to its high melting point and superior performance, molybdenum wire is widely used across various industrial sectors.

2. Characteristics of Molybdenum Spray Wire

High Melting Point: Approximately 2623°C, suitable for high-temperature environments.

Excellent Corrosion Resistance: Resists attack from acids, alkalis, and chemical media.

High Hardness & Wear Resistance: Tough coating that withstands mechanical wear.

Low Friction Coefficient: Reduces component wear and improves efficiency.

Chemical Stability: Maintains performance in harsh environments.

High Thermal Conductivity: Effectively dissipates heat and extends component lifespan.

3. Typical Uses of Molybdenum Spray Wire

Aerospace: Turbine blades, engine parts, thermal barrier coatings.

Automotive Industry: Wear-resistant coatings for piston rings, engine blocks, and brake discs.

Chemical & Energy Sectors: Corrosion-resistant pipelines, heat exchangers, wind power equipment.

Electronics & Semiconductors: Vacuum deposition heating wires, semiconductor leads.

Medical Field: Corrosion-resistant coatings for implants and surgical instruments.

Others: Marine anti-corrosion, wear-resistant construction machinery, high-temperature furnaces.

4. Basic Data of Molybdenum Spray Wire from CTIA GROUP LTD

Purity	≥99.95%
Density	10.2 g/cm ³
Diameter Range	1.0-3.0 mm, customizable
Tensile Strength	Moderate to ensure stable wire feeding
Packaging	Customized Packaging

5. 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

3.7.3 Technologie de pulvérisation à froid

La technologie de pulvérisation à froid est une technologie émergente qui perturbe la pulvérisation thermique traditionnelle, et son cœur est de pulvériser des particules solides sur la surface du substrat par un flux d'air à grande vitesse, plutôt que de s'appuyer sur une fusion à haute température. Pour l'application de fil de pulvérisation de molybdène, la technologie de pulvérisation à froid permet de déposer un revêtement à basse température en transformant le fil de molybdène en particules de taille micrométrique ou directement en utilisant de la poudre de molybdène. Cette technologie est unique en ce sens qu'elle évite les problèmes d'oxydation, de transition de phase ou de stress thermique associés aux températures élevées, ce qui la rend particulièrement adaptée aux substrats sensibles à la chaleur.

Au cours du processus de pulvérisation à froid, les particules de molybdène sont accélérées à des vitesses supersoniques (généralement entraînées par l'hélium ou l'azote) pour frapper la surface du substrat avec une énergie cinétique extrêmement élevée. Les particules subissent une violente déformation plastique au moment de l'impact, formant une liaison mécanique ou métallurgique avec le substrat pour former un revêtement dense. Le revêtement pulvérisé à froid a une très faible porosité et une excellente adhérence, tout en conservant la composition chimique d'origine et la structure cristalline du molybdène. Cette propriété rend la projection à froid particulièrement adaptée à la préparation de revêtements en molybdène de haute pureté et résistants à la corrosion pour une utilisation dans des équipements offshore ou chimiques.

Le défi de la technologie de pulvérisation à froid réside dans ses exigences élevées en matière de propriétés des particules et de performances de l'équipement. La taille, la morphologie et la fluidité des particules de molybdène doivent être contrôlées avec précision pour assurer la stabilité du spray et l'uniformité du revêtement. De plus, l'équipement de pulvérisation à froid nécessite un système de gaz à haute pression et une conception de buse sophistiquée, ce qui augmente les coûts de production. Néanmoins, la nature à basse température de la pulvérisation à froid la rend prometteuse pour les applications aérospatiales, électroniques et médicales, telles que la préparation de revêtements fonctionnels pour les alliages d'aluminium ou les substrats polymères.

3.7.4 Systèmes de pulvérisation intelligents et automatisés

L'introduction d'un système de pulvérisation intelligent et automatisé marque l'arrivée de la technologie de production de fil de molybdène vers l'ère de l'industrie 4.0. En intégrant des capteurs, la robotique, l'intelligence artificielle et l'analyse de données volumineuses, ces systèmes ont rendu le processus de pulvérisation automatisé, intelligent et efficace, améliorant considérablement l'efficacité de la production et la qualité des produits.

Le système de pulvérisation automatisé est équipé de pistolets de pulvérisation de haute précision et de dispositifs d'alimentation en fil avec des robots industriels comme noyau, qui peuvent compléter la pulvérisation de substrats complexes selon le chemin prédéfini. Grâce à la reconnaissance visuelle et à la technologie de planification de trajectoire, le robot s'adapte à des substrats de différentes formes et tailles, réduisant ainsi les interventions manuelles. Le capteur surveille les paramètres de pulvérisation tels que la température, la pression et la vitesse des

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

gouttelettes en temps réel et s'ajuste automatiquement grâce à un système de retour d'information pour assurer la stabilité du processus. Certains systèmes avancés intègrent également des capacités d'inspection en ligne pour vérifier l'épaisseur et les défauts des revêtements par balayage laser ou imagerie infrarouge, et identifier les problèmes en temps opportun.

Les systèmes de pulvérisation intelligents vont encore plus loin, en utilisant l'intelligence artificielle et des algorithmes d'apprentissage automatique pour optimiser le processus. Par exemple, les systèmes d'IA sont capables d'analyser les données de pulvérisation historiques pour prédire la meilleure combinaison de paramètres et réduire le coût des tests. La technologie du cloud computing permet de partager les données de plusieurs bases de production, de former une base de données de processus unifiée et d'améliorer la capacité de gestion technique de l'entreprise. En outre, le système intelligent prend également en charge la surveillance et la maintenance à distance, et les opérateurs peuvent consulter l'état de l'équipement en temps réel via des appareils mobiles et réagir rapidement aux pannes.

L'application d'un système de pulvérisation intelligent et automatisé a considérablement amélioré l'efficacité de la production de fil de pulvérisation de molybdène. Dans l'industrie automobile, par exemple, les lignes de pulvérisation automatisées sont capables de traiter en continu des milliers de segments de piston avec une consistance de revêtement de plus de 99 %. Dans le secteur aérospatial, les systèmes intelligents fournissent des solutions de revêtement personnalisées pour les pièces aux géométries complexes et raccourcissent les cycles de production. L'application généralisée de ces technologies a non seulement amélioré la compétitivité de l'industrie, mais a également favorisé le développement de la technologie de pulvérisation dans une direction plus efficace et plus intelligente.

3.8 Défis techniques et solutions

Bien que des progrès significatifs aient été réalisés dans la technologie de production du fil de molybdène, il reste un certain nombre de défis techniques, notamment l'écaillage et la fissuration du revêtement, l'oxydation à haute température et la dégradation des performances, l'équilibre entre les coûts de production et l'efficacité, et l'adaptabilité des substrats complexes. Cette section analysera les causes de ces défis et proposera des solutions pratiques.

3.8.1 Pelage et fissuration du revêtement

L'écaillage et la fissuration du revêtement sont un problème courant dans les applications de fil de pulvérisation de molybdène et sont souvent causés par une adhérence insuffisante du revêtement au substrat, une accumulation de contraintes thermiques ou des défauts dans le revêtement. L'écaillage peut entraîner la défaillance du revêtement, tandis que la fissuration peut déclencher davantage de corrosion ou d'usure, raccourcissant ainsi la durée de vie des composants.

La principale cause de l'épluchage du revêtement est une préparation de surface insuffisante du substrat ou des paramètres de pulvérisation inappropriés. L'huile, les oxydes ou une rugosité inégale à la surface du substrat peuvent affaiblir l'adhérence du revêtement au substrat. Pour résoudre ce problème, il faut améliorer le prétraitement du substrat, le nettoyage en plusieurs étapes et les

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

processus de sablage pour s'assurer que la surface est propre et a la bonne rugosité. De plus, l'optimisation des paramètres de pulvérisation, comme l'abaissement de la température de pulvérisation ou l'ajustement de la distance de pulvérisation, peut réduire le refroidissement rapide des gouttelettes de fusion et améliorer l'adhérence du revêtement.

La fissuration est généralement causée par des contraintes thermiques ou mécaniques. Au cours du processus de pulvérisation, la différence de coefficient de dilatation thermique entre le revêtement en molybdène et le substrat peut entraîner une accumulation de contraintes, en particulier lors du refroidissement à haute température. Les solutions comprennent l'utilisation de techniques de revêtement en gradient pour lisser les différences de coefficient de dilatation thermique en introduisant une couche de transition (par exemple, des alliages à base de nickel) entre le substrat et le revêtement de molybdène. Le traitement thermique et le recuit sont également des méthodes efficaces pour éliminer les contraintes résiduelles et améliorer la ténacité du revêtement grâce à un refroidissement lent. De plus, des processus de pulvérisation améliorés, tels que la pulvérisation à froid avec un faible apport de chaleur, peuvent réduire considérablement la fissuration causée par le stress thermique.

3.8.2 Oxydation à haute température et dégradation du rendement

L'oxydation des revêtements en molybdène à haute température est un autre défi majeur. Le molybdène réagit facilement avec l'oxygène à haute température pour former de l'oxyde de molybdène volatil (MoO_3), ce qui entraîne une dégradation, voire une défaillance du revêtement. Ce problème est particulièrement aigu dans les applications à haute température telles que les moteurs d'avion et les turbines à gaz.

Les solutions pour l'oxydation à haute température comprennent l'application de modifications de surface et de revêtements protecteurs. La silicication est une méthode efficace pour améliorer considérablement la résistance à l'oxydation en formant une couche protectrice de MoSi_2 à la surface du fil ou du revêtement de molybdène. Une autre méthode consiste à doper des éléments de terres rares tels que le lanthane ou le cérium pour améliorer la stabilité à haute température du revêtement en affinant les grains et en formant une couche d'oxyde stable. De plus, les technologies de pré-revêtement, telles que les revêtements en alumine ou en zircone, réduisent la formation d'oxyde pendant le processus de pulvérisation et prolongent la durée de vie du revêtement.

L'optimisation des processus est également un moyen important de faire face à l'oxydation à haute température. Par exemple, l'utilisation d'un gaz inerte (par exemple l'argon) comme atmosphère de pulvérisation peut isoler efficacement l'oxygène et réduire les réactions d'oxydation. L'application de la technologie de pulvérisation à froid évite la fusion à haute température et réduit radicalement le risque d'oxydation. En combinant ces méthodes, les revêtements en molybdène sont capables de maintenir une stabilité de performance à long terme à des températures élevées.

3.8.3 Équilibre entre le coût de production et l'efficacité

Le coût de production du fil de pulvérisation de molybdène est élevé, principalement en raison de la consommation de matières premières, d'équipements et d'énergie. Comment améliorer l'efficacité

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

de la production et réduire les coûts tout en maintenant une qualité élevée est un défi important auquel l'industrie est confrontée.

Le contrôle du coût des matières premières doit commencer par la préparation de la poudre de molybdène. En optimisant le processus d'enrichissement et de purification, le taux de récupération du concentré de molybdène peut être amélioré et les coûts de production peuvent être réduits. De plus, le recyclage des particules d'éclaboussures et des déchets issus du processus de pulvérisation réduit considérablement les déchets de matières premières. La réduction des coûts d'équipement dépend de la promotion de la conception modulaire et de la technologie de localisation. Par exemple, le coût de l'équipement de pulvérisation de plasma localisé est inférieur de 30 % à 50 % à celui de l'équipement importé, et ses performances se rapprochent progressivement du niveau international.

Des gains d'efficacité doivent être réalisés grâce à l'automatisation et aux technologies intelligentes. Les lignes de pulvérisation automatisées réduisent les opérations manuelles et augmentent les vitesses de production, tandis que les systèmes intelligents optimisent les paramètres du processus grâce à l'analyse des données afin de réduire les tests inutiles et les taux de rebut. En outre, l'amélioration de l'efficacité énergétique est également essentielle pour réduire les coûts. L'utilisation de sources de chaleur à haut rendement et de systèmes de refroidissement économes en énergie peut réduire la consommation d'énergie tout en répondant aux exigences de la fabrication écologique.

3.8.4 Adaptabilité de la pulvérisation de substrats complexes

Le revêtement de substrats complexes, tels que des surfaces courbes, des structures poreuses ou des pièces de forme irrégulière, est un défi technique, et il est difficile d'obtenir un dépôt de revêtement uniforme avec les méthodes de revêtement traditionnelles, en particulier dans les pièces de haute précision dans les secteurs aérospatial et médical.

Une solution consiste à utiliser des systèmes de pulvérisation robotisés qui s'adaptent aux géométries complexes du substrat grâce à une planification de mouvement et de trajectoire multi-axes. L'introduction de la technologie de reconnaissance visuelle permet au robot d'ajuster l'angle et la distance de pulvérisation en temps réel pour assurer l'uniformité du revêtement. La pulvérisation assistée par laser est également un moyen efficace de revêtir des surfaces complexes avec une source de chaleur hautement focalisée qui permet un contrôle précis du dépôt de gouttelettes.

L'application de la technologie de pulvérisation à froid sur des substrats complexes est prometteuse. En raison de sa nature à basse température, la pulvérisation à froid est capable de traiter des substrats sensibles à la chaleur, tels que les polymères ou les composites, sans provoquer de déformation ou de dégradation des performances. De plus, le développement de dispositifs de pulvérisation personnalisés et d'outils auxiliaires peut encore améliorer l'adaptabilité du revêtement de substrats complexes, garantissant une couverture complète et cohérente du revêtement.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale



CTIA GROUP LTD fil de pulvérisation de molybdène

Chapitre 4 Classification du fil de pulvérisation de molybdène

En tant que matériau important pour la technologie de projection thermique, les performances et le domaine d'application du fil de molybdène sont diversifiés en raison de différents processus de production, compositions chimiques et scénarios d'utilisation. Afin de mieux comprendre et sélectionner les fils de pulvérisation de molybdène appropriés, il est nécessaire de les classer scientifiquement. Cette section classera en détail le fil de pulvérisation de molybdène à partir des trois dimensions de la pureté, de l'utilisation et du processus de pulvérisation, et discutera des caractéristiques, des méthodes de préparation et des scénarios d'application de divers types de fil de molybdène.

4.1 Classification par pureté

La pureté du fil de molybdène pulvérisé est l'indice central de ses performances, ce qui affecte directement la stabilité chimique, les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion du revêtement. Selon la différence de teneur en molybdène et d'éléments dopés dans le fil de molybdène, il peut être divisé en deux catégories : le fil de molybdène de haute pureté et le fil de molybdène dopé.

4.1.1 Fil de molybdène de haute pureté

Le fil de molybdène de haute pureté fait référence au fil de molybdène avec une teneur en molybdène de 99,95 % ou plus, avec de très faibles impuretés (telles que le fer, le nickel, le carbone, l'oxygène), et répond généralement aux exigences des normes nationales (telles que GB / T 4181-2017) ou des normes internationales (telles que ASTM B387-18). Le fil de molybdène de haute pureté est préparé par un processus de purification en plusieurs étapes, comprenant la lixiviation de l'ammoniac, la réduction de l'hydrogène et la fusion sous vide, afin de garantir l'élimination efficace

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

des impuretés à l'état de traces.

Particularité:

Haute stabilité chimique : Le fil de molybdène de haute pureté présente une excellente résistance à l'oxydation et aux produits chimiques dans des environnements à haute température et corrosifs, ce qui le rend adapté aux applications exigeantes.

Excellente conductivité thermique : une pureté élevée réduit la diffusion des impuretés au niveau des joints de grains et améliore la conductivité thermique, ce qui la rend adaptée aux revêtements qui nécessitent une gestion thermique efficace.

Microstructure uniforme : le grain du fil de molybdène de haute pureté est fin et uniformément réparti, la densité du revêtement est élevée et la porosité est faible.

Coût élevé : En raison du processus de purification complexe, le coût de production du fil de molybdène de haute pureté est élevé, ce qui convient au marché haut de gamme.

Processus de préparation : La production de fil de molybdène de haute pureté commence par de la poudre de molybdène de haute pureté. La poudre de molybdène est préparée dans une atmosphère réductrice étroitement contrôlée par un four de réduction d'hydrogène, puis pressée dans une billette de molybdène à l'aide d'un procédé de métallurgie des poudres. La billette de molybdène subit des processus de frittage à haute température, de laminage à chaud et de tréfilage multi-fils pour réduire progressivement le diamètre et enfin former un filament. Des moules de haute précision et des lubrifiants à émulsion de graphite sont utilisés pendant le processus d'étirage pour garantir que la surface du fil est lisse et sans défaut. Le processus de recuit est effectué sous vide ou sous protection hydrogène, ce qui soulage les contraintes internes et optimise les propriétés mécaniques. Le nettoyage de surface utilise des méthodes chimiques ou ultrasoniques pour éliminer les lubrifiants et les oxydes résiduels, assurant ainsi un haut niveau de propreté des filaments.

Scénario d'application : Le fil de molybdène de haute pureté est largement utilisé dans les domaines où les exigences en matière de performances de revêtement sont extrêmement élevées. Par exemple, dans le secteur aérospatial, les revêtements préparés avec du fil de molybdène de haute pureté sont utilisés dans les pales de turbine et les chambres de combustion pour résister à l'oxydation à haute température et à l'usure mécanique ; Dans l'industrie des semi-conducteurs, le fil de molybdène de haute pureté est utilisé pour le revêtement sous vide du fil chauffant afin de s'assurer qu'il n'y a pas de contamination par les impuretés pendant le processus de revêtement ; Dans l'industrie chimique, les revêtements en molybdène de haute pureté protègent les réacteurs et les pipelines contre l'érosion des milieux acides.

4.1.2 Fil de molybdène dopé

Le fil de molybdène dopé est un fil de molybdène qui ajoute des oligo-éléments tels que des éléments de terres rares, des particules de céramique ou d'autres métaux à la matrice de molybdène pour améliorer des propriétés spécifiques. Les éléments dopés courants comprennent l'oxyde de lanthane (La_2O_3), l'oxyde d'yttrium (Y_2O_3), le potassium (K) ou le carbure de silicium (SiC). Le montant du dopage est généralement contrôlé entre 0,1 % et 2 % pour équilibrer l'amélioration des performances et le contrôle des coûts.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Particularité:

Performances améliorées à haute température : le fil de molybdène dopé avec des éléments de terres rares (par exemple, le dopage à l'oxyde de lanthane) forme une couche protectrice d'oxyde stable à haute température, améliorant considérablement la résistance à l'oxydation.

Propriétés mécaniques améliorées : Les éléments dopés affinent les grains, améliorent la résistance à la traction et la ténacité, et réduisent le risque de rupture des filaments pendant le processus de pulvérisation.

Caractéristiques personnalisées : Le fil de molybdène dopé peut être adapté aux exigences de l'application, telles que l'augmentation de la résistance à l'usure ou la diminution du coefficient de frottement.

Coût modéré : par rapport au fil de molybdène de haute pureté, le coût de production du fil de molybdène dopé est légèrement inférieur, ce qui convient aux applications industrielles à grande échelle.

Processus de préparation : La préparation du fil de molybdène dopé introduit des éléments dopés dans l'étape de production de la poudre de molybdène. Par exemple, un fil de molybdène dopé à l'oxyde de lanthane est produit en mélangeant une solution d'oxyde de lanthane avec du molybdate d'ammonium pour produire de la poudre de molybdène dopée, qui est ensuite réduite. La poudre de molybdène dopée est transformée en fil de molybdène par pressage, frittage et étirage. Pendant le processus de frittage, la température et l'atmosphère doivent être contrôlées avec précision pour s'assurer que les éléments dopants sont uniformément répartis et non volatils. Le processus d'étirage et de recuit est similaire à celui du fil de molybdène de haute pureté, mais les paramètres doivent être ajustés pour tenir compte de l'effet des éléments de dopage sur la dureté du matériau. Une attention particulière doit être accordée au traitement de surface pour éviter la perte d'éléments dopants pendant le processus de nettoyage.

Scénarios d'application : Le fil de molybdène dopé est largement utilisé dans des scénarios industriels spécifiques en raison de son optimisation ciblée des performances. Par exemple, le fil de molybdène dopé à l'oxyde de lanthane est utilisé pour le revêtement résistant aux hautes températures des aubes de turbine à gaz afin de prolonger la durée de vie des composants ; En raison de sa haute ténacité, le fil de molybdène dopé au potassium convient au revêtement résistant à l'usure des segments de piston d'automobile ; Le fil de molybdène dopé au carbure de silicium est utilisé dans les équipements offshore pour offrir une excellente résistance à l'usure et à la corrosion. La diversification du fil de molybdène dopé lui permet de trouver un équilibre entre coût et performance, et est particulièrement adapté au marché du milieu et du haut de gamme.

4.2 Classification par utilisation

Le fil de pulvérisation de molybdène peut être divisé en deux catégories : le fil de molybdène pour la pulvérisation industrielle et le fil de molybdène pour le revêtement fonctionnel en fonction de son utilisation finale. Cette classification reflète les exigences de performance et la conception du revêtement du fil de molybdène dans différents scénarios d'application.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

4.2.1 Fil de molybdène pour la pulvérisation industrielle

Le fil de molybdène pour la pulvérisation industrielle est principalement utilisé pour préparer des revêtements protecteurs, qui sont conçus pour améliorer la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et la résistance aux hautes températures du substrat. Ce type de fil de molybdène est largement utilisé dans la production industrielle à grande échelle, mettant l'accent sur la fiabilité et la rentabilité du revêtement.

Particularité:

Haute durabilité : Les revêtements industriels par pulvérisation doivent résister à l'abrasion mécanique, aux attaques chimiques ou aux chocs à haute température, et les fils de molybdène doivent avoir des propriétés mécaniques et chimiques stables.

Efficacité de dépôt élevée : La pulvérisation industrielle se concentre sur l'efficacité de la production, et le fil de molybdène doit être adapté à un système d'alimentation automatique du fil pour assurer un processus de pulvérisation continu et stable.

Polyvalence : Le fil de molybdène pour la pulvérisation industrielle est généralement conforme aux spécifications standard et convient à une variété de substrats (par exemple, l'acier, l'aluminium, la céramique).

Économie : Les performances et le coût du revêtement doivent être équilibrés, et le fil de molybdène pour la pulvérisation industrielle est principalement un fil de molybdène de haute pureté ou légèrement dopé.

Processus de préparation et d'application : Le processus de préparation du fil de molybdène pour la pulvérisation industrielle est relativement standardisé, utilisant de la poudre de molybdène de haute pureté ou de la poudre de molybdène légèrement dopée, fabriquée par métallurgie des poudres, tréfilage et recuit. Le processus de pulvérisation est principalement la pulvérisation à la flamme et la pulvérisation à l'arc, qui convient au dépôt de revêtement de grande surface en raison de son équipement simple et de son faible coût. Au cours du processus de pulvérisation, le fil de molybdène pénètre dans le pistolet de pulvérisation à une vitesse constante à travers le dispositif d'alimentation en fil, et après fusion, il forme des gouttelettes fondues, qui sont pulvérisées à la surface du substrat. Les traitements post-revêtement, tels que le polissage ou le traitement thermique, peuvent optimiser davantage les performances.

Scénario d'application : Le fil de molybdène pour la pulvérisation industrielle est largement utilisé dans les domaines suivants :

Industrie automobile : revêtements résistants à l'usure et à haute température pour les segments de piston, les blocs-cylindres et les systèmes d'échappement afin d'améliorer l'efficacité et la longévité des moteurs.

Industrie de l'énergie : Protège les tuyaux de chaudière, les échangeurs de chaleur et les composants d'éoliennes contre la corrosion et l'usure.

Marine et offshore : Fournit des revêtements anticorrosion pour les hélices et les coques afin de prolonger la durée de vie des équipements marins.

Machines de construction : Godets d'excavatrice et revêtements de surface pour équipements lourds pour une meilleure résistance à l'usure et aux chocs.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Spray Wire Introduction

1. Overview of Molybdenum Spray Wire

Molybdenum spray wire is a high-purity molybdenum metal wire that is melted and deposited onto a substrate surface through thermal spray techniques such as flame spraying, plasma spraying, arc spraying, or HVOF (High Velocity Oxy-Fuel). The resulting coating offers excellent resistance to wear, corrosion, and high temperatures. Due to its high melting point and superior performance, molybdenum wire is widely used across various industrial sectors.

2. Characteristics of Molybdenum Spray Wire

High Melting Point: Approximately 2623°C, suitable for high-temperature environments.

Excellent Corrosion Resistance: Resists attack from acids, alkalis, and chemical media.

High Hardness & Wear Resistance: Tough coating that withstands mechanical wear.

Low Friction Coefficient: Reduces component wear and improves efficiency.

Chemical Stability: Maintains performance in harsh environments.

High Thermal Conductivity: Effectively dissipates heat and extends component lifespan.

3. Typical Uses of Molybdenum Spray Wire

Aerospace: Turbine blades, engine parts, thermal barrier coatings.

Automotive Industry: Wear-resistant coatings for piston rings, engine blocks, and brake discs.

Chemical & Energy Sectors: Corrosion-resistant pipelines, heat exchangers, wind power equipment.

Electronics & Semiconductors: Vacuum deposition heating wires, semiconductor leads.

Medical Field: Corrosion-resistant coatings for implants and surgical instruments.

Others: Marine anti-corrosion, wear-resistant construction machinery, high-temperature furnaces.

4. Basic Data of Molybdenum Spray Wire from CTIA GROUP LTD

Purity	≥99.95%
Density	10.2 g/cm ³
Diameter Range	1.0-3.0 mm, customizable
Tensile Strength	Moderate to ensure stable wire feeding
Packaging	Customized Packaging

5. 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

4.2.2 Fil de molybdène pour revêtement fonctionnel

Le fil de molybdène pour les revêtements fonctionnels est utilisé pour préparer des revêtements ayant des fonctions spécifiques, telles que des revêtements autolubrifiants, conducteurs d'électricité, de barrière thermique ou biocompatibles. Ces fils de molybdène sont généralement destinés aux applications haut de gamme et nécessitent des propriétés personnalisées pour répondre à des exigences techniques spécifiques.

Particularité:

Fonctionnalité spéciale : Les revêtements fonctionnels sont conçus pour des applications spécifiques, telles que le faible frottement, la conductivité électrique ou la résistance aux chocs thermiques.

Exigences de haute précision : le revêtement doit avoir une épaisseur et une microstructure précises, et la taille et la qualité de surface du fil de molybdène sont extrêmement élevées.

Procédé complexe : La technologie de pulvérisation avancée (telle que la pulvérisation plasma, HVOF) est souvent utilisée pour les revêtements fonctionnels, qui ont des exigences strictes sur le comportement de fusion et l'efficacité de dépôt du fil de molybdène.

Haute valeur ajoutée : le fil de molybdène pour le revêtement fonctionnel est principalement utilisé dans les domaines de haute technologie, avec une valeur marchande élevée mais un coût de production élevé.

Processus de préparation et d'application : La préparation du fil de molybdène pour le revêtement fonctionnel doit être personnalisée en fonction de la fonction de revêtement. Par exemple, le fil de molybdène pour les revêtements autolubrifiants peut être dopé avec du disulfure de molybdène ou du graphite, et le fil de molybdène pour les revêtements de barrière thermique peut être composé de particules de céramique. Le processus de préparation comprend un tréfilage de haute précision et un recuit en plusieurs étapes pour assurer l'uniformité et la stabilité du fil. Le processus de pulvérisation est principalement la pulvérisation plasma, HVOF ou pulvérisation à froid, ce qui permet un contrôle précis de la microstructure et des propriétés du revêtement. Un prétraitement fin du support (par exemple sablage ou nettoyage par ultrasons) est nécessaire avant la pulvérisation pour garantir l'adhérence du revêtement. Le traitement post-revêtement peut inclure la refonte ou le scellement au laser pour optimiser les propriétés fonctionnelles.

Scénario d'application : Le fil de molybdène pour le revêtement fonctionnel a un large éventail d'applications dans les domaines suivants :

Aérospatiale : Les revêtements thermiques sont utilisés sur les aubes de turbine pour protéger les composants des températures élevées et de l'oxydation. Les revêtements conducteurs sont utilisés pour les pièces de contact électrique des engins spatiaux.

Électronique et semi-conducteurs : Le revêtement en molybdène est utilisé pour chauffer les fils dans les équipements de revêtement sous vide afin d'assurer un revêtement de haute pureté ; Les revêtements autolubrifiants sont utilisés pour glisser des composants électroniques à grande vitesse.

Médical : des revêtements en molybdène biocompatibles sont utilisés dans les articulations artificielles et les implants pour réduire la corrosion des fluides corporels ; Les revêtements antimicrobiens sont utilisés pour les outils chirurgicaux.

Fabrication additive : Le revêtement en molybdène protège la buse d'impression 3D contre l'usure

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

du matériau fondu à haute température.

4.3 Classification selon le procédé de pulvérisation

Selon le processus de pulvérisation applicable, le fil de molybdène peut être divisé en fil de molybdène pour la pulvérisation à la flamme, fil de molybdène pour la pulvérisation à l'arc, fil de molybdène pour la pulvérisation de plasma, fil de molybdène pour la pulvérisation d'oxygène à grande vitesse (HVOF) et fil de molybdène pour la pulvérisation à froid. Cette classification reflète les exigences de performance et les caractéristiques de processus du fil de molybdène dans différentes technologies de pulvérisation.

4.3.1 Fil de molybdène pour la pulvérisation à la flamme

La pulvérisation à la flamme est un procédé de pulvérisation traditionnel qui utilise une flamme oxy-acétylène pour chauffer le fil de molybdène, le faire fondre et le pulvériser sur la surface du substrat. Le fil de molybdène pour la pulvérisation à la flamme doit avoir un comportement de fusion stable et des propriétés mécaniques modérées.

Particularité:

Processus simple : L'équipement de pulvérisation à la flamme a un faible coût, une utilisation facile et convient à la construction sur site.

Propriétés de revêtement modérées : Le revêtement a une porosité élevée et une adhérence moyenne, ce qui le rend adapté aux applications industrielles générales.

Les exigences pour le fil de molybdène sont faibles : le diamètre est généralement de 1,6 à 3,0 mm, la surface doit être lisse, mais les exigences de pureté sont relativement lâches.

Processus de préparation et d'application : Le fil de molybdène pour la pulvérisation à la flamme est principalement composé de fil de molybdène de haute pureté ou légèrement dopé, qui est préparé par un processus de tréfilage standard. Au cours du processus de pulvérisation, le fil de molybdène pénètre dans le pistolet de pulvérisation par le dispositif d'alimentation en fil, la flamme oxyacétylène le fait fondre et l'air comprimé pulvérise les gouttelettes fondues sur le substrat. Après le revêtement, il doit être poli ou scellé pour réduire la porosité.

Scénarios d'application :

Réparation de pièces automobiles (par exemple, vilebrequins, pistons).

Revêtements résistants à l'abrasion pour les machines de construction (par exemple, godets d'excavatrice).

Revêtement anticorrosion pour structure en acier de pont.

4.3.2 Fil de molybdène pour la pulvérisation à l'arc

La pulvérisation à l'arc utilise une chaleur d'arc formée entre deux fils de molybdène pour faire fondre le fil et le pulvériser sur la surface du substrat. Le fil de molybdène pour la pulvérisation à l'arc doit avoir une conductivité élevée et des performances d'alimentation de fil stables.

Particularité:

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Efficacité de dépôt élevée : la vitesse de pulvérisation à l'arc est rapide et convient aux revêtements de grande surface.

Qualité de revêtement supérieure : Le revêtement a une porosité plus faible et une adhérence plus forte que la pulvérisation à la flamme.

Conception à double fil : deux fils de molybdène doivent être alimentés de manière synchrone et la consistance du diamètre du fil doit être élevée.

Processus de préparation et d'application : Le fil de molybdène pour la pulvérisation à l'arc est généralement un fil de molybdène de haute pureté d'un diamètre de 1,6 à 2,0 mm. Le processus de préparation se concentre sur la précision dimensionnelle et la finition de surface du fil pour assurer la stabilité de l'arc. L'équipement de pulvérisation est équipé d'un système d'alimentation à double fil pour contrôler avec précision la vitesse d'alimentation du fil.

Scénarios d'application :

Revêtements anticorrosion pour les navires (par exemple, coques, ponts).

Revêtement résistant à l'usure pour les pales d'éoliennes.

Revêtement de protection pour ponts en acier.

4.3.3 Fil de molybdène pour la pulvérisation de plasma

La pulvérisation plasma utilise du plasma à haute température (jusqu'à 15 000 °C) pour faire fondre le fil de molybdène afin de former un revêtement haute performance. Le fil de molybdène pour la pulvérisation au plasma nécessite une pureté et une précision élevées.

Particularité:

Haute qualité de revêtement : revêtement dense, faible porosité, forte adhérence.

Procédé complexe : coûts d'équipement élevés et contrôle précis des paramètres plasma.

Exigences élevées pour le fil de molybdène : une grande pureté et aucun défaut de surface sont requis.

Processus de préparation et d'application : Le fil de molybdène pour la pulvérisation au plasma est constitué d'un fil de molybdène de haute pureté d'un diamètre de 1,0 à 2,0 mm, et la surface est polie électrochimiquement. Le plasma est généré par un gaz inerte (par exemple l'argon) dans l'équipement de pulvérisation, et le fil de molybdène est fondu dans un flux de plasma à haute température pour former un revêtement très dense après dépôt.

Scénarios d'application :

Revêtement barrière thermique pour aubes de turbines de moteurs d'avion.

Revêtements conducteurs pour dispositifs à semi-conducteurs.

Revêtement résistant à la corrosion pour les réacteurs à haute température.

4.3.4 Fil de molybdène pour l'oxypulvérisation à grande vitesse (HVOF).

La pulvérisation HVOF dépose un revêtement de molybdène à travers une flamme supersonique, qui a une dureté élevée et une forte adhérence. Le fil de molybdène pour HVOF doit être résistant à

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

l'injection à haute température et à haute pression.

Particularité:

Performances de revêtement ultra-élevées : La porosité du revêtement est extrêmement faible et la dureté est proche de celle des revêtements céramiques.

Exigences élevées en matière d'équipement : un carburant à haute pression et des systèmes de contrôle précis sont nécessaires.

Le fil de molybdène a une forte stabilité : il doit résister à l'impact du jet à grande vitesse.

Processus de préparation et d'application : La plupart des fils de molybdène pour HVOF sont des fils de molybdène de haute pureté ou dopés, et le processus de préparation optimise la ténacité et la qualité de surface des fils. L'équipement de pulvérisation utilise de l'oxygène et du carburant, comme le kérosène, pour créer une flamme supersonique, où le fil de molybdène fond à haute température et se dépose à grande vitesse.

Scénarios d'application :

Revêtement résistant à l'usure pour les aubes de turbines à gaz.

Revêtement de haute dureté pour les pièces hydrauliques aérospatiales.

Revêtement résistant à la pression pour les équipements en haute mer.

4.3.5 Fil de molybdène pour la pulvérisation à froid

La pulvérisation à froid accélère le dépôt de particules de molybdène à travers des gaz à ultra-haute vitesse pour former un revêtement à basse température. Le fil de molybdène pour la pulvérisation à froid doit être fin et uniforme.

Particularité:

Procédé à basse température : évite l'oxydation et convient aux substrats sensibles à la chaleur.

Forte protection de l'environnement : pas de gaz d'échappement, conformément à une fabrication écologique.

Exigences particulières pour le fil de molybdène : des particules fines ou sous forme de poudre sont nécessaires.

Processus de préparation et d'application : Le molybdène pour la pulvérisation à froid doit être préparé par broyage spécial ou atomisation de gaz, et la taille des particules est contrôlée au niveau du micron. L'équipement de pulvérisation utilise des gaz à haute pression, tels que l'azote, pour accélérer les particules qui se déposent à la surface du substrat pour former un revêtement dense.

Scénarios d'application :

Revêtements thermoconducteurs pour composants électroniques.

Réparation de substrat en alliage d'aluminium.

Revêtements biocompatibles pour dispositifs médicaux.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale



CTIA GROUP LTD fil de pulvérisation de molybdène

Chapitre 5 Utilisations du fil de pulvérisation de molybdène

Le fil de molybdène joue un rôle irremplaçable dans de nombreux domaines industriels en raison de son point de fusion élevé, de sa résistance à la corrosion et de ses excellentes propriétés mécaniques. Les revêtements de molybdène sont déposés à la surface des substrats par des techniques de pulvérisation thermique telles que la pulvérisation à la flamme, la pulvérisation au plasma, la pulvérisation à l'arc et la pulvérisation d'oxygène à grande vitesse, ce qui peut améliorer considérablement la résistance à l'usure, la résistance aux hautes températures et la résistance à la corrosion des composants. Ce chapitre abordera en détail le large éventail d'applications du fil de pulvérisation de molybdène dans l'aérospatiale, l'automobile, la chimie et l'énergie, l'électronique et les semi-conducteurs, la médecine et la bio-ingénierie, ainsi que dans d'autres domaines, démontrant ainsi sa valeur diversifiée dans l'industrie moderne.

5.1 Domaine aérospatial

L'industrie aérospatiale a des exigences extrêmement strictes en matière de propriétés des matériaux, et les composants doivent fonctionner de manière stable à des températures élevées, à des pressions élevées et dans des environnements hautement corrosifs. En raison de ses excellentes performances à haute température et de sa résistance à l'oxydation, le fil de pulvérisation de molybdène est largement utilisé dans la préparation de revêtements pour les composants clés des moteurs d'avion et des engins spatiaux. Cette section aborde les applications spécifiques du fil de pulvérisation de molybdène dans les aubes de turbine et les composants de moteur, les pièces structurelles à haute température et les revêtements de barrière thermique, ainsi que les revêtements résistants à l'usure et anticorrosion pour les engins spatiaux.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Spray Wire Introduction

1. Overview of Molybdenum Spray Wire

Molybdenum spray wire is a high-purity molybdenum metal wire that is melted and deposited onto a substrate surface through thermal spray techniques such as flame spraying, plasma spraying, arc spraying, or HVOF (High Velocity Oxy-Fuel). The resulting coating offers excellent resistance to wear, corrosion, and high temperatures. Due to its high melting point and superior performance, molybdenum wire is widely used across various industrial sectors.

2. Characteristics of Molybdenum Spray Wire

High Melting Point: Approximately 2623°C, suitable for high-temperature environments.

Excellent Corrosion Resistance: Resists attack from acids, alkalis, and chemical media.

High Hardness & Wear Resistance: Tough coating that withstands mechanical wear.

Low Friction Coefficient: Reduces component wear and improves efficiency.

Chemical Stability: Maintains performance in harsh environments.

High Thermal Conductivity: Effectively dissipates heat and extends component lifespan.

3. Typical Uses of Molybdenum Spray Wire

Aerospace: Turbine blades, engine parts, thermal barrier coatings.

Automotive Industry: Wear-resistant coatings for piston rings, engine blocks, and brake discs.

Chemical & Energy Sectors: Corrosion-resistant pipelines, heat exchangers, wind power equipment.

Electronics & Semiconductors: Vacuum deposition heating wires, semiconductor leads.

Medical Field: Corrosion-resistant coatings for implants and surgical instruments.

Others: Marine anti-corrosion, wear-resistant construction machinery, high-temperature furnaces.

4. Basic Data of Molybdenum Spray Wire from CTIA GROUP LTD

Purity	≥99.95%
Density	10.2 g/cm ³
Diameter Range	1.0-3.0 mm, customizable
Tensile Strength	Moderate to ensure stable wire feeding
Packaging	Customized Packaging

5. 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

5.1.1 Aubes de turbine et composants du moteur

Les aubes de turbine d'un moteur d'avion sont les composants de base d'un moteur d'avion et sont soumises à des températures, des pressions et des contraintes mécaniques extrêmement élevées. Le revêtement en molybdène préparé par fil de pulvérisation de molybdène est devenu un choix idéal pour la protection de surface des aubes de turbine en raison de sa dureté élevée et de sa résistance à l'usure. Les revêtements de molybdène sont déposés à la surface d'alliages à base de nickel ou de pales de titane par pulvérisation plasma ou oxy-pulvérisation à grande vitesse (HVOF) pour former une couche protectrice résistante qui peut résister efficacement à l'érosion des flux de gaz à haute température et à l'usure particulière.

Dans l'environnement de fonctionnement des pales de turbine, la température peut dépasser 1000°C, et avec une rotation à grande vitesse et des vibrations, les matériaux ordinaires peuvent difficilement résister à des conditions aussi difficiles. L'excellente conductivité thermique et la résistance aux chocs thermiques du revêtement en molybdène lui permettent de disperser efficacement la chaleur et de réduire la concentration de contraintes thermiques à la surface de la pale. De plus, la dureté élevée du revêtement en molybdène résiste à l'impact des particules solides telles que le sable ou les résidus de combustion, prolongeant ainsi la durée de vie des pales. Dans les applications pratiques, les revêtements en molybdène sont souvent combinés avec d'autres matériaux, tels que les revêtements de barrière thermique en zircone, pour former un revêtement composite qui améliore encore la résistance aux hautes températures des pales.

Le fil de pulvérisation de molybdène est également largement utilisé dans d'autres composants du moteur tels que les chambres de combustion et les tuyères. La chaleur extrême et la corrosion chimique à l'intérieur de la chambre de combustion nécessitent des matériaux ayant une excellente résistance à l'oxydation, et les revêtements en molybdène protègent le substrat de l'érosion en formant une couche d'oxyde stable. La flexibilité du processus de pulvérisation permet au revêtement en molybdène de s'adapter à des géométries complexes, assurant ainsi une protection complète de la chambre de combustion et des buses. L'application de cette technologie de revêtement améliore considérablement la fiabilité et les intervalles d'entretien des moteurs d'avion, apportant un soutien important à l'efficacité et à la sécurité de l'industrie aérospatiale.

5.1.2 Pièces structurales à haute température et revêtements de barrière thermique

Les composants structurels à haute température des véhicules aérospatiaux, tels que les tuyères de moteurs-fusées, les composants de tête chauffante et les enceintes d'engins spatiaux de rentrée, nécessitent une intégrité structurelle pour être maintenus à des températures extrêmes. Les revêtements préparés par fil de pulvérisation de molybdène sont des matériaux de protection idéaux pour ces composants en raison de leur point de fusion élevé et de leur résistance aux chocs thermiques. Le revêtement de molybdène est déposé à la surface des composites en superalliage ou à matrice céramique par la technologie de pulvérisation au plasma pour former une couche protectrice dense, qui peut résister efficacement à l'oxydation à haute température et aux contraintes du cycle thermique.

Les revêtements de barrière thermique (TBC) sont une technologie importante dans l'industrie

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

aérospatiale pour réduire la température de surface des substrats et prolonger la durée de vie des composants. Les revêtements en molybdène sont souvent utilisés comme couche liante dans les systèmes de revêtement de barrière thermique pour relier le substrat à la couche supérieure de la céramique (par exemple, la zircone). Le coefficient de dilatation thermique du revêtement en molybdène se situe entre celui du substrat métallique et du revêtement céramique, ce qui peut atténuer efficacement le stress causé par le décalage de dilatation thermique et empêcher le revêtement de s'écailler. De plus, la conductivité thermique élevée du revêtement en molybdène aide à conduire la chaleur de la couche céramique vers le substrat, optimisant ainsi les performances du système de barrière thermique.

Dans les composants de la partie chauffante des navettes spatiales ou des véhicules hypersoniques, les revêtements en molybdène agissent également comme anti-ablation. L'ablation fait référence à la perte progressive de matériaux sous l'impact des courants d'air à haute température, et les revêtements en molybdène peuvent ralentir le taux d'ablation et protéger les composants critiques grâce à leur point de fusion élevé et à leur stabilité chimique. L'application de cette technologie de revêtement permet aux engins spatiaux d'effectuer des missions plus longues dans des environnements extrêmes, fournissant un soutien technique pour l'exploration de l'espace lointain et le vol à grande vitesse.

5.1.3 Revêtement résistant à l'usure et anticorrosion pour engins spatiaux

Les engins spatiaux sont confrontés à des défis environnementaux complexes lors du lancement, de l'exploitation et de la récupération, notamment la friction atmosphérique, la corrosion chimique et l'usure mécanique. Les revêtements résistants à l'abrasion et anticorrosion préparés par fil de pulvérisation de molybdène sont largement utilisés dans la structure externe et les composants clés des engins spatiaux, tels que les antennes satellites, les composants du système de propulsion et les dispositifs d'atterrissage. Ces revêtements sont déposés par pulvérisation à l'arc ou technologie HVOF, ce qui peut améliorer considérablement la durabilité et la fiabilité des composants.

À l'extérieur des engins spatiaux, le revêtement en molybdène résiste à la corrosion atmosphérique par l'oxygène et l'humidité, en particulier dans l'environnement du site de lancement dans les climats océaniques. La dureté élevée et le faible coefficient de frottement du revêtement en molybdène le rendent résistant à l'usure par impact par de minuscules particules, telles que la poussière ou les particules de glace rencontrées lors du vol à grande vitesse. De plus, l'inertie chimique du revêtement en molybdène lui permet de rester stable lorsqu'il est exposé à des combustibles chimiques ou à des oxydants, protégeant ainsi les composants critiques de l'engin spatial de l'érosion.

Les propriétés de faible frottement des revêtements en molybdène sont particulièrement importantes dans les pièces mobiles des satellites, telles que les charnières d'ailes solaires ou les mécanismes d'entraînement d'antenne. Ces composants nécessitent un mouvement de haute précision dans un environnement sous vide, et tout frottement ou usure peut entraîner une défaillance fonctionnelle. Le revêtement préparé par un fil de pulvérisation de molybdène assure le fonctionnement stable à long terme de ces composants grâce à sa surface lisse et à son excellente résistance à l'usure. Les progrès de la technologie de revêtement des engins spatiaux ont non seulement amélioré les

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

performances de l'équipement, mais ont également fourni un support matériel plus fiable pour les futures missions d'exploration de l'espace lointain.

5.2 Industrie automobile

L'industrie automobile est un domaine d'application important pour le fil de pulvérisation de molybdène, qui est largement utilisé pour améliorer les performances du moteur, du système d'échappement et des composants du système de freinage en raison de sa résistance à l'usure, de sa résistance aux températures élevées et de ses caractéristiques de faible frottement. Cette section examine les applications spécifiques du fil de pulvérisation de molybdène dans les revêtements de piston et de cylindre de moteur, les revêtements à haute température des systèmes d'échappement et les revêtements d'usure des systèmes de freinage.

5.2.1 Revêtement des pistons et des blocs du moteur

Les pistons et les blocs-cylindres des moteurs automobiles sont les composants de base des automobiles, qui doivent fonctionner dans des environnements de friction à haute température, haute pression et à grande vitesse. Le revêtement en molybdène préparé par fil de pulvérisation de molybdène devient une couche protectrice idéale pour la surface du piston et du cylindre en raison de sa dureté élevée et de son faible coefficient de frottement. Les revêtements en molybdène sont généralement déposés à la surface des substrats en alliage d'aluminium ou en fonte par des techniques de pulvérisation à l'arc ou à la flamme pour former une couche protectrice résistante qui réduit considérablement l'usure par frottement et améliore l'efficacité et la durée de vie du moteur.

Dans l'application de segments de piston, le revêtement en molybdène peut réduire efficacement le frottement avec la paroi du cylindre, réduisant ainsi les pertes d'énergie et la consommation de carburant. La structure poreuse du revêtement en molybdène a également une certaine capacité de stockage d'huile, qui est capable de maintenir la lubrification pendant le fonctionnement et d'éviter les brûlures causées par le frottement sec. De plus, la résistance aux hautes températures du revêtement en molybdène lui permet de rester stable dans l'environnement à haute température de la chambre de combustion et de résister à la corrosion des produits de combustion. L'application de cette technologie de revêtement permet aux moteurs automobiles modernes de fonctionner à des taux de compression et à des puissances plus élevés tout en maintenant de faibles coûts de maintenance.

Le revêtement en molybdène à l'intérieur du bloc-cylindres est tout aussi important. La surface du bloc-cylindres doit résister au frottement répété du segment de piston et à l'impact des gaz à haute température, et il est difficile pour les matériaux ordinaires de maintenir leurs performances pendant une longue période. Le revêtement en molybdène peut protéger efficacement la surface du bloc-cylindres et prolonger sa durée de vie grâce à sa dureté élevée et à sa résistance aux chocs thermiques. Dans certains véhicules haute performance, les revêtements en molybdène sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux, tels que des revêtements à base de céramique ou de carbone, pour former un revêtement composite qui améliore encore les performances. L'utilisation généralisée de cette technologie a poussé l'industrie automobile vers un développement plus efficace et plus respectueux de l'environnement.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

5.2.2 Revêtement résistant aux hautes températures pour système d'échappement

Les systèmes d'échappement automobiles fonctionnent dans des environnements à haute température et à gaz corrosifs et nécessitent une excellente résistance à la chaleur et à la corrosion. En raison de son point de fusion élevé et de sa stabilité chimique, les revêtements en molybdène préparés par fil de pulvérisation de molybdène sont largement utilisés dans la protection de surface des tuyaux d'échappement, des convertisseurs catalytiques et des silencieux. Ces revêtements sont déposés par pulvérisation plasma ou technologie HVOF et résistent à l'érosion et à l'oxydation par les gaz d'échappement à haute température.

La température de fonctionnement du système d'échappement peut atteindre plus de 800 °C, en particulier dans les moteurs turbocompressés, où la température des gaz d'échappement est encore plus élevée. Les revêtements en molybdène empêchent les substrats, tels que l'acier inoxydable ou l'acier doux, de s'oxyder ou de se fragiliser à haute température en formant une couche d'oxyde stable. De plus, la résistance aux chocs thermiques du revêtement en molybdène lui permet de résister à des cycles chauds et froids fréquents, évitant ainsi les fissures ou l'écaillage causés par les changements de température. Dans les convertisseurs catalytiques, le revêtement en molybdène protège également le catalyseur de métaux précieux à l'intérieur, prolongeant sa durée de vie et améliorant l'efficacité du traitement des gaz d'échappement.

Les propriétés à faible frottement des revêtements en molybdène jouent également un rôle important dans certaines parties du système d'échappement, telles que les soupapes ou les connexions. Ces composants doivent maintenir un mouvement flexible à des températures élevées, et l'application de revêtements en molybdène peut réduire l'usure par frottement et améliorer la fiabilité du système. Grâce à la technologie du fil de pulvérisation de molybdène, le système d'échappement automobile peut maintenir des performances stables à long terme dans des environnements difficiles, fournissant un soutien important pour les performances environnementales et la durabilité du véhicule.

5.2.3 Revêtement résistant à l'usure du système de freinage

Le système de freinage est au cœur de la sécurité automobile, et les disques et plaquettes de frein sont soumis à des niveaux élevés de frottement et de charges thermiques. Le revêtement en molybdène préparé par un fil de pulvérisation de molybdène est largement utilisé à la surface des disques de frein en raison de sa dureté élevée et de sa résistance à l'usure, améliorant sa capacité à résister à l'usure et à la décomposition thermique. Les revêtements en molybdène sont déposés par HVOF ou technologie de pulvérisation à l'arc pour former une couche protectrice résistante qui améliore considérablement les performances et la durée de vie du système de freinage.

Lors du freinage, le frottement à grande vitesse entre le disque de frein et les plaquettes de frein génère beaucoup de chaleur, ce qui entraîne une forte augmentation de la température de surface. La conductivité thermique élevée et la résistance aux chocs thermiques du revêtement en molybdène peuvent disperser efficacement la chaleur et empêcher le disque de frein de surchauffer, de se déformer ou de se fissurer. De plus, le faible coefficient de frottement du revêtement en molybdène contribue à réduire les pertes d'énergie lors du freinage et à améliorer l'efficacité du freinage. Dans

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

les voitures de sport hautes performances ou les véhicules utilitaires lourds, les revêtements en molybdène résistent également à l'usure causée par les freinages fréquents, prolongeant ainsi la durée de vie des disques de frein.

L'application d'un revêtement en molybdène pour les plaquettes de frein est tout aussi importante. Le revêtement en molybdène peut améliorer la résistance à l'usure et la résistance aux températures élevées des plaquettes de frein, réduire la génération de particules d'usure et réduire l'impact environnemental de la poussière de frein. Dans le domaine des véhicules électriques, l'application de revêtements en molybdène est particulièrement importante, car le système de freinage des véhicules électriques nécessite une plus grande durabilité pour s'adapter au mode de fonctionnement du freinage régénératif. Grâce à la pulvérisation de la technologie du fil de molybdène, les performances du système de freinage ont été considérablement améliorées, offrant une garantie pour la sécurité et la protection de l'environnement de la voiture.

5.3 Industries chimiques et énergétiques

Les industries chimiques et énergétiques impliquent une variété d'environnements extrêmes, y compris des produits chimiques hautement corrosifs, des températures et des pressions élevées, et les revêtements préparés par fil de molybdène sont devenus des matériaux importants dans ces domaines en raison de leur résistance à la corrosion et à haute température. Cette section examine l'application du fil de molybdène enduit de pulvérisation dans les revêtements résistants à la corrosion des tuyaux et des vannes, des réacteurs et des échangeurs de chaleur, ainsi que des équipements solaires et éoliens.

5.3.1 Tuyaux et soupapes résistants à la corrosion

Les tuyaux et les vannes de l'industrie chimique sont souvent exposés à des acides forts, des alcalis ou d'autres fluides corrosifs, et les matériaux ordinaires sont difficiles à résister à cette érosion pendant une longue période. Les revêtements en molybdène préparés par fil de pulvérisation de molybdène sont largement utilisés dans la protection de surface des pipelines et des vannes en raison de leur excellente stabilité chimique et de leur résistance à la corrosion. Ces revêtements sont déposés par pulvérisation plasma ou pulvérisation à froid pour former une couche protectrice dense qui isole efficacement les milieux corrosifs.

Dans l'industrie pétrochimique, les tuyaux et les vannes doivent résister aux composés soufrés, aux chlorures et à d'autres gaz corrosifs. L'inertie chimique des revêtements en molybdène leur permet de rester stables dans ces environnements, évitant ainsi la corrosion et les piqûres de substrats tels que l'acier au carbone ou l'acier inoxydable. De plus, la dureté élevée du revêtement en molybdène résiste à l'érosion et à l'usure des particules solides dans le fluide en écoulement, prolongeant ainsi la durée de vie des tuyaux et des vannes. Dans les plates-formes pétrolières et gazières offshore, l'application de revêtements en molybdène est particulièrement importante car elle peut résister à la corrosion de l'eau de mer et du brouillard salin, garantissant ainsi la fiabilité des équipements dans des environnements difficiles.

Les pièces mobiles des vannes, telles que les bobines et les sièges, nécessitent un faible frottement

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

et une résistance élevée à l'usure, et l'application de revêtements en molybdène peut améliorer considérablement les performances de ces composants. La surface lisse du revêtement en molybdène et le faible coefficient de frottement réduisent la résistance pendant le fonctionnement de la vanne, améliorant ainsi la flexibilité et l'étanchéité de l'interrupteur. Grâce à l'utilisation de la technologie de pulvérisation de fil de molybdène, les intervalles d'entretien des tuyaux et des vannes chimiques sont prolongés, ce qui réduit les coûts d'exploitation et les temps d'arrêt.

5.3.2 Revêtements de réacteurs et d'échangeurs de chaleur

Les réacteurs chimiques et les échangeurs de chaleur sont les équipements de base de la production chimique, qui doivent fonctionner dans des environnements à haute température, à haute pression et corrosifs. Le revêtement en molybdène préparé par un fil de pulvérisation de molybdène est un matériau de protection idéal pour ces appareils en raison de sa résistance aux températures élevées et à la corrosion. Le revêtement en molybdène est déposé par la technologie HVOF ou pulvérisation plasma, qui est capable de former une couche protectrice résistante qui protège les surfaces internes des réacteurs et des échangeurs de chaleur.

Les réacteurs impliquent souvent des réactions chimiques complexes, ce qui entraîne des gaz à haute température et des liquides corrosifs qui imposent des exigences extrêmement élevées aux matériaux. Le point de fusion élevé et la stabilité chimique des revêtements en molybdène leur permettent de résister aux attaques des milieux acides ou alcalins tout en préservant l'intégrité structurelle à des températures élevées. Dans les échangeurs de chaleur, l'excellente conductivité thermique des revêtements en molybdène contribue à améliorer l'efficacité de l'échange thermique, tandis que sa résistance aux chocs thermiques peut résister aux changements fréquents de température et empêcher la fissuration ou le décollement du revêtement.

Dans l'industrie nucléaire, des revêtements en molybdène sont utilisés pour protéger les faisceaux de tubes des échangeurs de chaleur contre la corrosion des milieux radioactifs. La faible section efficace d'absorption de neutrons du revêtement en molybdène lui confère un avantage unique dans l'environnement de réaction nucléaire, offrant une protection sans compromettre l'efficacité de la réaction. Grâce à la pulvérisation de la technologie du fil de molybdène, les performances et la sécurité des réacteurs et des échangeurs de chaleur ont été considérablement améliorées, ce qui garantit le fonctionnement stable des industries chimiques et énergétiques.

5.3.3 Revêtements pour les équipements d'énergie solaire et éolienne

Le développement rapide des équipements d'énergie renouvelable a mis en avant de nouvelles exigences pour les propriétés des matériaux, et les revêtements préparés par fil de molybdène ont joué un rôle important dans les équipements d'énergie solaire et éolienne. Ces revêtements augmentent l'efficacité et la longévité de l'équipement grâce à leur résistance à l'abrasion, à la corrosion et à leur conductivité thermique élevée.

Dans les systèmes de production d'énergie solaire thermique, des revêtements en molybdène sont appliqués à la protection de surface des tubes collecteurs. La conductivité thermique élevée et la résistance aux chocs thermiques du revêtement en molybdène assurent un transfert de chaleur

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

efficace tout en évitant les dommages causés par l'oxydation à haute température et les cycles thermiques. Dans les équipements éoliens, les revêtements en molybdène sont utilisés pour protéger les pales et les roulements des éoliennes. Les éoliennes fonctionnent dans un environnement naturel instable soumis au sable, à l'humidité et aux embruns salins, et la résistance à l'usure et à la corrosion des revêtements en molybdène peut prolonger efficacement la durée de vie des pales et des roulements.

Les propriétés à faible frottement des revêtements en molybdène sont particulièrement importantes dans le système de transmission des éoliennes, car elles réduisent l'usure des engrenages et des roulements et améliorent l'efficacité de la conversion d'énergie. La technologie de pulvérisation à froid est également de plus en plus utilisée dans les équipements d'énergie renouvelable, et ses propriétés à basse température conviennent à la préparation de revêtements de molybdène pour les substrats composites ou en alliage léger afin d'éviter les dommages thermiques. La fiabilité et l'efficacité des équipements d'énergie solaire et éolienne ont été considérablement améliorées grâce à l'application de la technologie de pulvérisation de fil de molybdène, qui fournit un soutien technique pour la popularisation des énergies renouvelables.

5.4 Industrie de l'électronique et des semi-conducteurs

L'industrie de l'électronique et des semi-conducteurs a des exigences extrêmement élevées en matière de pureté, de conductivité et de stabilité thermique des matériaux, et le fil de molybdène pulvérisé est devenu un matériau important dans ce domaine en raison de sa grande pureté et de ses excellentes propriétés physiques. Cette section aborde l'application du fil de molybdène enduit par pulvérisation dans le fil chauffant pour le revêtement sous vide, les fils et les électrodes semi-conducteurs, et le revêtement du fil de molybdène pour le dépôt de couches minces.

5.4.1 Fil chauffant pour revêtement sous vide

Le revêtement sous vide est une technique de préparation de couche mince couramment utilisée dans les industries de l'électronique et des semi-conducteurs pour produire des dispositifs tels que des écrans, des capteurs et des circuits intégrés. Le fil de pulvérisation de molybdène est largement utilisé comme fil chauffant pour les équipements de revêtement sous vide en raison de son point de fusion élevé et de sa bonne conductivité électrique. Le fil de molybdène est chauffé par résistance pour créer des températures élevées, vaporisant des matériaux évaporés tels que l'aluminium ou le cuivre et les déposant à la surface du substrat pour former un film uniforme.

La haute pureté et la stabilité chimique du fil de molybdène lui permettent de fonctionner dans un environnement sous vide pendant de longues périodes et d'éviter la contamination due à l'oxydation ou à la volatilisation des impuretés. Le fil pulvérisé de molybdène améliore encore la résistance à l'oxydation grâce à la modification de la surface (par exemple, la silicuration) et prolonge la durée de vie du fil chauffant. De plus, la résistance mécanique et la résistance aux chocs thermiques du fil de molybdène lui permettent de résister à des cycles de chauffage et de refroidissement fréquents et de maintenir des performances stables. Dans les équipements de revêtement de haute précision, l'uniformité et la finition de surface du fil de molybdène sont essentielles à la qualité du film, et le processus de pulvérisation garantit ces propriétés du fil.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

5.4.2 Fils et électrodes semi-conducteurs

Les fils et les électrodes dans les dispositifs à semi-conducteurs nécessitent une conductivité élevée et une résistance aux températures élevées, et les revêtements de molybdène préparés par des fils de pulvérisation de molybdène sont largement utilisés pour ces composants en raison de leurs excellentes propriétés électriques et mécaniques. Le revêtement en molybdène est déposé sur le cadre de plomb ou la surface de l'électrode par pulvérisation plasma ou pulvérisation à froid pour former une couche protectrice hautement conductrice et résistante à la corrosion.

Dans les emballages de semi-conducteurs, le cadre de connexion est soumis à une soudure à haute température et à un nettoyage chimique, et l'inertie chimique et la dureté élevée du revêtement en molybdène protègent le cadre contre les dommages. Dans les dispositifs à semi-conducteurs de puissance, des revêtements en molybdène sont utilisés à la surface des électrodes pour améliorer leur conductivité et leur résistance à l'usure, et assurer un fonctionnement stable du dispositif à des courants et des tensions élevés. Le faible coefficient de dilatation thermique du revêtement en molybdène lui confère une bonne adaptation aux matériaux à base de silicium, réduisant ainsi la fissuration causée par le stress thermique.

5.4.3 Revêtement de fil de molybdène pour le dépôt de couches minces

Le dépôt de couches minces est une technologie clé dans l'industrie des semi-conducteurs pour la préparation de couches minces fonctionnelles telles que les couches conductrices, les couches isolantes et les couches barrières. En raison de sa grande pureté et de son uniformité, le fil de molybdène pulvérisé est utilisé comme matériau cible ou auxiliaire pour le dépôt de couches minces. Le revêtement en molybdène est déposé à la surface du substrat par pulvérisation à froid ou par pulvérisation plasma pour former un film très dense adapté aux processus de dépôt physique en phase vapeur (PVD) ou de dépôt chimique en phase vapeur (CVD).

L'excellente conductivité électrique et la stabilité chimique du revêtement en molybdène lui permettent de fournir des performances stables lors du dépôt de couches minces, empêchant la dégradation du matériau cible à des températures élevées ou des gaz réactifs. Dans la fabrication d'écrans, les revêtements en molybdène sont utilisés pour créer des films conducteurs transparents (tels que l'électrode arrière de l'oxyde d'indium et d'étain) afin d'améliorer la conductivité et la durabilité du film. L'efficacité et la qualité du dépôt de couches minces ont été considérablement améliorées grâce à la technologie du fil de pulvérisation de molybdène, soutenant l'innovation dans les industries de l'électronique et des semi-conducteurs.

5.5 Médecine et bio-ingénierie

Les domaines médical et de la bio-ingénierie ont des exigences extrêmement élevées en matière de biocompatibilité, de résistance à la corrosion et de performance à haute température des matériaux, et le revêtement de molybdène préparé par fil de pulvérisation de molybdène est largement utilisé dans les dispositifs médicaux et les équipements de bio-ingénierie avec ses excellentes performances. Cette section explorera l'application du fil de pulvérisation de molybdène dans le revêtement des éléments chauffants des dispositifs médicaux et des dispositifs médicaux résistants à la corrosion.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

5.5.1 Éléments chauffants pour dispositifs médicaux

Les éléments chauffants des dispositifs médicaux, tels que les scalpels, les équipements dentaires et les instruments d'analyse de laboratoire, doivent être stables et fiables à des températures élevées. Le fil de molybdène pulvérisé, avec son point de fusion élevé et sa bonne conductivité électrique, est utilisé comme matériau pour ces éléments chauffants. Le fil de molybdène est chauffé par résistance pour générer des températures élevées et est utilisé pour couper, cautériser ou chauffer des échantillons, et sa grande pureté et sa stabilité chimique garantissent la sécurité dans les environnements médicaux.

Dans les équipements dentaires, le fil de molybdène est utilisé comme élément chauffant dans un four de frittage à haute température pour fabriquer des couronnes ou des implants en céramique. La stabilité à haute température et la résistance à l'oxydation du fil de molybdène lui permettent de maintenir ses performances sur plusieurs cycles de chauffage, évitant ainsi la contamination causée par la dégradation des matériaux. Dans les instruments d'analyse de laboratoire, le fil de molybdène est utilisé comme élément chauffant dans les spectromètres de masse ou les équipements d'analyse thermique pour assurer un chauffage précis des échantillons et des résultats d'analyse fiables.

5.5.2 Revêtements résistants à la corrosion pour les dispositifs médicaux

Les dispositifs médicaux, tels que les outils chirurgicaux, les implants et les dispositifs de diagnostic, doivent rester résistants à la corrosion en présence de fluides corporels ou de désinfectants. Les revêtements en molybdène préparés par fil de pulvérisation de molybdène sont largement utilisés pour la protection de surface de ces dispositifs en raison de leur inertie chimique et de leur dureté élevée. Les revêtements de molybdène sont déposés par pulvérisation à froid ou par pulvérisation plasma pour former une couche protectrice dense qui empêche la corrosion ou l'usure à la surface de l'équipement.

Dans les implants orthopédiques, tels que les articulations artificielles ou les ongles osseux, les revêtements en molybdène peuvent améliorer la résistance à la corrosion et la biocompatibilité de substrats tels que les alliages de titane, réduisant ainsi l'inflammation causée par les réactions de l'implant aux fluides corporels. Dans les outils chirurgicaux, le faible frottement et la dureté élevée du revêtement en molybdène peuvent réduire la résistance lors de la coupe, améliorant ainsi la durabilité et la précision de l'outil. Grâce à la pulvérisation de la technologie du fil de molybdène, les performances et la sécurité des dispositifs médicaux ont été considérablement améliorées, offrant une garantie pour le traitement des patients.

5.6 Autres domaines d'application

L'utilisation du fil de pulvérisation de molybdène n'est pas limitée aux principaux domaines mentionnés ci-dessus, mais joue également un rôle important dans l'ingénierie marine et offshore, les machines de construction et les équipements lourds, ainsi que les poêles à haute température et les équipements de traitement thermique. Cette section explorera des applications spécifiques dans ces domaines.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

5.6.1 Revêtements anticorrosion pour les navires et l'ingénierie offshore

La corrosion est un défi majeur pour les navires et les équipements offshore qui fonctionnent dans l'eau de mer, le brouillard salin et les environnements humides. Le revêtement en molybdène préparé par fil de pulvérisation de molybdène est largement utilisé dans la protection des pipelines des hélices de navires, des arbres de gouvernail et des plates-formes offshore en raison de son excellente résistance à la corrosion et de sa dureté élevée. Le revêtement en molybdène est déposé par HVOF ou technologie de pulvérisation à l'arc, qui peut résister efficacement à la corrosion galvanique de l'eau de mer et à l'érosion et à l'usure des particules solides.

Dans les plates-formes offshore, les revêtements en molybdène sont utilisés pour protéger les tuyaux de forage et les vannes, prolongeant ainsi leur durée de vie dans des environnements difficiles. Les propriétés à faible frottement du revêtement en molybdène améliorent également les performances des pièces mobiles, telles que les systèmes hydrauliques, réduisant ainsi le besoin de maintenance. La fiabilité et la sécurité des équipements marins et offshore ont été considérablement améliorées grâce à l'application de la technologie de pulvérisation de fil de molybdène.

5.6.2 Revêtements résistants à l'usure pour les machines de construction et les équipements lourds

Les machines de construction et les équipements lourds, tels que les godets d'excavatrice, les lames de bulldozer et les marteaux-concasseurs, sont soumis à des niveaux élevés d'usure et d'impact. Le revêtement en molybdène préparé par un fil de pulvérisation de molybdène est un matériau de protection idéal pour ces composants en raison de sa dureté élevée et de sa résistance à l'usure. Le revêtement de molybdène est déposé grâce à la technologie HVOF pour former une couche protectrice résistante contre l'impact du sable, de la roche et d'autres abrasifs.

Dans les équipements lourds, les propriétés à faible frottement des revêtements en molybdène réduisent l'usure d'un composant à l'autre et améliorent l'efficacité mécanique. Par exemple, le revêtement en molybdène d'un godet d'excavatrice prolonge sa durée de vie dans les sols rocheux, réduisant ainsi la fréquence de remplacement et les coûts d'entretien. Grâce à l'application de la technologie du fil de molybdène, les performances et la durabilité des machines de construction ont été considérablement améliorées, ce qui a permis de renforcer l'efficacité des projets d'ingénierie.

5.6.3 Fourneaux à haute température et équipement de traitement thermique

Les poêles à haute température et les équipements de traitement thermique doivent fonctionner à des températures extrêmement élevées, et les matériaux doivent avoir une excellente résistance aux températures élevées et à l'oxydation. En raison de son point de fusion élevé et de sa stabilité chimique, le fil de molybdène pulvérisé est utilisé comme élément chauffant et revêtement protecteur pour les poêles à haute température. Le fil de molybdène est chauffé par résistance pour générer des températures élevées et est utilisé dans le traitement thermique des métaux, le frittage de céramique et la fusion du verre, et sa haute pureté et sa résistance à l'oxydation garantissent des performances stables à long terme.

Dans les équipements de traitement thermique, les revêtements en molybdène sont utilisés pour

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

protéger les parois intérieures et les structures de support des fours contre l'oxydation à haute température et les attaques chimiques. La conductivité thermique élevée et la résistance aux chocs thermiques du revêtement en molybdène lui permettent de résister aux changements fréquents de température et d'éviter les fissures ou l'écaillage. Grâce à la technologie du fil de pulvérisation en molybdène, les performances et la durée de vie des poêles à haute température ont été considérablement améliorées, ce qui garantit la stabilité et l'efficacité de la production industrielle.



CTIA GROUP LTD fil de pulvérisation de molybdène

Chapitre 6 Équipement de production pour le fil de pulvérisation de molybdène

Le processus de production du fil de pulvérisation de molybdène implique de nombreuses étapes complexes, du traitement des matières premières au dépôt final du revêtement, chacune d'entre elles nécessitant un équipement spécialisé pour garantir la précision du processus et la stabilité de la qualité du produit. Ce chapitre abordera en détail les différents types d'équipements nécessaires à la production de fil de pulvérisation de molybdène, y compris l'équipement de traitement des matières premières, l'équipement de production de fil de molybdène, l'équipement de pulvérisation, l'équipement auxiliaire et de post-traitement, ainsi que l'équipement d'automatisation et intelligent. Ensemble, ces machines constituent la base technique de la production de fils de molybdène revêtus et fournissent un support fiable pour les applications dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'industrie automobile, de la chimie et de l'énergie.

6.1 Équipement de traitement des matières premières

Le traitement des matières premières est la première étape de la production de fil de molybdène pulvérisé, qui implique un processus complexe de conversion du minerai de molybdène en poudre de molybdène de haute pureté. À ce stade, l'équipement doit avoir une grande précision et des

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

capacités de contrôle environnemental strictes pour garantir la pureté et la consistance élevées de la poudre de molybdène. Cette section traite de l'équipement de préparation et de réduction de la poudre de molybdène, ainsi que du four de frittage et de l'équipement de forgeage.

6.1.1 Équipement de préparation et de réduction de la poudre de molybdène

L'équipement de préparation et de réduction de la poudre de molybdène est au cœur du traitement des matières premières, qui est utilisé pour convertir l'oxyde de molybdène (MoO_3) après purification du minerai de molybdène en poudre de molybdène métallique de haute pureté. Il s'agit notamment de concasseurs, de broyeurs, d'équipements de flottation et de fours de réduction d'hydrogène, chacun d'entre eux jouant un rôle spécifique dans la chaîne de processus.

Les concasseurs et les broyeurs sont utilisés pour transformer le minerai de molybdène de gros morceaux de minerai en fines particules. Les concasseurs à mâchoires et les concasseurs à cône sont des équipements de concassage primaire couramment utilisés qui sont capables de broyer le minerai en particules plus petites et conviennent au traitement de broyage ultérieur. La machine de broyage (comme un broyeur à boulets ou un broyeur à barres) broie ensuite le minerai en une poudre fine à travers le fluide de broyage dans le cylindre rotatif, qui est float = " ; Système : sélectionnez Séparation pour préparer. Ces équipements doivent être équipés de systèmes de dépoussiérage efficaces pour réduire la contamination par la poussière tout en assurant une taille uniforme des particules.

L'équipement de flottation est la clé du processus d'enrichissement et est utilisé pour séparer la molybdénite (MoS_2) du minerai finement broyé. La cellule de flottation se compose généralement de plusieurs réservoirs de flottation, qui sont remplis de boue et d'air, qui sont combinés avec des collecteurs et des agents moussants pour former de la mousse et séparer les particules de molybdénite des impuretés. L'équipement de flottation moderne adopte un système de contrôle automatique, qui peut ajuster la quantité d'agent ajoutée et le débit de bulles en temps réel, et améliorer l'efficacité de l'enrichissement et la pureté du concentré. Le concentré de molybdène de flottation est filtré et séché en vue d'une torréfaction ultérieure.

Le torréfacteur est utilisé pour convertir la molybdénite en oxyde de molybdène et constitue une étape importante dans la préparation de la poudre de molybdène. Les fours rotatifs et les fours à chambres multiples sont des équipements de torréfaction couramment utilisés pour éliminer le soufre de la molybdénite par oxydation à haute température afin de produire de la poudre d'oxyde de molybdène. Ces fourneaux doivent être équipés de systèmes de contrôle précis de la température et d'unités de traitement des gaz d'échappement pour assurer l'élimination complète du soufre et réduire les émissions de dioxyde de soufre. L'oxyde de molybdène torréfié est ensuite purifié par un équipement de lixiviation à l'ammoniac pour éliminer les traces d'impuretés et former une solution de molybdate d'ammonium de haute pureté.

Le four de réduction de l'hydrogène est l'équipement de base pour la production de poudre de molybdène, qui est utilisée pour réduire l'oxyde de molybdène ou le molybdate d'ammonium en poudre de molybdène métallique. Le processus de réduction est généralement divisé en deux étapes :

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

la première étape réduit l'oxyde de molybdène en dioxyde de molybdène (MoO_2) à des températures plus basses, et la deuxième étape réduit encore le molybdène métallique en métal à des températures plus élevées. Ces fours sont disponibles en version tubulaire ou en bateau pousseur, équipés d'un système d'alimentation en hydrogène de haute pureté et d'un contrôle précis de la température pour assurer la stabilité du processus de réduction. Le matériau du corps du four est généralement un alliage de molybdène ou de quartz qui résiste aux températures élevées pour éviter la contamination. La poudre de molybdène réduite est triée par un classificateur à air ou un tamis vibrant pour s'assurer que la taille et la distribution des particules répondent aux besoins du processus de tréfilage.

Le fonctionnement coordonné de ces équipements nécessite un environnement de production très propre afin d'éviter la contamination externe de la poudre de molybdène. Les équipements modernes de préparation de poudre de molybdène intègrent également un système de surveillance en ligne, qui peut détecter la composition chimique et la distribution granulométrique de la poudre en temps réel pour garantir l'uniformité de la qualité du produit.

6.1.2 Fours de frittage et matériel de forgeage

Les fours de frittage et les équipements de forgeage sont utilisés pour presser la poudre de molybdène en une ébauche dense et la transformer en tiges de molybdène adaptées au tréfilage. Le four de frittage est l'équipement de base du processus de métallurgie des poudres, et les particules de poudre de molybdène sont combinées en une structure métallique solide grâce à un traitement à haute température. L'équipement de forgeage optimise la microstructure de l'ébauche grâce à une déformation mécanique afin d'améliorer sa résistance et sa ductilité.

Les fours de frittage utilisent généralement le vide ou l'hydrogène pour protéger l'atmosphère de l'oxydation du molybdène à haute température. Les fours de frittage sous vide conviennent à la production d'ébauches de molybdène de haute pureté par aspiration pour éliminer l'oxygène et l'humidité du four. Le four de frittage d'hydrogène crée une atmosphère réductrice en fournissant en permanence de l'hydrogène de haute pureté, ce qui empêche non seulement l'oxydation, mais nettoie également les traces d'oxydes à la surface de l'ébauche. Les fours de frittage modernes sont équipés de zones de chauffage à plusieurs étages et de systèmes de contrôle de température précis, capables d'ajuster la température de frittage et le temps de maintien en fonction des caractéristiques de la poudre de molybdène, et d'optimiser la densité et la structure du grain de l'ébauche. Certains fours de frittage avancés intègrent également des systèmes de chargement et de déchargement automatisés pour améliorer l'efficacité de la production.

L'équipement de forgeage comprend une machine de forgeage à chaud et un laminoir à chaud pour traiter la billette de molybdène frittée en une barre de molybdène allongée. La forgeuse à chaud utilise le martelage hydraulique ou mécanique pour déformer l'ébauche à haute température, affiner les grains et éliminer les défauts internes. Le laminoir à chaud réduit progressivement le diamètre de la billette grâce à une série de cylindres pour produire une tige de molybdène uniforme. Ces appareils doivent être équipés d'un système de chauffage à haute température pour maintenir la ductilité du molybdène, ainsi que d'un système d'atmosphère protectrice pour éviter l'oxydation. Le processus de forgeage et de laminage nécessite un contrôle précis du taux de déformation et de la

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

température pour éviter la fissuration de l'ébauche ou les défauts de surface.

La synergie entre le four de frittage et l'équipement de forgeage fournit une matière première de haute qualité pour la production de fil de molybdène. Grâce au contrôle numérique et à la surveillance en temps réel, les équipements modernes peuvent améliorer considérablement l'efficacité de la production et la cohérence des produits, en posant une base solide pour le processus d'étirage ultérieur.

6.2 Équipement de production de fil de molybdène

La production de fils de molybdène est une étape critique dans la transformation des tiges de molybdène en filaments, impliquant des processus tels que le tréfilage, le recuit et le traitement de surface. Ces processus nécessitent un équipement de haute précision pour surmonter les propriétés dures et cassantes du molybdène, garantissant ainsi la précision dimensionnelle et la qualité de surface du fil. Cette section traite des machines et des matrices de tréfilage, des fours de recuit et des équipements de traitement thermique, ainsi que des équipements de nettoyage et de polissage de surface.

6.2.1 Machines à tréfiler et matrices

La machine à tréfiler est l'équipement de base pour la production de fil de molybdène, qui est utilisé pour étirer la tige de molybdène en un filament à travers un moule. La machine de tréfilage est divisée en tréfileuse monomode et tréfileuse continue multimode, chacune avec ses propres scénarios applicables. La machine de tréfilage à matrice unique est adaptée à la production de faible volume et de haute précision, équipée d'un seul moule, et chaque dessin est complété par un fonctionnement manuel ou semi-automatique. La machine d'étirage continu multimode est adaptée à la production à grande échelle, équipée de plusieurs matrices et d'un dispositif de traction, qui peut étirer en continu la tige de molybdène, améliorant considérablement l'efficacité.

Le composant central de la machine à tréfiler est la matrice, qui est généralement en carbure de tungstène ou en diamant polycristallin, qui a une dureté et une résistance à l'usure extrêmement élevées. La conception de l'ouverture de la matrice doit correspondre avec précision aux exigences de dessin, et la séquence de décroissance de l'ouverture est scientifiquement calculée pour assurer la déformation uniforme du fil. Le système de lubrification est une partie importante de la machine à tréfiler, en pulvérisant une émulsion de graphite ou un lubrifiant au disulfure de molybdène, le frottement entre le moule et le fil de molybdène est réduit, la durée de vie de la matrice est prolongée et la qualité de surface du fil est améliorée. Les tréfileuses modernes sont également équipées d'un système de contrôle de la tension et d'un refroidissement pour éviter que le fil ne se casse ou ne surchauffe pendant le processus d'étirage.

La fabrication et l'entretien du moule sont la clé du processus d'étirage. Les moules de haute qualité doivent être polis et inspectés régulièrement pour garantir la précision de l'ouverture et de la finition de surface. Certaines machines de tréfilage avancées intègrent un système d'inspection en ligne, capable de surveiller le diamètre du fil et les défauts de surface en temps réel, et d'ajuster les paramètres d'étirage à temps. Cette conception d'équipement de haute précision garantit la

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

cohérence dimensionnelle et les propriétés mécaniques du fil de molybdène, fournissant un fil de haute qualité pour le processus de pulvérisation.

6.2.2 Fours de recuit et équipement de traitement thermique

Les fours de recuit et les équipements de traitement thermique sont utilisés pour éliminer les contraintes internes introduites pendant le processus de tréfilage, restaurer la structure cristalline du fil de molybdène et améliorer sa ductilité et sa ténacité. Ces appareils doivent être utilisés sous vide ou sous atmosphère protectrice pour éviter l'oxydation de la surface du fil de molybdène.

Les fours de recuit sous vide conviennent à la production de fils de molybdène de haute pureté par aspiration pour éliminer l'oxygène du four. Le four est équipé d'un élément chauffant à haute température (par exemple un fil chauffant en molybdène ou en tungstène) qui permet un contrôle précis de la température et de la vitesse de montée en puissance. Le four de recuit à l'hydrogène utilise de l'hydrogène de haute pureté pour créer une atmosphère réductrice, ce qui empêche non seulement l'oxydation, mais nettoie également les traces d'oxydes à la surface du fil. Les fours de recuit modernes utilisent une conception de chauffage à plusieurs étages pour optimiser la microstructure du fil de molybdène grâce à un chauffage progressif afin d'éviter les grains surdimensionnés ou le transfert de contraintes.

L'équipement de traitement thermique comprend également un système de refroidissement pour contrôler la vitesse de refroidissement après recuit. Un refroidissement rapide peut entraîner une réaccumulation de contraintes, tandis qu'un refroidissement trop lent peut affecter la productivité. Certains fours de recuit avancés sont équipés de systèmes de chargement et de déchargement automatisés, capables de traiter en continu plusieurs rouleaux de fil de molybdène, améliorant ainsi l'efficacité de la production. Le four de recuit a également été conçu dans un souci d'efficacité énergétique, réduisant les pertes de chaleur grâce à des systèmes d'isolation et de récupération efficaces, conformément aux exigences de la fabrication écologique.

6.2.3 Équipement de nettoyage et de polissage des surfaces

Les équipements de nettoyage et de polissage de surface sont utilisés pour éliminer les lubrifiants, les oxydes et autres contaminants de la surface du fil de molybdène, garantissant ainsi une excellente qualité de surface pendant le processus de revêtement. Il s'agit notamment de cuves de nettoyage chimique, de nettoyeurs à ultrasons et d'unités de polissage.

Les bains de nettoyage chimique utilisent des solutions légèrement acides ou alcalines, telles que l'acide chlorhydrique dilué ou l'hydroxyde de sodium, pour éliminer les couches d'oxyde et les résidus organiques de la surface des fils de molybdène. La cuve de nettoyage est généralement équipée d'un système de filtration par circulation pour garantir la pureté de la solution de nettoyage et éviter la contamination secondaire. Après le nettoyage, le fil de molybdène est soigneusement nettoyé à travers le réservoir de rinçage à l'eau déminéralisée pour éviter que des résidus chimiques n'affectent l'effet de pulvérisation.

Les nettoyeurs à ultrasons utilisent des ondes sonores à haute fréquence pour créer de minuscules

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

bulles dans les liquides et éliminer les particules de taille micrométrique et les taches d'huile grâce à l'impact de l'éclatement des bulles. Cette machine est particulièrement adaptée à la manipulation de petits fils de molybdène et est capable de pénétrer dans les dépressions microscopiques de la surface du filament pour assurer un nettoyage complet. La fréquence et la puissance du nettoyeur à ultrasons doivent être ajustées en fonction de la taille du fil pour éviter d'endommager la surface.

L'équipement de polissage comprend une machine de polissage mécanique et un dispositif de polissage électrochimique. Les machines de polissage mécanique utilisent des abrasifs fins, tels que la poudre d'alumine ou de diamant, pour polir la surface du fil de molybdène à l'aide de brosses rotatives ou de bandes abrasives pour obtenir un effet miroir. Le dispositif de polissage électrochimique dissout sélectivement les protubérances microscopiques à la surface du fil par électrolyse pour former une surface lisse. Ces dispositifs peuvent améliorer considérablement la finition de surface du fil de molybdène, réduire les éclaboussures de gouttelettes fondues pendant le processus de pulvérisation et améliorer la qualité du revêtement.

6.3 Équipement de pulvérisation

L'équipement de pulvérisation est au cœur de la production de fil de pulvérisation de molybdène, qui est utilisé pour fondre et déposer le fil de molybdène sur la surface du substrat pour former un revêtement protecteur. Il s'agit notamment de systèmes de pulvérisation à la flamme, d'équipements de pulvérisation plasma, d'unités de pulvérisation à l'arc et d'équipements d'oxyprojection à grande vitesse (HVOF), chacun pour des applications et des exigences de revêtement différentes.

6.3.1 Systèmes de pulvérisation à la flamme

Le système de pulvérisation à la flamme est l'une des premières technologies de pulvérisation thermique, utilisant une flamme oxygène-acétylène pour chauffer le fil de molybdène, le faisant fondre ou semi-fondre et le pulvériser sur la surface du substrat par air comprimé. Le système de pulvérisation à la flamme se compose d'un pistolet pulvérisateur, d'un dispositif d'alimentation en fil, d'un système d'alimentation en gaz et d'une unité de commande.

Le pistolet de pulvérisation est le composant central du système de pulvérisation à la flamme, équipé d'une chambre de combustion et de buses qui créent une flamme à haute température et contrôlent la direction des gouttelettes. Le dispositif d'alimentation en fil alimente le fil de molybdène dans le pistolet de pulvérisation à une vitesse constante grâce à une commande précise du moteur, assurant ainsi la stabilité du processus de fusion. Le système d'alimentation en gaz fournit de l'oxygène et de l'acétylène, et le rapport de mélange est ajusté par un débitmètre pour optimiser la température et la stabilité de la flamme. L'unité de commande ajuste les paramètres de pulvérisation tels que la vitesse d'alimentation du fil, l'intensité de la flamme et la distance de pulvérisation via une interface numérique.

Le système de pulvérisation à la flamme a une structure simple et convient à la construction sur site et au dépôt de revêtement sur de grandes surfaces, et est largement utilisé dans la réparation de pièces automobiles et la protection des machines industrielles. Cependant, la température de la flamme est plus basse et la porosité du revêtement est élevée, ce qui doit être optimisé en conjonction

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

avec l'équipement de post-traitement. Les systèmes modernes de pulvérisation à la flamme intègrent un contrôle automatisé et une surveillance en ligne pour améliorer l'efficacité et la cohérence de la pulvérisation.

6.3.2 Équipement de pulvérisation au plasma

L'équipement de pulvérisation plasma utilise du plasma à haute température (jusqu'à 15 000 °C) pour faire fondre les fils de molybdène afin de former un flux à grande vitesse de filets fondus qui se déposent à la surface du substrat pour former un revêtement dense. Cet équipement comprend un pistolet à plasma pulvérisateur, un système d'alimentation électrique, un système d'alimentation en gaz et une unité de refroidissement.

Le pistolet à plasma convertit un gaz inerte (tel que l'argon ou l'azote) en un plasma à haute température au moyen d'un arc électrique, et le fil de molybdène est introduit dans le flux de plasma pour fondre rapidement. La conception de la buse du pistolet de pulvérisation doit assurer la stabilité et la directivité du flux de plasma pour améliorer la qualité du revêtement. Le système d'alimentation fournit un courant continu à haute tension, qui contrôle la force et la stabilité de l'arc. Le système d'alimentation en gaz régule avec précision le débit et la composition du gaz plasma afin d'optimiser l'effet de fusion. Le dispositif de refroidissement empêche le pistolet de surchauffer au moyen d'un refroidissement par eau ou par air, prolongeant ainsi la durée de vie de l'équipement.

L'équipement de pulvérisation plasma est capable de produire des revêtements de molybdène de haute dureté et à faible porosité pour des applications hautes performances dans les secteurs de l'aérospatiale et de l'énergie. Sa grande précision et sa flexibilité lui permettent de traiter des substrats aux géométries complexes, mais les coûts d'équipement sont élevés, l'opération est complexe et une assistance technique professionnelle est nécessaire.

6.3.3 Dispositif de pulvérisation à l'arc

Le dispositif de pulvérisation à l'arc utilise le chauffage à l'arc entre deux fils de molybdène pour faire fondre le fil et le pulvériser sur la surface du substrat à travers de l'air comprimé. Un tel appareil comprend un pistolet à pulvérisation à arc, un système d'alimentation en fil, un système d'alimentation électrique et un compresseur d'air.

Le pistolet à arc crée un arc stable en contrôlant avec précision le contact de deux fils de molybdène, faisant fondre l'extrémité du fil. Le système d'alimentation en fil est entraîné par deux moteurs pour s'assurer que les deux fils de molybdène sont introduits dans le pistolet de pulvérisation à la même vitesse afin de maintenir la stabilité de l'arc. Le système d'alimentation fournit une alimentation en courant continu ou alternatif, régulant l'intensité et la durée de l'arc. Le compresseur d'air crée un flux d'air à haute pression qui atomise et pulvérise des gouttelettes de molybdène fondu sur le substrat pour former un revêtement uniforme.

L'unité de pulvérisation à l'arc a une efficacité de dépôt élevée et convient à la pulvérisation de grandes surfaces, telles que les structures en acier des ponts ou la protection des composants de navires. Sa qualité de revêtement se situe entre la pulvérisation à la flamme et la pulvérisation

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

plasma, et son coût est faible, ce qui le rend adapté à la production industrielle. Les unités de pulvérisation à l'arc modernes intègrent un système de contrôle automatisé pour améliorer la cohérence et la productivité de la pulvérisation.

6.3.4 Équipement d'oxypulvérisation à grande vitesse (HVOF)

L'équipement d'oxypulvérisation à grande vitesse (HVOF) utilise la combustion à haute pression d'oxygène et de carburant, comme le kérosène ou le propane, pour produire une flamme supersonique qui fait fondre le fil de molybdène et le pulvérise sur la surface du substrat à des vitesses extrêmement élevées. Cet équipement comprend des pistolets de pulvérisation HVOF, des systèmes d'alimentation en carburant, des systèmes d'alimentation en oxygène et des unités de refroidissement.

Le pistolet de pulvérisation HVOF enflamme le mélange de carburant et d'oxygène à travers la chambre de combustion et la conception de la buse, formant un flux de flamme à haute température et haute pression. Le fil de molybdène est introduit dans un flux de flamme pour fondre rapidement et est pulvérisé sur le substrat à des vitesses supersoniques pour former un revêtement dense et à faible porosité. Le système d'alimentation en carburant et en oxygène optimise l'efficacité de la combustion et la vitesse de la flamme grâce à un contrôle précis du débit. L'unité de refroidissement protège la lance des dommages causés par les températures élevées au moyen d'un système de refroidissement par eau.

L'équipement HVOF est capable de produire des revêtements en molybdène à haute dureté et à haute adhérence, qui conviennent aux applications haut de gamme telles que les moteurs d'avion et les turbines à gaz. Ses caractéristiques de vitesse élevée et de basse température réduisent l'oxydation et le stress thermique du revêtement, mais la complexité et le coût de l'équipement sont élevés. L'équipement HVOF moderne est équipé d'un système de contrôle numérique et d'une fonction de surveillance en ligne, qui est capable d'ajuster les paramètres de pulvérisation en temps réel et d'améliorer la qualité du revêtement.

6.4 Équipement auxiliaire et de post-traitement

Des équipements auxiliaires et de post-traitement sont utilisés pour prendre en charge la préparation du substrat, la finition du revêtement et l'inspection de la qualité dans le processus de pulvérisation afin de garantir les performances et la fiabilité du produit final. Cette section traite de l'équipement de prétraitement du substrat, de l'équipement de post-traitement du revêtement et de l'équipement d'inspection et de surveillance en ligne.

6.4.1 Équipement de prétraitement du substrat

L'équipement de prétraitement du substrat est utilisé pour nettoyer et optimiser la surface du substrat et améliorer l'adhérence du revêtement. Il s'agit notamment de machines de sablage, de réservoirs de nettoyage chimique et de nettoyeurs à ultrasons.

La sableuse augmente la rugosité de la surface du substrat en projetant à grande vitesse des abrasifs tels que l'alumine ou le carbure de silicium, en éliminant les oxydes et les anciens revêtements. Les

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

machines de sablage abrasif modernes sont équipées de systèmes de jet automatisés et de dispositifs de récupération, qui peuvent contrôler le débit d'abrasif et l'angle de pulvérisation, améliorant ainsi l'efficacité du traitement et le respect de l'environnement. Les bains de nettoyage chimique utilisent des solutions alcalines ou acides pour éliminer l'huile et les contaminants organiques, et sont équipés d'un système de filtration par circulation pour assurer la pureté du liquide de nettoyage. Les nettoyeurs à ultrasons utilisent des ondes sonores à haute fréquence pour créer de minuscules bulles afin d'éliminer les particules de taille micrométrique de la surface du substrat et conviennent aux pièces à géométries complexes.

Ces machines nécessitent des paramètres de processus adaptés au matériau et à la forme du substrat. Par exemple, les substrats en alliage d'aluminium nécessitent des conditions de sablage et de nettoyage douces, tandis que les substrats en acier inoxydable peuvent résister à une résistance de traitement accrue. La synergie de l'équipement de prétraitement offre une surface de substrat idéale pour le processus de pulvérisation.

6.4.2 Équipement de post-traitement du revêtement

Les équipements de post-traitement des revêtements sont utilisés pour optimiser les performances des revêtements, y compris les fours de traitement thermique, les machines de polissage et les unités de traitement des joints. Le four de traitement thermique est chauffé sous vide ou sous atmosphère protectrice afin d'éliminer les contraintes résiduelles dans le revêtement et d'améliorer la microstructure. Les fours de traitement thermique modernes sont équipés d'un système de chauffage et de refroidissement à plusieurs étages qui permet un contrôle précis du profil de température afin d'éviter la fissuration du revêtement.

Les machines à polir comprennent les équipements de polissage mécanique et électrochimique. Les machines de polissage mécanique meulent la surface du revêtement à l'aide d'abrasifs, réduisant ainsi la rugosité et améliorant la finition. L'unité de polissage électrochimique lisse la surface revêtue par électrolyse et convient aux applications de haute précision. Les dispositifs de traitement des joints améliorent la résistance à la corrosion en pulvérisant ou en imprégnant des produits d'étanchéité organiques/inorganiques pour remplir les pores du revêtement. Ces dispositifs améliorent considérablement la durabilité et la fonctionnalité des revêtements.

6.4.3 Équipement de détection et de surveillance en ligne

Les équipements d'inspection et de surveillance en ligne, y compris les jauges d'épaisseur laser, les caméras thermiques et les détecteurs à ultrasons, sont utilisés pour évaluer le processus de revêtement et la qualité du revêtement en temps réel. Les mesureurs d'épaisseur laser inspectent avec précision l'épaisseur et l'uniformité du revêtement grâce à des mesures sans contact. Les caméras thermiques surveillent la répartition de la température des substrats et des revêtements afin d'éviter la surchauffe ou le refroidissement inégal. Les détecteurs à ultrasons sont utilisés pour détecter les pores ou les fissures à l'intérieur des revêtements afin d'assurer la qualité.

Ces appareils sont intégrés à des systèmes d'acquisition de données pour enregistrer les paramètres de processus et les résultats des tests en temps réel afin de fournir un support de données pour la

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

gestion de la qualité et l'optimisation des processus. Les équipements d'inspection modernes prennent également en charge la surveillance à distance, ce qui permet aux opérateurs d'analyser l'état de l'équipement via une plate-forme basée sur le cloud afin d'améliorer la productivité et la fiabilité.

6.5 Automatisation et équipement intelligent

L'automatisation et les équipements intelligents représentent l'orientation future de la technologie de production de fil de pulvérisation de molybdène, grâce à l'intégration de robots, de capteurs et de la technologie d'intelligence artificielle pour obtenir une production efficace et précise. Cette section aborde les lignes de pulvérisation automatisées, les systèmes intelligents de contrôle et d'acquisition de données, ainsi que les systèmes de pulvérisation robotisés.

6.5.1 Ligne de production de pulvérisation automatique

La ligne de pulvérisation automatisée intègre des équipements de pulvérisation, des systèmes d'alimentation en fil et des convoyeurs pour réaliser une production continue, du prétraitement du substrat au post-traitement du revêtement. La ligne de production est équipée d'un système de contrôle automatique, qui coordonne le travail de chaque équipement par le biais d'un PLC (contrôleur logique programmable) pour assurer la stabilité des paramètres du processus. Les convoyeurs, tels que les bandes transporteuses ou les bras robotisés, déplacent le substrat de la station de prétraitement à la station de pulvérisation, puis à la station de post-traitement, réduisant ainsi les interventions manuelles.

L'avantage d'une ligne de pulvérisation automatisée est sa grande efficacité et sa cohérence. Par exemple, une ligne de pulvérisation de pièces automobiles est capable de traiter en continu des milliers de segments de piston avec un écart de qualité de revêtement inférieur à 1 %. La ligne de production est également équipée d'un système de recyclage des déchets pour réduire les éclaboussures de fil de molybdène et répondre aux exigences de la fabrication écologique.

6.5.2 Systèmes intelligents de contrôle et d'acquisition de données

Le système de contrôle intelligent et d'acquisition de données (SCADA) utilise des capteurs et la technologie IoT pour surveiller en temps réel les paramètres clés du processus de pulvérisation, tels que la température, la pression et la vitesse d'alimentation du fil. Ces systèmes, combinés à des algorithmes d'intelligence artificielle, sont capables de prédire les écarts de processus et d'ajuster automatiquement les paramètres. Par exemple, les modèles d'apprentissage automatique peuvent améliorer la qualité du revêtement en optimisant les distances de pulvérisation et les débits de gaz en fonction des données historiques.

Le système SCADA prend également en charge la visualisation des données et la gestion à distance, ce qui permet aux opérateurs de visualiser l'état de la production en temps réel via des appareils mobiles. La base de données basée sur le cloud consolide les données opérationnelles de plusieurs lignes de production pour soutenir l'optimisation des processus et la maintenance des équipements. Ce système intelligent améliore considérablement l'efficacité de la production et la qualité des produits, et favorise la transformation numérique de la technologie de revêtement.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Spray Wire Introduction

1. Overview of Molybdenum Spray Wire

Molybdenum spray wire is a high-purity molybdenum metal wire that is melted and deposited onto a substrate surface through thermal spray techniques such as flame spraying, plasma spraying, arc spraying, or HVOF (High Velocity Oxy-Fuel). The resulting coating offers excellent resistance to wear, corrosion, and high temperatures. Due to its high melting point and superior performance, molybdenum wire is widely used across various industrial sectors.

2. Characteristics of Molybdenum Spray Wire

High Melting Point: Approximately 2623°C, suitable for high-temperature environments.

Excellent Corrosion Resistance: Resists attack from acids, alkalis, and chemical media.

High Hardness & Wear Resistance: Tough coating that withstands mechanical wear.

Low Friction Coefficient: Reduces component wear and improves efficiency.

Chemical Stability: Maintains performance in harsh environments.

High Thermal Conductivity: Effectively dissipates heat and extends component lifespan.

3. Typical Uses of Molybdenum Spray Wire

Aerospace: Turbine blades, engine parts, thermal barrier coatings.

Automotive Industry: Wear-resistant coatings for piston rings, engine blocks, and brake discs.

Chemical & Energy Sectors: Corrosion-resistant pipelines, heat exchangers, wind power equipment.

Electronics & Semiconductors: Vacuum deposition heating wires, semiconductor leads.

Medical Field: Corrosion-resistant coatings for implants and surgical instruments.

Others: Marine anti-corrosion, wear-resistant construction machinery, high-temperature furnaces.

4. Basic Data of Molybdenum Spray Wire from CTIA GROUP LTD

Purity	≥99.95%
Density	10.2 g/cm ³
Diameter Range	1.0-3.0 mm, customizable
Tensile Strength	Moderate to ensure stable wire feeding
Packaging	Customized Packaging

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

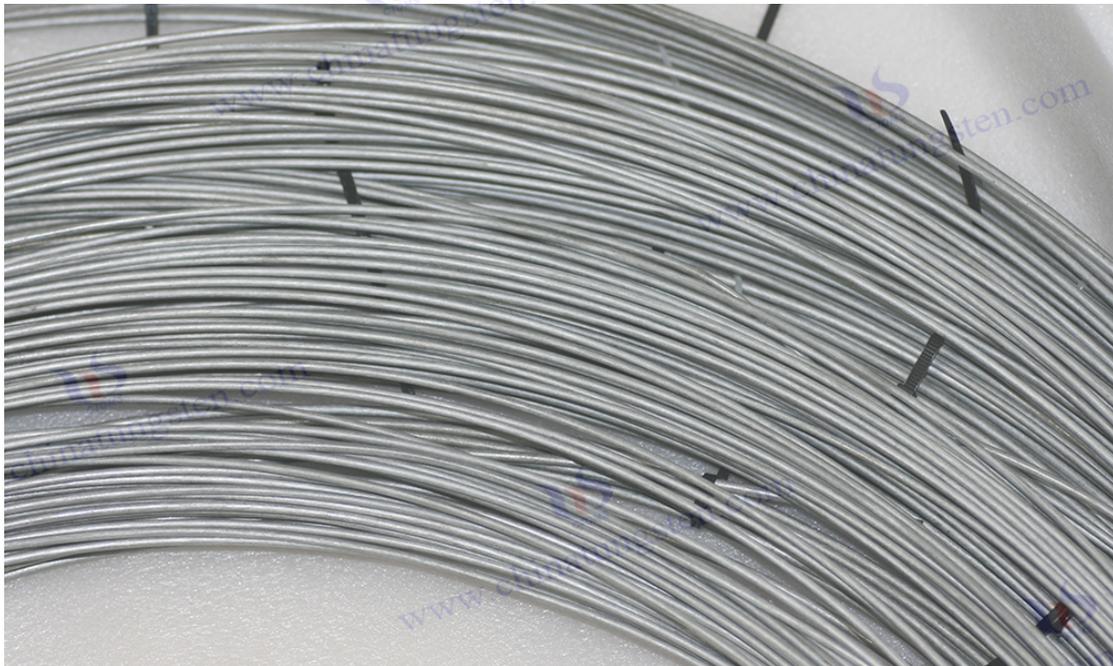
Website: www.molybdenum.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

6.5.3 Systèmes de pulvérisation robotisés

Le système de revêtement robotisé utilise des robots industriels multi-axes pour réaliser un revêtement précis de substrats complexes. Le robot est équipé d'une technologie de reconnaissance visuelle et de planification de trajectoire, qui peut s'adapter à différentes formes et tailles de substrats, et ajuster automatiquement l'angle du pistolet et la trajectoire de mouvement. Le robot de pulvérisation est intégré à un système d'inspection en ligne pour fournir un retour d'information en temps réel sur la qualité du revêtement et optimiser dynamiquement les paramètres de revêtement.

L'utilisation de systèmes de pulvérisation robotisés a considérablement augmenté la flexibilité de la production. Par exemple, dans le secteur aérospatial, les robots sont capables de préparer un revêtement uniforme en molybdène pour la surface incurvée des pales de turbine ; Dans l'industrie automobile, les robots peuvent passer rapidement d'un programme de pulvérisation à l'autre pour différentes pièces, réduisant ainsi les temps de cycle. La large application de ces systèmes a favorisé le développement de la production de fil de pulvérisation de molybdène dans le sens de l'intelligence et de la flexibilité.



CTIA GROUP LTD fil de pulvérisation de molybdène

Chapitre 7 Normes nationales et étrangères pour le fil de pulvérisation de molybdène

En tant que matériau haute performance, la production et l'application du fil de pulvérisation de molybdène doivent suivre des normes strictes pour garantir la qualité du produit, l'uniformité du processus et la sécurité de l'application. Un certain nombre de normes ont été formulées pour le fil de molybdène et les matériaux de projection thermique au pays et à l'étranger, couvrant les matières premières, la technologie de traitement, les tests de performance et les spécifications d'application. Ce chapitre examinera systématiquement les normes nationales, les normes internationales, les normes de l'industrie et les spécifications d'entreprise relatives au fil de pulvérisation de molybdène, et procédera à une analyse approfondie des différences et de l'applicabilité de ces normes, afin de fournir une référence aux producteurs et aux utilisateurs.

7.1 Normes nationales pour le fil de pulvérisation de molybdène

En tant que plus grand producteur et consommateur mondial de ressources en molybdène, la Chine a formulé une série de normes nationales (GB/T) relatives au fil de molybdène et aux matériaux de projection thermique, qui fournissent des spécifications pour la production, les tests et l'application du fil de molybdène. Ces normes sont publiées par l'Administration de normalisation de la République populaire de Chine et sont largement utilisées dans les industries nationales de traitement du molybdène et de projection thermique. Cette section présentera en détail les normes nationales directement liées au fil de pulvérisation de molybdène, y compris GB/T 4181-2017 « Fil de molybdène », GB/T 3462-2017 « Barre de molybdène et ébauche de molybdène », GB/T 4197-2011 « Fil métallique pour la pulvérisation » et d'autres normes pertinentes.

7.1.1 GB/T 4181-2017 « Fil de molybdène » et exigences connexes

GB / T 4181-2017 « Fil de molybdène » est une norme nationale pour la préparation et la performance du fil de molybdène en Chine, qui convient au fil de molybdène à diverses fins, y compris le fil de molybdène pour la pulvérisation. La norme spécifie en détail la composition chimique, la tolérance dimensionnelle, les propriétés mécaniques, la qualité de surface et les méthodes d'essai du fil de molybdène, qui fournit une base technique pour la production de fil de molybdène.

La norme comporte des exigences extrêmement strictes pour la composition chimique du fil de molybdène, stipulant que la pureté du molybdène doit atteindre plus de 99,95 % et limitant la teneur en impuretés telles que le fer, le nickel, le carbone et l'oxygène. Ces exigences garantissent que le fil de molybdène a un comportement de fusion stable et d'excellentes propriétés de revêtement pendant le processus de pulvérisation. La norme stipule également la plage de diamètre et la tolérance du fil de molybdène, qui est généralement de 0,02 mm à 3,0 mm, et le fil de molybdène pour la pulvérisation est principalement concentré dans la plage de 1,0 mm à 2,0 mm pour répondre aux besoins des différents équipements de pulvérisation.

En termes de propriétés mécaniques, la norme exige que le fil de molybdène ait une résistance à la traction et une ductilité appropriées pour garantir qu'il n'est pas facile à casser lors du tréfilage et de l'alimentation du fil. La qualité de surface est un autre critère clé, et le filament de molybdène pour

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

la pulvérisation doit avoir une surface lisse, sans fissures et sans oxyde pour réduire les éclaboussures de gouttelettes pendant le processus de pulvérisation. Les méthodes d'inspection comprennent l'analyse chimique (à l'aide de la spectrométrie d'émission de plasma à couplage inductif), la mesure dimensionnelle (à l'aide d'un micromètre de haute précision ou d'un pied à coulisse laser) et l'inspection de surface (à l'aide de la microscopie ou de l'inspection visuelle).

GB/T 4181-2017 couvre les domaines de l'aérospatiale, de l'industrie automobile et de l'électronique, et constitue la base de la production standardisée de fil de pulvérisation de molybdène. La norme met également l'accent sur les exigences d'emballage et de transport, stipulant que le fil de molybdène doit être scellé sous vide ou protégé contre un gaz inerte pour éviter l'humidité ou l'oxydation.

7.1.2 GB/T 3462-2017

GB/T 3462-2017 « Barre de molybdène et billette de molybdène » est une norme nationale pour les matières premières en phase de pré-production de fil de molybdène, qui s'applique aux barres de molybdène et aux billettes de molybdène préparées par le procédé de métallurgie des poudres. Ces matériaux sont le point de départ du processus de tréfilage, et leur qualité affecte directement les performances du fil de pulvérisation de molybdène.

Cette norme spécifie la composition chimique, la taille, la densité et la qualité de surface des barres de molybdène et des ébauches de molybdène. Les exigences de composition chimique sont conformes à la norme GB/T 4181-2017, et la pureté du molybdène doit atteindre 99,95 %, et la teneur en impuretés doit être limitée pour assurer la stabilité du traitement ultérieur. En termes de taille, la norme couvre une large gamme de barres et d'ébauches en molybdène, généralement avec des diamètres allant de 5 mm à 100 mm, et des longueurs adaptées aux besoins de l'utilisateur. La masse volumique est un indicateur important de la billette de molybdène, qui doit être proche de la masse volumique théorique ($10,2 \text{ g/cm}^3$) pour s'assurer qu'il n'y a pas de défauts internes pendant le processus de tréfilage.

La qualité de surface exige que la surface des barres de molybdène et des ébauches de molybdène soit exempte de fissures, de tartre d'oxyde ou d'inclusions, et les exigences de finition doivent être tournées ou rectifiées pour répondre aux exigences de finition. Les méthodes d'inspection comprennent la détection de défauts par ultrasons (vérification des défauts internes), l'analyse chimique et l'observation microstructurale (évaluation de la taille et de l'uniformité des grains). La norme spécifie également les paramètres du processus de traitement thermique, tels que les températures de frittage et de forgeage, afin d'optimiser la microstructure de la billette de molybdène.

Pour la production de fil de pulvérisation de molybdène, GB/T 3462-2017 fournit des spécifications pour des matières premières de haute qualité afin de garantir que les barres de molybdène et les ébauches de molybdène peuvent répondre aux exigences strictes du tréfilage et de la pulvérisation. Cette norme est largement utilisée dans les entreprises nationales de traitement du molybdène, telles que le molybdène Jinduicheng et le molybdène de Luoyang.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

7.1.3 GB/T 4197-2011

GB/T 4197-2011 « Fil métallique pour la pulvérisation » est une norme spéciale pour le fil métallique pour la pulvérisation thermique en Chine, couvrant une variété de matériaux de fil métallique, y compris le fil de molybdène. Cette norme fournit des conseils spécifiques sur les performances, les spécifications et les essais du fil de pulvérisation de molybdène, et s'applique particulièrement aux procédés de pulvérisation à la flamme et à l'arc.

La norme spécifie la composition chimique, les tolérances dimensionnelles, l'état de surface et les exigences d'emballage du fil de molybdène pour la pulvérisation. La pureté chimique du fil de molybdène doit répondre aux exigences de GB/T 4181-2017, et la surface doit être lisse, sans huile et sans oxyde pour assurer l'uniformité des gouttelettes de fusion et la qualité du revêtement pendant le processus de pulvérisation. Les exigences de tolérance dimensionnelle sont strictes et l'écart de diamètre du fil de molybdène pour la pulvérisation doit être contrôlé à $\pm 0,02$ mm pour répondre aux besoins du système d'alimentation automatique du fil.

En termes d'essais de performance, la norme exige des essais de traction, des essais de rugosité de surface et des essais de pulvérisation des fils de molybdène. L'essai de traction évalue la résistance à la traction et la ductilité du fil pour s'assurer qu'il n'est pas facile de se casser lors de l'alimentation du fil. L'essai de rugosité de surface est mesuré à l'aide d'un profilomètre pour s'assurer que l'état de surface du fil répond aux exigences de pulvérisation. L'essai de pulvérisation évalue l'adhérence, la porosité et l'uniformité du revêtement par des opérations de pulvérisation réelles, en utilisant des méthodes d'essai internationalement acceptées telles que ASTM C633 comme référence.

La formulation de GB/T 4197-2011 comble le vide dans la normalisation du fil métallique pour la pulvérisation en Chine et fournit un support technique pour l'application du fil de pulvérisation de molybdène dans les domaines de l'automobile, de l'énergie et de la construction navale. La norme met également l'accent sur les exigences en matière de protection de l'environnement, stipulant que les gaz résiduels et les émissions de déchets doivent être réduits dans le processus de production, conformément à la tendance de la fabrication verte.

7.1.4 Autres normes nationales pertinentes

En plus des normes de base mentionnées ci-dessus, la Chine a également formulé un certain nombre de normes nationales relatives à la production et à l'application du fil de pulvérisation de molybdène, couvrant les matières premières, la technologie de traitement et les propriétés de revêtement. Par exemple:

GB/T 15258-2009 « Principes généraux des méthodes d'analyse chimique » : fournit des méthodes générales pour l'analyse de la composition chimique des fils et des revêtements de molybdène, y compris la spectrométrie d'émission de plasma à couplage inductif (ICP-OES) et la spectrométrie d'absorption atomique (AAS), afin d'assurer une détection précise de la teneur en impuretés.

GB/T 4325-2013 « Méthodes d'analyse chimique du molybdène et des alliages de molybdène » : Spécifiquement pour les matériaux en molybdène, les méthodes d'analyse du fer, du nickel, du

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

carbone, de l'oxygène et d'autres éléments sont spécifiées, ce qui fournit une base technique pour la détection des matières premières et des produits finis du fil de pulvérisation de molybdène.

GB/T 17733-2008 « Exigences de qualité pour les revêtements par projection thermique » : Il spécifie les exigences de performance des revêtements par projection thermique, y compris l'adhérence, la dureté, la porosité et la résistance à la corrosion, et convient aux revêtements préparés par des fils de molybdène pulvérisés.

GB/T 14842-2007 « Méthodes d'essai pour les propriétés mécaniques du molybdène et des alliages de molybdène » : Il fournit des spécifications pour l'essai de résistance à la traction, de ductilité et de dureté du fil de molybdène afin de s'assurer qu'il répond aux exigences de propriété mécanique du processus de pulvérisation.

Ensemble, ces normes constituent un système complet de spécifications pour la production et l'application du fil de pulvérisation de molybdène, couvrant tous les maillons, des matières premières aux produits finis. Lorsque les entreprises nationales produisent du fil de molybdène, elles doivent généralement se conformer à un certain nombre de normes en même temps pour répondre aux besoins de différentes industries et clients.

7.2 Normes internationales pour le fil de pulvérisation de molybdène

Les normes internationales fournissent un cadre unifié pour le commerce mondial et l'échange technique de fils de molybdène, qui sont principalement formulés par l'American Society for Testing and Materials (ASTM), l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et d'autres institutions. Ces normes font autorité en termes de composition chimique, de tests de performance et de spécifications d'application, et sont largement utilisées dans les industries de traitement du molybdène et de projection thermique en Europe, en Amérique et en Asie. Cette section se concentrera sur les tiges, barres et fils en molybdène et en alliage de molybdène ASTM B387-18, la spécification ISO 20407 pour les matériaux de projection thermique, la norme ISO 14919 pour la pulvérisation thermique et d'autres normes internationales pertinentes.

7.2.1 Miroites, barres et fils en molybdène et en alliage de molybdène ASTM B387-18

La norme ASTM B387-18 est une norme américaine pour le molybdène et les alliages de molybdène, qui convient à diverses formes de matériaux en molybdène tels que les tiges, les bandes et les fils, y compris le fil de molybdène pour la pulvérisation. Cette norme a été développée par ASTM International et est largement utilisée dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'électronique et de l'énergie.

La norme spécifie la composition chimique, les propriétés mécaniques, les tolérances dimensionnelles et la qualité de surface du fil de molybdène. Les exigences de pureté du molybdène sont divisées en plusieurs grades, le grade le plus élevé (type 361) nécessite une teneur en molybdène de 99,97 % et la teneur en impuretés (telles que le carbone, l'oxygène, le fer) est strictement limitée. Le fil de molybdène pour la pulvérisation est généralement sélectionné dans un degré de pureté élevé pour assurer la stabilité chimique et les performances du revêtement. La

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

tolérance dimensionnelle exige que l'écart de diamètre du fil de molybdène soit contrôlé à $\pm 0,01$ mm et que la surface soit exempte de fissures, d'oxydes ou d'autres défauts.

Les essais de propriétés mécaniques comprennent la résistance à la traction, l'allongement et la dureté, et la norme fournit des méthodes d'essai détaillées telles que des essais de traction (voir ASTM E8) et des essais de dureté (voir ASTM E18). Des contrôles de qualité de surface sont effectués à l'aide d'observations visuelles et microscopiques pour s'assurer que les filaments sont adaptés aux exigences élevées de la projection thermique. La norme stipule également les exigences en matière d'emballage et d'étiquetage pour les fils de molybdène, qui doivent être emballés de manière étanche à l'humidité et à l'oxydation, et marqués du numéro de lot, des spécifications et des informations sur le fabricant.

La norme ASTM B387-18 est fortement internationalisée, et de nombreuses entreprises chinoises sont tenues de se conformer à cette norme lors de l'exportation de fils de molybdène enduits de pulvérisation. Les exigences de haute précision de la norme la rendent particulièrement adaptée aux applications dans les industries aérospatiale et des semi-conducteurs, telles que les revêtements d'aubes de turbine et les fils chauffants revêtus sous vide.

7.2.2 Spécification ISO 20407 pour les matériaux par projection thermique

ISO 20407 est une spécification générale pour les matériaux par projection thermique élaborée par l'Organisation internationale de normalisation, couvrant une variété de formes de matériaux telles que le fil, la poudre et la tige, y compris le fil de molybdène. Cette norme fournit un cadre pour les performances, les tests et l'application des matériaux de projection thermique pour des processus tels que la pulvérisation à la flamme, la pulvérisation au plasma et la pulvérisation à l'arc.

La norme définit les exigences relatives à la composition chimique, à la taille et à l'état de surface du fil de pulvérisation de molybdène. La pureté du fil de molybdène doit atteindre plus de 99,95 % et la surface doit être lisse, sans huile et sans oxyde pour assurer la stabilité et la qualité du revêtement pendant le processus de pulvérisation. Les exigences de tolérance dimensionnelle sont similaires à celles de la norme ASTM B387-18, et l'écart de diamètre doit être contrôlé à $\pm 0,02$ mm près. La norme spécifie également les conditions d'emballage et de stockage du fil, qui doit être scellé sous vide ou protégé contre les facteurs environnementaux.

En ce qui concerne les essais de performance, l'ISO 20407 fournit un certain nombre de méthodes d'essai, y compris l'analyse chimique (par spectroscopie), l'essai de rugosité de surface (en référence à l'ISO 4287) et l'essai de performance par pulvérisation. L'essai de performance de pulvérisation évalue l'adhérence, la porosité et la microstructure des revêtements à l'aide de normes d'essai internationalement acceptées telles que ASTM C633 (essai d'adhérence) et ISO 6507 (essai de dureté). La norme met également l'accent sur un système de gestion de la qualité qui exige des fabricants qu'ils établissent des registres traçables pour garantir des performances constantes d'un lot à l'autre.

La polyvalence de la norme ISO 20407 la rend adaptée à l'industrie mondiale de la projection

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

thermique, en particulier sur les marchés européens et asiatiques. La norme fournit une base technique pour le commerce international du fil de molybdène pulvérisé et promeut la coopération transfrontalière et les échanges techniques.

7.2.3 Fil ISO 14919 pour la projection thermique

L'ISO 14919 est une norme spécifique aux fils pour projection thermique et s'applique à une large gamme de matériaux de fil, y compris le fil de molybdène. Cette norme spécifie en détail les spécifications, les propriétés et les méthodes d'essai pour la pulvérisation de fils, et fournit des spécifications pour les procédés de pulvérisation à la flamme et à l'arc.

La norme exige que le fil de pulvérisation de molybdène ait une pureté élevée et une composition chimique uniforme, que la teneur en molybdène atteigne 99,95 % et que la teneur en impuretés soit strictement contrôlée. En termes de dimensions, la norme spécifie une plage de diamètres commune (1,0 mm à 3,2 mm) avec des tolérances conformes à la norme ISO 286. La qualité de surface exige que le fil n'ait pas de fissures, pas d'oxydes, pas de résidus de lubrifiant et doit être nettoyé ou poli chimiquement pour atteindre la norme de finition.

Les méthodes d'essai comprennent les essais de traction (pour évaluer la résistance à la traction et la ductilité), les contrôles de qualité de surface (à l'aide de microscopes ou de profilers) et les essais par pulvérisation (pour évaluer les propriétés du revêtement). La norme fournit également des spécifications d'emballage et d'expédition qui exigent que le fil soit emballé de manière à résister à l'humidité et à l'oxydation, avec des informations d'identification détaillées telles que le type de matériau, le numéro de lot et la date de fabrication.

La spécificité de l'ISO 14919 en fait une norme de référence importante pour l'industrie de la projection thermique, en particulier pour les applications de revêtement dans les secteurs de l'automobile, de la marine et de l'énergie. La norme complète l'ISO 20407 et forme ensemble un système complet de spécifications des matériaux par projection thermique.

7.2.4 Autres normes internationales

En plus des normes de base ci-dessus, il existe un certain nombre de normes internationales relatives au revêtement du fil de molybdène, aux matériaux de revêtement, aux processus et aux propriétés de revêtement. Par exemple:

ASTM E8/E8M-21 « Méthodes d'essai de traction pour les matériaux métalliques » : Fournit une méthode générale pour tester la résistance à la traction et l'allongement du fil de molybdène, qui convient pour tester les propriétés mécaniques de la norme ASTM B387-18.

Méthode d'essai ASTM C633-13 pour l'adhérence des revêtements par projection thermique : Spécifie une méthode d'essai d'adhérence pour les revêtements par projection thermique, qui est largement utilisée pour évaluer la qualité des revêtements préparés par fil de pulvérisation de molybdène.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Spray Wire Introduction

1. Overview of Molybdenum Spray Wire

Molybdenum spray wire is a high-purity molybdenum metal wire that is melted and deposited onto a substrate surface through thermal spray techniques such as flame spraying, plasma spraying, arc spraying, or HVOF (High Velocity Oxy-Fuel). The resulting coating offers excellent resistance to wear, corrosion, and high temperatures. Due to its high melting point and superior performance, molybdenum wire is widely used across various industrial sectors.

2. Characteristics of Molybdenum Spray Wire

High Melting Point: Approximately 2623°C, suitable for high-temperature environments.

Excellent Corrosion Resistance: Resists attack from acids, alkalis, and chemical media.

High Hardness & Wear Resistance: Tough coating that withstands mechanical wear.

Low Friction Coefficient: Reduces component wear and improves efficiency.

Chemical Stability: Maintains performance in harsh environments.

High Thermal Conductivity: Effectively dissipates heat and extends component lifespan.

3. Typical Uses of Molybdenum Spray Wire

Aerospace: Turbine blades, engine parts, thermal barrier coatings.

Automotive Industry: Wear-resistant coatings for piston rings, engine blocks, and brake discs.

Chemical & Energy Sectors: Corrosion-resistant pipelines, heat exchangers, wind power equipment.

Electronics & Semiconductors: Vacuum deposition heating wires, semiconductor leads.

Medical Field: Corrosion-resistant coatings for implants and surgical instruments.

Others: Marine anti-corrosion, wear-resistant construction machinery, high-temperature furnaces.

4. Basic Data of Molybdenum Spray Wire from CTIA GROUP LTD

Purity	≥99.95%
Density	10.2 g/cm ³
Diameter Range	1.0-3.0 mm, customizable
Tensile Strength	Moderate to ensure stable wire feeding
Packaging	Customized Packaging

5. 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

ISO 4287 Paramètres de texture de surface : Fournit une spécification pour la mesure de la rugosité de surface des fils et des revêtements de molybdène, garantissant que la qualité de surface des fils et des revêtements répond aux exigences du revêtement.

ISO 6507 Essai de dureté Vickers pour les matériaux métalliques : Fournit une méthode pour l'essai de dureté des revêtements en molybdène et convient à l'évaluation de la résistance à l'usure et des propriétés mécaniques des revêtements.

Ces normes fournissent un support technique complet pour la production et l'application du fil de pulvérisation de molybdène, ce qui est d'une grande importance, en particulier sur le marché international. De nombreuses multinationales doivent se conformer à plusieurs normes internationales lors de la production de fil de pulvérisation de molybdène pour répondre aux exigences de différents pays et industries.

7.3 Normes de l'industrie et spécifications d'entreprise pour le fil de pulvérisation de molybdène

En plus des normes nationales et internationales, la production et l'application du fil de pulvérisation de molybdène doivent également respecter les normes de l'industrie et les spécifications internes de l'entreprise. Ces spécifications sont souvent élaborées par des associations industrielles ou des entreprises de premier plan afin de fournir des conseils plus détaillés pour des scénarios d'application ou des exigences techniques spécifiques. Cette section explorera les normes de l'industrie pour les métaux non ferreux, les normes de l'industrie de la projection thermique et les pratiques internes de contrôle de la qualité.

7.3.1 Normes de l'industrie des métaux non ferreux

L'Association chinoise de l'industrie des métaux non ferreux (CNIA) a formulé un certain nombre de normes industrielles relatives aux matériaux en molybdène, complétant ainsi les lacunes des normes nationales. Ces normes sont rédigées par l'Institut de technologie et d'économie des métaux non ferreux et d'autres institutions, et sont largement utilisées dans les entreprises nationales de traitement du molybdène.

YS/T 357-2014 « Molybdène de haute pureté et alliages de molybdène » : Il stipule la composition chimique, les propriétés et les méthodes d'essai du fil de molybdène de haute pureté, de la barre de molybdène et d'autres matériaux en alliage de molybdène, qui conviennent aux matières premières et aux produits semi-finis de fil de pulvérisation de molybdène. Cette norme exige que le molybdène soit pur à 99,99 %, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications dans les industries aérospatiale et des semi-conducteurs.

YS/T 616-2012 « Méthodes d'inspection des produits traités en molybdène et en alliage de molybdène » : Il fournit des méthodes d'inspection détaillées pour la taille, la qualité de surface et les propriétés mécaniques des fils et des barres de molybdène, y compris la détection des défauts par ultrasons, l'analyse de la microstructure et l'essai de dureté.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

YS/T 358-2011 « Poudre de molybdène » : Il stipule la distribution granulométrique, la composition chimique et les propriétés physiques de la poudre de molybdène, et fournit des spécifications pour la préparation des matières premières pour le fil de pulvérisation de molybdène.

Ces normes industrielles fournissent des exigences techniques plus spécifiques pour la production et le traitement des matériaux en molybdène, complétant les normes GB/T. Les normes sont formulées par des entreprises nationales de premier plan (telles que Jinduicheng Molybdenum et Luoyang Molybdenum), reflétant les besoins réels et le niveau technique de l'industrie.

7.3.2 Normes de l'industrie de la projection thermique

Développée par le China National Thermal Spray Group (CNTSG) et d'autres organisations internationales telles que l'American Thermal Spray Society (ASM TSS), la norme de l'industrie de la pulvérisation thermique fournit des conseils sur le processus de revêtement, le matériau et les performances du revêtement.

JB/T 7702-2012 « Spécification technique pour la pulvérisation thermique » : Une norme publiée par la Fédération chinoise de l'industrie des machines, qui spécifie les exigences générales pour le processus de pulvérisation thermique, y compris la préparation du fil de pulvérisation de molybdène, les paramètres de pulvérisation et les tests de revêtement. Cette norme s'applique aux procédés de pulvérisation à la flamme, à l'arc et à la projection plasma.

AWS C2.25/C2.25M : Spécification 2012 pour les matériaux de projection thermique : Une norme développée par l'American Welding Society (AWS) qui couvre les fils et les poudres pour la pulvérisation, y compris le fil de molybdène. Cette norme fournit des spécifications détaillées pour le rendement et les essais des matériaux de pulvérisation et s'applique au marché nord-américain.

EN 15311 Exigences de qualité pour la projection thermique : Une norme européenne qui spécifie les méthodes de contrôle de la qualité pour les revêtements par projection thermique, y compris les essais d'adhérence, de porosité et de rugosité de surface, pour les revêtements préparés par fil de pulvérisation de molybdène.

Ces normes industrielles fournissent des conseils techniques plus granulaires que les normes nationales pour les besoins spécifiques des procédés de projection thermique. Les normes sont élaborées par des experts et des entreprises de l'industrie et reflètent les dernières tendances en matière de technologie de projection thermique.

7.3.3 Spécifications internes du contrôle de la qualité

De nombreuses entreprises de traitement du molybdène et de pulvérisation thermique ont développé des spécifications internes de contrôle de la qualité pour répondre aux besoins de clients ou d'applications spécifiques. Ces spécifications sont souvent basées sur des normes nationales et industrielles, mais ajoutent des exigences plus strictes ou des méthodes d'essai personnalisées.

La force d'un cahier des charges d'entreprise réside dans sa flexibilité et sa pertinence, ainsi que

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

dans sa capacité à répondre rapidement aux évolutions du marché et aux besoins des clients. Ces spécifications sont souvent combinées avec les normes ISO 9001 (système de gestion de la qualité) et ISO 14001 (système de gestion de l'environnement) pour garantir la conformité et la durabilité du processus de production.

7.4 Comparaison des normes et analyse d'applicabilité du fil de pulvérisation de molybdène

Les normes nationales et étrangères et les spécifications de l'industrie fournissent des directives à plusieurs niveaux pour la production et l'application du fil de pulvérisation de molybdène, mais il existe des différences dans son contenu et ses exigences. Comprendre ces différences et choisir la bonne norme est essentiel pour optimiser les processus de production et répondre aux demandes du marché. Cette section analysera les différences entre les normes nationales et étrangères, et discutera de leurs scénarios d'application et de leur base de sélection.

7.4.1 Différences entre les normes nationales et étrangères

Il existe les principales différences suivantes entre les normes nationales et étrangères en termes de composition chimique, d'exigences de performance, de méthodes d'essai et de champ d'application :

Composition chimique : Les normes nationales (par exemple, GB/T 4181-2017) exigent une pureté du fil de molybdène de 99,95 %, tandis que les normes internationales (par exemple, ASTM B387-18) offrent plusieurs degrés de pureté allant jusqu'à 99,97 %. Les normes internationales imposent des limites plus strictes pour certaines impuretés (par exemple, l'oxygène, l'azote) et conviennent aux applications de haute précision.

Tolérances dimensionnelles : Les normes internationales (par exemple, ISO 14919) exigent des tolérances dimensionnelles plus strictes et les écarts de diamètre doivent être contrôlés à $\pm 0,01$ mm, tandis que les normes nationales (par exemple, GB/T 4197-2011) autorisent des écarts de $\pm 0,02$ mm. Cela reflète la demande de fil de haute précision sur le marché international.

Méthodes d'essai : Les normes nationales favorisent l'utilisation de l'analyse spectrale traditionnelle et des méthodes d'essai mécaniques, tandis que les normes internationales (telles que la norme ASTM C633) introduisent des techniques de détection plus avancées, telles que l'analyse MEB et la détection de défauts par ultrasons, avec une plus grande précision de détection.

Champ d'application : Les normes nationales (telles que GB/T 4197-2011) se concentrent davantage sur les applications générales dans les domaines de l'automobile et de l'énergie, tandis que les normes internationales (telles que ISO 20407) couvrent des domaines haut de gamme tels que l'aérospatiale et les semi-conducteurs, en mettant l'accent sur les propriétés particulières des revêtements.

Exigences environnementales : Les normes nationales ont ajouté des dispositions de protection de l'environnement au cours des dernières années (p. ex., GB/T 4197-2011 exige la réduction des émissions de gaz d'échappement), tandis que les normes internationales (p. ex., ISO 20407) ont intégré plus tôt des concepts de fabrication écologique, mettant l'accent sur la durabilité du processus

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

de production.

Ces différences reflètent les différents besoins et niveaux techniques des marchés nationaux et étrangers. Les normes nationales accordent plus d'attention à l'aspect pratique et à la rentabilité, et conviennent aux applications industrielles à grande échelle ; Les normes internationales mettent davantage l'accent sur la haute précision et les hautes performances, qui conviennent au marché haut de gamme.

7.4.2 Scénarios d'application standard et sélection

Le choix des étalons de fil de pulvérisation de molybdène appropriés doit être examiné de manière exhaustive en fonction du scénario d'application, des exigences du client et du positionnement sur le marché. Voici les critères recommandés pour les principaux scénarios d'application :

Aérospatiale : Les normes ASTM B387-18 et ISO 20407 sont recommandées en raison de leurs exigences strictes en matière de pureté élevée et de propriétés de revêtement pour des applications haute performance telles que les aubes de turbine et les revêtements de barrière thermique. Cela peut également être complété par des spécifications internes à l'entreprise, telles que les normes de Plansee.

Automobile : GB/T 4197-2011 et ISO 14919 sont idéales pour les applications de revêtement à usage général telles que les segments de piston, les systèmes d'échappement, etc. Ces étalons sont rentables, disposent de méthodes de détection simples et conviennent à la production à grande échelle.

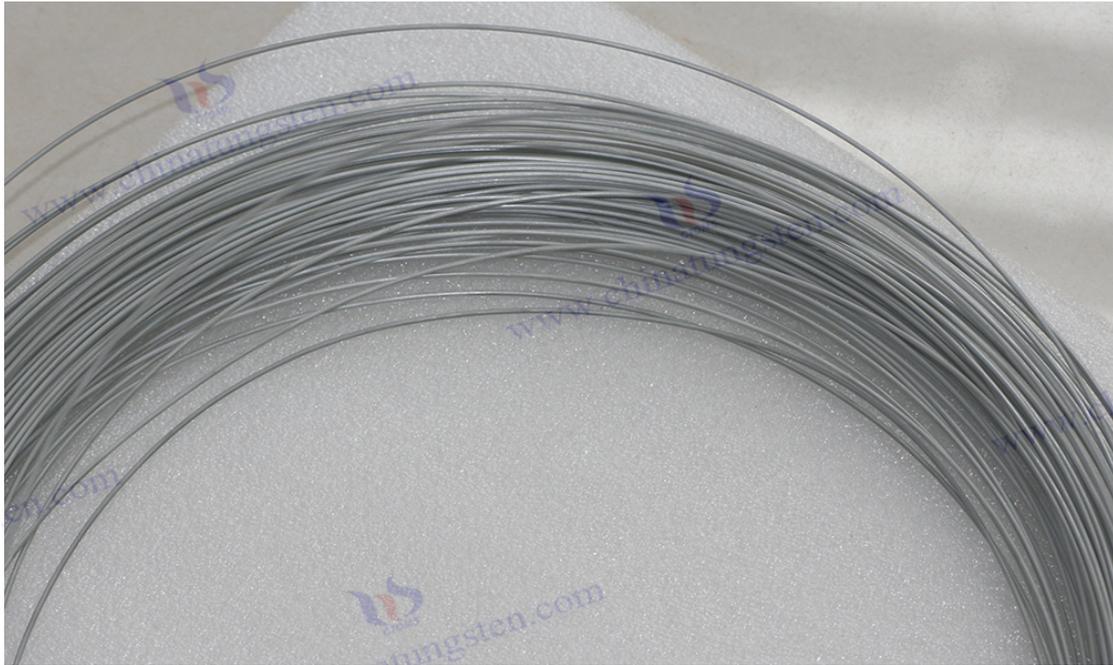
Industrie chimique et énergétique : GB/T 17733-2008 et AWS C2.25 sont recommandés pour les revêtements de tuyaux et d'échangeurs de chaleur résistants à la corrosion. Ces normes spécifient en détail la résistance à la corrosion et la durabilité des revêtements.

Industrie de l'électronique et des semi-conducteurs : Les normes ASTM B387-18 et YS/T 357-2014 conviennent à la préparation de fils de molybdène de haute pureté pour répondre aux exigences strictes des revêtements sous vide et des fils semi-conducteurs.

Marchés d'exportation : La priorité est de répondre aux normes internationales (par exemple, ISO 14919, ASTM B387-18) et aux normes industrielles des marchés cibles (par exemple, EN 15311) pour répondre aux exigences des clients et à la conformité commerciale.

Dans la pratique, les entreprises doivent souvent se conformer à plusieurs normes en même temps. Par exemple, les entreprises qui exportent des fils de molybdène enduits par pulvérisation pour l'aérospatiale peuvent devoir se conformer aux normes GB/T 4181-2017 (production nationale), ASTM B387-18 (marché international) et aux spécifications internes (exigences spécifiques au client). En établissant un système de gestion de la qualité standardisé, les entreprises peuvent répondre de manière flexible aux exigences des différentes normes et améliorer leur compétitivité sur le marché.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale



CTIA GROUP LTD fil de pulvérisation de molybdène

Chapitre 8 : Essais et contrôle de la qualité du fil de pulvérisation de molybdène

La production et l'application du fil de pulvérisation de molybdène ont des exigences de qualité extrêmement élevées, et ses performances affectent directement la durabilité, l'adhérence et la durée de vie du revêtement. Les tests et le contrôle de la qualité sont des éléments clés pour s'assurer que le fil de pulvérisation de molybdène et son revêtement répondent aux normes de l'industrie et aux besoins des clients, couvrant toutes les étapes de la production, des matières premières aux produits finis. Ce chapitre abordera systématiquement les tests de matières premières, les tests de qualité du fil de molybdène, les tests de revêtement par pulvérisation, la technologie et l'équipement de test et le système de gestion de la qualité du fil de pulvérisation de molybdène, et révélera comment obtenir une production de haute qualité grâce à des méthodes de test scientifiques et à des processus de gestion stricts.

8.1 Analyse des matières premières

La qualité des matières premières est à la base de la production de fil de molybdène, en particulier la composition chimique, la taille des particules et la teneur en impuretés de la poudre de molybdène de haute pureté, ce qui affecte directement les performances de traitement et de revêtement ultérieures. L'analyse des matières premières nécessite des méthodes analytiques de haute précision pour s'assurer que la poudre de molybdène répond à des normes strictes. Cette section présentera en détail l'analyse de la composition chimique, les tests de taille et de morphologie des particules et les tests de teneur en impuretés de la poudre de molybdène.

8.1.1 Analyse de la composition chimique de la poudre de molybdène

La composition chimique de la poudre de molybdène est l'indicateur central de sa qualité, qui détermine directement les performances du fil et du revêtement de molybdène. La poudre de

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

molybdène pour la pulvérisation nécessite généralement que la teneur en molybdène atteigne plus de 99,95 %, et la teneur en impuretés telles que le fer, le nickel, le carbone et l'oxygène doit être strictement contrôlée pour éviter les réactions indésirables ou réduire la qualité du revêtement pendant le processus de pulvérisation à haute température.

La spectrométrie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES) et la spectroscopie d'absorption atomique (AAS) ont été utilisées pour l'analyse de la composition chimique. ICP-OES convient à la détection d'impuretés métalliques telles que le fer, le nickel et le silicium par excitation d'échantillons de poudre de molybdène pour générer des spectres caractéristiques et analyser les types et le contenu des éléments, et présente les avantages d'une sensibilité élevée et d'une analyse simultanée de plusieurs éléments. L'AAS détermine avec précision le contenu d'un seul élément en absorbant la lumière à une longueur d'onde spécifique par les atomes, et est couramment utilisé pour détecter des traces de carbone ou de soufre dans la poudre de molybdène. La teneur en oxygène et en azote est généralement déterminée par fusion au gaz inerte, qui détermine avec précision la teneur en impuretés non métalliques en chauffant l'échantillon et en analysant le gaz libéré.

Le processus d'analyse doit être effectué dans un environnement propre pour éviter toute contamination externe. La préparation de l'échantillon implique la dissolution ou la fusion de l'acide, ce qui permet de s'assurer que la poudre de molybdène est complètement décomposée en une solution détectable. Les résultats des tests doivent être comparés aux normes (par exemple, GB/T 4325-2013 « Méthodes d'analyse chimique du molybdène et des alliages de molybdène ») afin de s'assurer que les exigences de pureté de la poudre de molybdène pour la pulvérisation sont respectées. L'analyse de la composition chimique n'est pas seulement utilisée pour l'acceptation des matières premières, mais également pour les tests de lots tout au long du processus de production afin de garantir une qualité constante.

8.1.2 Détection de la taille et de la morphologie des particules de poudre de molybdène

La taille et la morphologie des particules de la poudre de molybdène affectent son comportement dans le processus de pressage, de frittage et d'étirage, ce qui est un point de contrôle important pour la production de fil de pulvérisation de molybdène. La poudre de molybdène idéale doit avoir une distribution granulométrique uniforme et une morphologie régulière des particules pour assurer la densité de l'ébauche et l'uniformité du fil.

La détection de la taille des particules utilise principalement un analyseur de taille de particules laser pour mesurer la taille et la distribution des particules par diffusion du faisceau laser. L'appareil permet d'analyser rapidement la plage granulométrique des poudres de molybdène (généralement de 1 à 50 μm) afin de générer des courbes détaillées de distribution granulométrique. Les résultats des tests doivent être conformes à la norme (par exemple, YS/T 358-2011 « Poudre de molybdène ») pour garantir que la distribution granulométrique est concentrée et qu'il n'y a pas de particules surdimensionnées ou fines. Les particules trop grosses peuvent provoquer des défauts de frittage, tandis que les particules trop fines peuvent réduire la fluidité et affecter l'efficacité du pressage.

La détection topographique utilise la microscopie électronique à balayage (MEB) pour observer la

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

morphologie des particules et les caractéristiques de surface de la poudre de molybdène. Le MEB fournit des images microscopiques à haute résolution qui identifient si les particules sont sphériques, agglomérées ou présentent des défauts de surface. Les particules sphériques ont une bonne fluidité et une bonne densité apparente, ce qui convient au processus de métallurgie des poudres ; Des particules irrégulières peuvent augmenter la difficulté de pressage et affecter la qualité de l'ébauche. La détection MEB est souvent combinée à la spectroscopie d'énergie (EDS) pour analyser la distribution élémentaire à la surface des particules et vérifier la présence d'une contamination par des oxydes ou des impuretés.

Des tests de taille et de morphologie des particules sont effectués régulièrement, couvrant l'entreposage et l'inspection de pré-production de chaque lot de poudre de molybdène. Les données d'essai constituent la base de l'optimisation du processus, par exemple l'ajustement des paramètres de broyage ou de réduction pour obtenir les propriétés souhaitées de la poudre de molybdène.

8.1.3 Détection de la teneur en impuretés

La quantité d'impuretés est un indicateur clé de la qualité de la poudre de molybdène, et des traces d'impuretés peuvent provoquer des défauts de revêtement, tels que la porosité ou des fissures, pendant le processus de pulvérisation. Les tests d'impuretés se concentrent non seulement sur les éléments métalliques (par exemple, le fer, le nickel), mais également sur les éléments non métalliques (par exemple, l'oxygène, l'azote, le carbone, le soufre) et d'autres contaminants à l'état de traces.

La détection de la teneur en oxygène utilise la méthode de fusion des gaz inertes pour déterminer avec précision la teneur en oxygène par absorption infrarouge ou conductivité thermique pour détecter l'oxygène libéré. L'oxygène est l'impureté la plus courante dans la poudre de molybdène, et une teneur en oxygène trop élevée peut provoquer l'oxydation du fil de molybdène à des températures élevées, réduisant ainsi les performances du revêtement. L'azote et le carbone sont détectés de la même manière en brûlant un échantillon et en analysant le gaz résultant, qui est déterminé par chromatographie en phase gazeuse ou spectroscopie infrarouge. Les niveaux de soufre sont généralement mesurés par analyse chimique ou spectroscopie pour s'assurer qu'ils sont inférieurs aux limites standard.

La détection des impuretés métalliques repose principalement sur l'ICP-OES ou l'analyse par fluorescence X (XRF). La XRF est une méthode de détection non destructive qui analyse la composition élémentaire par des rayons X caractéristiques émis par un échantillon, ce qui la rend adaptée au criblage rapide d'impuretés telles que le fer, le nickel, le cuivre, etc. ICP-OES offre une plus grande précision et convient à l'analyse précise des impuretés à l'état de traces. Le processus d'essai nécessite l'étalonnage d'étalons de haute pureté pour garantir l'exactitude des résultats.

Les tests d'impuretés nécessitent un processus d'échantillonnage et d'analyse rigoureux, chaque lot de poudre de molybdène étant échantillonné à plusieurs endroits pour garantir sa représentativité. Les résultats des tests sont comparés aux normes (par exemple, ASTM B387-18 ou GB/T 4325-2013), et les lots non conformes doivent être repurifiés ou jetés pour garantir la qualité des matières premières.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Spray Wire Introduction

1. Overview of Molybdenum Spray Wire

Molybdenum spray wire is a high-purity molybdenum metal wire that is melted and deposited onto a substrate surface through thermal spray techniques such as flame spraying, plasma spraying, arc spraying, or HVOF (High Velocity Oxy-Fuel). The resulting coating offers excellent resistance to wear, corrosion, and high temperatures. Due to its high melting point and superior performance, molybdenum wire is widely used across various industrial sectors.

2. Characteristics of Molybdenum Spray Wire

High Melting Point: Approximately 2623°C, suitable for high-temperature environments.

Excellent Corrosion Resistance: Resists attack from acids, alkalis, and chemical media.

High Hardness & Wear Resistance: Tough coating that withstands mechanical wear.

Low Friction Coefficient: Reduces component wear and improves efficiency.

Chemical Stability: Maintains performance in harsh environments.

High Thermal Conductivity: Effectively dissipates heat and extends component lifespan.

3. Typical Uses of Molybdenum Spray Wire

Aerospace: Turbine blades, engine parts, thermal barrier coatings.

Automotive Industry: Wear-resistant coatings for piston rings, engine blocks, and brake discs.

Chemical & Energy Sectors: Corrosion-resistant pipelines, heat exchangers, wind power equipment.

Electronics & Semiconductors: Vacuum deposition heating wires, semiconductor leads.

Medical Field: Corrosion-resistant coatings for implants and surgical instruments.

Others: Marine anti-corrosion, wear-resistant construction machinery, high-temperature furnaces.

4. Basic Data of Molybdenum Spray Wire from CTIA GROUP LTD

Purity	≥99.95%
Density	10.2 g/cm ³
Diameter Range	1.0-3.0 mm, customizable
Tensile Strength	Moderate to ensure stable wire feeding
Packaging	Customized Packaging

5. 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

8.2 Contrôle de la qualité du fil de molybdène

Le fil de molybdène est le matériau de base du processus de pulvérisation, et sa précision dimensionnelle, sa qualité de surface et ses propriétés mécaniques affectent directement la stabilité du processus de pulvérisation et la qualité du revêtement. L'inspection de la qualité du fil de molybdène doit couvrir chaque maillon de la production et de la livraison pour s'assurer que le fil répond aux exigences de la norme. Cette section traite de la précision dimensionnelle et des mesures de tolérance, de l'inspection des défauts de surface et de la rugosité, ainsi que des essais de propriétés mécaniques.

8.2.1 Mesure de la précision dimensionnelle et de la tolérance

La précision dimensionnelle du fil de molybdène est un indicateur important de sa qualité, en particulier de l'uniformité et de la tolérance du diamètre, ce qui affecte directement la stabilité du système d'alimentation du fil et la formation de gouttelettes fondues. Le diamètre du fil de molybdène pour la pulvérisation est généralement de 1,0 mm à 3,0 mm, et la tolérance doit être contrôlée à $\pm 0,02$ mm, conformément aux normes (telles que GB/T 4181-2017 ou ISO 14919).

La mesure dimensionnelle utilise principalement des pieds à coulisse laser et des micromètres de haute précision. Le pied à coulisse laser mesure le diamètre du fil de molybdène en temps réel grâce à un balayage laser sans contact, fournissant des données continues de haute précision et convient à l'inspection en ligne. L'appareil est capable de détecter de petites fluctuations de diamètre et d'identifier les défauts qui peuvent survenir pendant le processus d'étirage. Les micromètres sont utilisés pour les inspections hors ligne, où plusieurs sections transversales sont mesurées manuellement pour garantir des diamètres uniformes. Le processus de mesure doit être effectué dans un environnement à température constante pour éviter les erreurs causées par les changements de température.

Le contrôle de tolérance doit couvrir l'ensemble du rouleau de fil de molybdène, sélectionner au hasard plusieurs sections pour la mesure et enregistrer les valeurs de diamètre maximum et minimum. Les résultats des tests sont comparés à la norme pour s'assurer que le fil répond aux exigences de précision de l'équipement de pulvérisation. Un fil de molybdène qui n'est pas de la bonne taille peut entraîner une alimentation en fil instable ou une épaisseur de revêtement inégale qui nécessite des retouches ou des mises au rebut.

8.2.2 Détection des défauts de surface et de la rugosité

La qualité de surface du fil de molybdène est essentielle à l'effet de pulvérisation, et les fissures, les oxydes ou les résidus de lubrifiant peuvent provoquer des éclaboussures de gouttelettes ou des défauts de revêtement. La détection des défauts de surface et de la rugosité est au cœur du contrôle qualité du fil de molybdène, garantissant que le fil a une surface lisse et impeccable.

L'inspection des défauts de surface utilise l'inspection visuelle et l'observation microscopique. L'inspection visuelle est utilisée pour détecter rapidement les fissures, les rayures ou le tartre d'oxyde visibles, et est généralement effectuée sous une lumière vive. L'observation microscopique fournit des images de plus haute résolution et est capable de détecter des défauts de surface tels que

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

des marques de cordes ou des microfissures de l'ordre du micron. L'équipement d'inspection moderne intègre également un système d'imagerie numérique capable d'identifier et d'enregistrer automatiquement l'emplacement des défauts, améliorant ainsi l'efficacité de l'inspection.

La rugosité de surface est inspectée à l'aide d'un profilomètre ou d'un microscope à force atomique (AFM). Le profilomètre mesure le profil de surface à l'aide d'une sonde de contact et génère des paramètres de rugosité (par ex. Ra, Rz) pour s'assurer que la rugosité de surface du fil de molybdène est conforme aux normes (par ex. ISO 4287). L'AFM fournit une résolution nanométrique pour les applications de haute précision afin d'inspecter la texture microscopique de la surface du filament. La rugosité du fil de molybdène pour la pulvérisation doit généralement être inférieure à 0,2 µm Ra pour réduire la friction et les projections pendant le processus de pulvérisation.

L'inspection de surface doit couvrir un échantillon aléatoire de chaque lot de fil de molybdène, combiné à un système de surveillance en ligne pour vérifier la qualité du processus d'étirage et de polissage en temps réel. Les fils gravement défectueux doivent être nettoyés ou polis à nouveau pour s'assurer qu'ils répondent aux exigences de revêtement.

8.2.3 Essais des propriétés mécaniques (résistance à la traction, dureté, etc.)

Les propriétés mécaniques du fil de molybdène, notamment la résistance à la traction, la ductilité et la dureté, sont essentielles à sa stabilité lors de l'étirage et de la pulvérisation. Les tests de propriétés mécaniques garantissent que le fil peut résister aux contraintes de traitement et d'alimentation du fil pour répondre aux besoins de l'application.

La résistance à la traction et la ductilité sont testées à l'aide de machines d'essai de traction universelles selon des normes telles que ASTM E8 ou GB/T 14842-2007. Au cours de l'essai, l'échantillon de fil de molybdène est lentement étiré pour enregistrer sa force de traction maximale et son allongement avant de se rompre. La résistance à la traction reflète la capacité de charge du fil, tandis que la ductilité reflète sa capacité de déformation plastique. Le fil de molybdène pour la pulvérisation nécessite généralement une résistance à la traction modérée pour éviter la rupture lors de l'alimentation du fil, et en même temps a une certaine ductilité pour s'adapter au processus d'étirage et de recuit.

L'essai de dureté est effectué à l'aide d'un duromètre Vickers ou Rockwell selon une norme telle que ISO 6507 ou ASTM E18. L'essai de dureté Vickers utilise un pénétrateur diamanté pour appliquer une petite charge sur la surface du fil de molybdène, mesurer la taille de l'indentation et calculer la valeur de dureté. L'essai de dureté Rockwell est appliqué à des fils plus grossiers, où la profondeur d'indentation est mesurée à l'aide d'une bille d'acier ou d'un pénétrateur diamanté. Le test de dureté peut refléter la résistance à l'usure et la facilité de traitement du fil de molybdène, et la dureté du fil de molybdène pour la pulvérisation doit être modérée pour équilibrer la résistance et la ténacité.

L'essai des propriétés mécaniques nécessite l'échantillonnage de chaque lot de fil de molybdène pour s'assurer que les résultats répondent aux exigences de la norme. Les données d'essai constituent la base de l'optimisation du processus, comme l'ajustement de la température de recuit ou de la

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

vitesse d'étirage, afin d'obtenir la combinaison idéale de propriétés.

8.3 Inspection du revêtement par pulvérisation

La qualité du revêtement par pulvérisation est au cœur de l'application du fil de pulvérisation de molybdène, ce qui affecte directement la durabilité et les performances de la pièce. L'inspection du revêtement évalue l'épaisseur, l'adhérence, la microstructure et la résistance à la corrosion, à la température et aux chocs thermiques pour s'assurer que le revêtement répond aux exigences de conception. Ces analyses sont explorées en détail dans cette section.

8.3.1 Mesure de l'épaisseur et de l'uniformité du revêtement

L'épaisseur du revêtement est un paramètre critique qui affecte ses performances de protection, trop mince peut entraîner une protection insuffisante, et trop épais peut augmenter le stress ou le coût. L'épaisseur du revêtement préparé par le fil de pulvérisation de molybdène est généralement de 50 à 500 μm , et l'uniformité doit être assurée pour éviter une faiblesse locale.

La mesure d'épaisseur utilise principalement des jauges d'épaisseur à ultrasons et des jauges d'épaisseur laser. Les mesureurs d'épaisseur à ultrasons calculent l'épaisseur du revêtement en réfléchissant les ondes sonores à l'interface entre le revêtement et le substrat, ce qui le rend adapté aux contrôles non destructifs. Les mesureurs d'épaisseur laser mesurent la distance entre la surface du revêtement et le substrat par balayage laser, fournissant des données de distribution d'épaisseur très précises pour les pièces à géométries complexes. L'inspection hors ligne peut également être effectuée à l'aide d'un microscope métallurgique pour mesurer avec précision l'épaisseur du revêtement en coupant l'échantillon pour observer la section transversale.

L'évaluation de l'uniformité consiste à mesurer plusieurs zones de la surface du revêtement, à enregistrer les valeurs maximales et minimales de l'épaisseur et à calculer le taux d'écart. Les résultats des tests doivent être conformes à la norme (par exemple, GB/T 17733-2008 ou ASTM C633), et les revêtements d'épaisseur inégale doivent être optimisés pour les paramètres de pulvérisation, tels que le réglage de la distance de pulvérisation ou de la vitesse d'alimentation du fil.

8.3.2 Essai d'adhérence du revêtement

L'adhérence est un indicateur clé de la force d'adhérence du revêtement sur le substrat et détermine la durabilité du revêtement pendant le fonctionnement. Les revêtements préparés par fil de pulvérisation de molybdène doivent avoir une adhérence élevée pour résister aux chocs mécaniques et aux contraintes thermiques.

Les essais d'adhérence sont principalement effectués à l'aide d'une méthode d'essai de traction en référence à une norme (par exemple, ASTM C633). Au cours de l'essai, l'échantillon de revêtement est collé entre deux fixations, et une tension progressivement croissante est appliquée par une machine d'étirement pour enregistrer la force maximale lorsque le revêtement se décolle. Les valeurs d'adhérence sont exprimées en MPa, et les revêtements en molybdène pulvérisé nécessitent généralement une adhérence de 30 à 50 MPa, selon l'application.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Une autre méthode est l'essai de rayure, dans lequel une charge croissante est appliquée à la surface du revêtement à l'aide d'une aiguille de traçage en diamant pour observer le point critique auquel le revêtement se décolle. L'essai de rayure est adapté pour évaluer l'adhérence d'un revêtement sous contrainte locale et peut être combiné avec la détection d'émission acoustique pour améliorer la précision. Les revêtements à faible adhérence doivent être vérifiés pour le prétraitement du substrat ou le processus de pulvérisation, le sablage optimisé ou le réglage des paramètres.

8.3.3 Analyse de la microstructure et de la porosité du revêtement

La microstructure et la porosité du revêtement affectent directement ses propriétés mécaniques et sa résistance à la corrosion. Les revêtements en molybdène pulvérisé doivent avoir une microstructure dense et une faible porosité pour assurer une excellente protection.

L'analyse microstructurale utilise la microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie optique. Le MEB fournit des images en coupe transversale haute résolution pour visualiser la taille des grains, la liaison interfaciale et la distribution des défauts des revêtements. La microscopie optique permet d'analyser rapidement une large zone de la structure du revêtement et d'identifier les fissures ou les particules non fondues. Au cours du processus d'inspection, l'échantillon est préparé par découpe, montage et polissage pour s'assurer que la section transversale est claire.

L'analyse de la porosité est réalisée par analyse d'image ou densitométrie. L'analyse d'images utilise des images MEB ou microscopes optiques pour calculer la proportion de porosité par rapport à la section transversale du revêtement, et la porosité des revêtements en molybdène pulvérisé est généralement inférieure à 5 %. La méthode de mesure de la masse volumique utilise le principe d'Archimède pour comparer la masse volumique réelle du revêtement avec la masse volumique théorique, et calcule indirectement la porosité. Les revêtements à porosité trop élevée nécessitent un processus de pulvérisation optimisé, tel que l'augmentation de la vitesse de pulvérisation ou la technologie HVOF.

8.3.4 Essai de résistance à la corrosion et de résistance aux hautes températures

La résistance à la corrosion et la résistance aux hautes températures des revêtements de molybdène pulvérisé sont des indicateurs clés dans les environnements difficiles et sont largement utilisés dans les domaines de l'aérospatiale, de la chimie et de l'énergie. Les tests de corrosion et à haute température simulent des conditions d'utilisation réelles afin d'évaluer la stabilité à long terme du revêtement.

Le test de résistance à la corrosion adopte le test de brouillard salin et le test d'immersion. L'essai au brouillard salin (ASTM B117) place un échantillon enrobé dans une chambre de brouillard salin et est exposé à une forte concentration de brouillard de chlorure de sodium pour observer le temps d'apparition des taches de corrosion. Les tests d'immersion impliquent l'immersion de l'échantillon dans une solution acide ou alcaline (telle que l'acide sulfurique ou l'hydroxyde de sodium) et vérifient périodiquement la perte de qualité ou les modifications de surface du revêtement. L'inertie chimique des revêtements en molybdène les rend excellents dans une large gamme de milieux corrosifs, mais une attention particulière doit être accordée à l'effet de la porosité sur la corrosion.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Le test de résistance à haute température est effectué par un test d'oxydation à haute température et un test de cyclage thermique. L'essai d'oxydation à haute température place l'échantillon de revêtement dans un four à haute température (par exemple, 1000°C) et est exposé à l'air ou à l'oxygène pour mesurer le gain de poids oxydatif ou la perte de revêtement. Les tests de cyclage thermique simulent une alternance d'environnements chauds et froids, et le chauffage et le refroidissement rapides sont utilisés pour évaluer la résistance aux chocs thermiques des revêtements. Les résultats des tests doivent être comparés à une norme (par exemple, ISO 20407) pour s'assurer que le revêtement répond aux exigences de l'application.

8.3.5 Essai de performance du revêtement aux chocs thermiques

Les performances de choc thermique sont un indicateur important des revêtements en molybdène pulvérisé dans les environnements cycliques à haute température, en particulier dans les moteurs d'avion et les turbines à gaz. Les essais de choc thermique évaluent la résistance d'un revêtement à la fissuration et à l'écaillage sous des changements rapides de température.

Les essais de choc thermique sont généralement effectués à l'aide de la méthode de trempe à l'eau ou de la méthode de circulation d'air chaud. Dans la méthode de trempe à l'eau, un échantillon de revêtement chauffé à une température élevée (par exemple, 800 °C) est rapidement immergé dans de l'eau froide et répété plusieurs fois pour observer des fissures ou un écaillage. La méthode de circulation d'air chaud simule un environnement de cycle thermique plus réaliste à travers le haut fourneau chaud et le système de refroidissement, et enregistre le nombre de cycles de défaillance du revêtement. Pendant l'essai, la formation de fissures peut être surveillée en combinaison avec l'émission acoustique ou l'imagerie infrarouge pour améliorer la précision de la détection.

Les revêtements ayant de mauvaises propriétés de choc thermique nécessitent une optimisation de la microstructure, comme un revêtement en gradient ou un traitement thermique pour réduire l'inadéquation de la dilatation thermique. Les résultats des tests constituent la base de la conception du revêtement et de l'amélioration du processus, garantissant sa fiabilité dans des environnements extrêmes.

8.4 Technologie et équipement d'essai

La technologie et l'équipement d'inspection avancés sont au cœur du contrôle de la qualité du fil de pulvérisation de molybdène, offrant des capacités d'analyse de haute précision, non destructives et en temps réel. Cette section traite des techniques et de l'équipement d'inspection couramment utilisés, notamment l'analyse par fluorescence X (XRF), la microscopie électronique à balayage (MEB) et l'analyse dispersive à dispersion d'énergie (EDS), les testeurs de dureté, les tests par ultrasons et les jauges d'épaisseur laser, ainsi que d'autres technologies avancées.

8.4.1 Analyse par fluorescence X (XRF)

L'analyse par fluorescence X (XRF) est une technique de contrôle non destructif utilisée pour analyser rapidement la composition chimique des poudres de molybdène, des fils de molybdène et des revêtements. L'équipement XRF excite les atomes des échantillons en émettant des rayons X, enregistre la fluorescence caractéristique qu'ils émettent et analyse le type et le contenu des éléments.

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

L'avantage de la XRF est sa vitesse et ses capacités d'analyse multi-éléments, ce qui la rend adaptée à la détection d'impuretés telles que le fer, le nickel et le cuivre dans les poudres de molybdène, ainsi que la distribution élémentaire dans les revêtements. Les équipements XRF portables facilitent les tests sur site, tandis que les équipements de paillasse offrent une plus grande précision pour les analyses en laboratoire. Le processus d'essai nécessite l'étalonnage des échantillons standard pour garantir l'exactitude des résultats. XRF est largement utilisé dans la production de fil de molybdène pulvérisé et répond aux exigences de normes telles que GB / T 15258-2009.

8.4.2 Microscopie électronique à balayage (MEB) et analyse dispersive à dispersion d'énergie (EDS)

La microscopie électronique à balayage (MEB) est l'équipement de base pour l'analyse de la microstructure, balayant la surface d'un échantillon avec un faisceau d'électrons pour produire des images à haute résolution. Le MEB est largement utilisé pour inspecter la topographie de la poudre de molybdène, les défauts de surface du fil de molybdène et la structure en section transversale des revêtements, et est capable d'identifier des caractéristiques telles que la taille des grains, la porosité et les fissures.

La spectroscopie (EDS) est combinée au MEB pour analyser la distribution et le contenu des éléments en détectant les rayons X caractéristiques émis par un échantillon. L'EDS convient pour vérifier la distribution des impuretés dans la poudre de molybdène, les oxydes à la surface du fil de molybdène ou la diffusion élémentaire à l'interface du revêtement. Les tests MEB/EDS sont effectués dans un environnement sous vide poussé et l'échantillon doit être conducteur d'électricité (par exemple, placage au carbone ou à l'or) pour éviter les effets de charge.

La haute résolution et les capacités d'analyse élémentaire fournies par le MEB/EDS en font un outil indispensable pour le contrôle de la qualité des fils de pulvérisation de molybdène, comme l'exigent les normes telles que ASTM E1508.

8.4.3 Testeur de dureté (Vickers, Rockwell)

Les testeurs de dureté sont utilisés pour évaluer les propriétés mécaniques des fils et des revêtements de molybdène, reflétant leur résistance à l'usure et leur résistance. L'appareil d'essai de dureté Vickers mesure la taille de l'indentation en appliquant une petite charge à travers le pénétrateur diamanté et convient à l'inspection de fils de molybdène fins et de revêtements minces. Le duromètre Rockwell mesure la profondeur d'indentation à travers un pénétrateur à billes d'acier ou en diamant et convient aux fils plus grossiers ou aux revêtements épais.

Les essais de dureté sont effectués selon une norme telle que ISO 6507 ou ASTM E18 pour garantir la précision des mesures de charge et d'indentation. Les résultats des tests constituent la base de l'optimisation du processus, par exemple l'ajustement des paramètres de frittage ou de pulvérisation pour obtenir la valeur de dureté souhaitée. Le duromètre est facile à utiliser et est largement utilisé dans les sites de production et les laboratoires.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

8.4.4 Contrôle par ultrasons et mesureurs d'épaisseur au laser

Les contrôles par ultrasons et les jauges d'épaisseur laser sont des outils importants pour l'inspection de la qualité des revêtements, l'évaluation des défauts internes et de l'épaisseur de surface, respectivement. Les détecteurs à ultrasons détectent la porosité, les fissures ou le pelage par la réflexion des ondes sonores à l'interface entre le revêtement et le substrat, ce qui les rend adaptés aux contrôles non destructifs. L'équipement doit calibrer les échantillons standard pour garantir la précision de la vitesse du son et du signal réfléchi.

Les mesureurs d'épaisseur laser mesurent l'épaisseur du revêtement par balayage laser, offrant une inspection de haute précision et sans contact pour les pièces à géométries complexes. La machine est capable de générer une carte d'épaisseur, d'identifier les zones d'irrégularités et d'optimiser le processus de revêtement. La combinaison du contrôle par ultrasons et des jauges d'épaisseur laser permet une évaluation complète de la qualité du revêtement conformément aux normes telles que ASTM C633.

8.4.5 Autres technologies de détection avancées

En plus de l'équipement mentionné ci-dessus, la détection du fil de pulvérisation de molybdène adopte également une variété de technologies avancées pour améliorer la précision et l'efficacité de la détection. Par exemple:

Diffraction des rayons X (XRD) : Elle est utilisée pour analyser la structure cristalline de la poudre de molybdène, du fil de molybdène et du revêtement, identifier la composition de phase et l'état de contrainte, et convient à l'étude des performances à haute température des revêtements.

Thermographie infrarouge : Il est utilisé pour surveiller la distribution de la température pendant le processus de pulvérisation en temps réel afin d'éviter la surchauffe du substrat ou un revêtement inégal.

Détection d'émission acoustique : Évaluez la durabilité d'un revêtement en surveillant son signal acoustique de microfissure sous l'effet d'un choc thermique ou d'une contrainte mécanique.

Microscopie à force atomique (AFM) : Fournit une topographie de surface à l'échelle nanométrique et une analyse de rugosité pour l'inspection de haute précision des fils et des revêtements de molybdène.

Ces technologies offrent une variété de moyens pour le contrôle de la qualité du fil de pulvérisation de molybdène, combinés à des méthodes traditionnelles, pour répondre aux besoins de différents scénarios d'application.

8.5 Système de gestion de la qualité

Le système de gestion de la qualité est au cœur de la production de fil de molybdène, garantissant la fiabilité des résultats des tests et la contrôlabilité du processus de production. En établissant un processus de gestion standardisé, les entreprises peuvent améliorer continuellement la qualité et la

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

satisfaction des clients. Cette section explorera la certification de qualité ISO 9001, les rapports d'inspection et la traçabilité, ainsi que l'analyse et l'amélioration des défauts de qualité.

8.5.1 Certification de la qualité ISO 9001

ISO 9001 est une norme de système de gestion de la qualité internationalement acceptée qui fournit un cadre normatif pour la production de fils de molybdène revêtus. La norme exige des entreprises qu'elles établissent un processus complet de gestion de la qualité, couvrant l'approvisionnement en matières premières, le processus de production, les tests et le service après-vente. La norme ISO 9001 met l'accent sur l'orientation client et l'amélioration de la qualité et de l'efficacité des produits grâce à l'amélioration continue.

Dans la production de fils de molybdène revêtus, la norme ISO 9001 exige l'élaboration de procédures d'exploitation détaillées (PON) qui clarifient les responsabilités et les normes de chaque liaison. Par exemple, la composition chimique des poudres de molybdène est testée selon des procédures d'échantillonnage et d'analyse standardisées, et le test d'adhérence des revêtements par pulvérisation doit documenter tous les paramètres et résultats. La norme exige également des audits internes et des examens de direction réguliers afin de cerner les problèmes potentiels et d'apporter des améliorations.

Les entreprises certifiées ISO 9001 peuvent accroître leur compétitivité sur le marché et répondre aux exigences strictes d'industries telles que l'aérospatiale et l'automobile. Le processus de certification est effectué par un organisme tiers afin d'assurer l'objectivité et la conformité de la direction.

8.5.2 Rapport d'essai et traçabilité

Les rapports d'essai et la traçabilité sont des éléments importants de la gestion de la qualité pour garantir que la qualité de chaque lot de fil de pulvérisation de molybdène et de son revêtement est vérifiable. Le rapport d'essai doit enregistrer en détail les résultats des tests des matières premières, des fils de molybdène et des revêtements, y compris la composition chimique, la taille, les performances et l'analyse des défauts. Le rapport doit être conforme aux exigences de format de la norme (par exemple, GB/T 15258-2009) et être signé et daté par l'inspecteur.

La traçabilité passe par l'établissement d'un registre de production complet, couvrant toutes les étapes du processus, de l'approvisionnement en poudre de molybdène jusqu'au produit de revêtement fini. Chaque lot de fil et de revêtement en molybdène se voit attribuer un numéro d'identification unique qui enregistre sa source de matières premières, ses paramètres de production, les résultats des tests et les informations sur l'usine. Les entreprises modernes utilisent des systèmes de traçabilité électronique pour gérer les données à l'aide de codes-barres ou de codes QR, garantissant ainsi une récupération et un partage rapides des informations.

La traçabilité facilite non seulement le contrôle de la qualité, mais permet également d'identifier rapidement la cause des problèmes lorsqu'ils surviennent. Par exemple, si le revêtement s'écaille, la qualité de surface du fil de molybdène ou les paramètres du revêtement peuvent être vérifiés par un système de traçabilité afin de développer des mesures d'amélioration ciblées.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Spray Wire Introduction

1. Overview of Molybdenum Spray Wire

Molybdenum spray wire is a high-purity molybdenum metal wire that is melted and deposited onto a substrate surface through thermal spray techniques such as flame spraying, plasma spraying, arc spraying, or HVOF (High Velocity Oxy-Fuel). The resulting coating offers excellent resistance to wear, corrosion, and high temperatures. Due to its high melting point and superior performance, molybdenum wire is widely used across various industrial sectors.

2. Characteristics of Molybdenum Spray Wire

High Melting Point: Approximately 2623°C, suitable for high-temperature environments.

Excellent Corrosion Resistance: Resists attack from acids, alkalis, and chemical media.

High Hardness & Wear Resistance: Tough coating that withstands mechanical wear.

Low Friction Coefficient: Reduces component wear and improves efficiency.

Chemical Stability: Maintains performance in harsh environments.

High Thermal Conductivity: Effectively dissipates heat and extends component lifespan.

3. Typical Uses of Molybdenum Spray Wire

Aerospace: Turbine blades, engine parts, thermal barrier coatings.

Automotive Industry: Wear-resistant coatings for piston rings, engine blocks, and brake discs.

Chemical & Energy Sectors: Corrosion-resistant pipelines, heat exchangers, wind power equipment.

Electronics & Semiconductors: Vacuum deposition heating wires, semiconductor leads.

Medical Field: Corrosion-resistant coatings for implants and surgical instruments.

Others: Marine anti-corrosion, wear-resistant construction machinery, high-temperature furnaces.

4. Basic Data of Molybdenum Spray Wire from CTIA GROUP LTD

Purity	≥99.95%
Density	10.2 g/cm ³
Diameter Range	1.0-3.0 mm, customizable
Tensile Strength	Moderate to ensure stable wire feeding
Packaging	Customized Packaging

5. 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

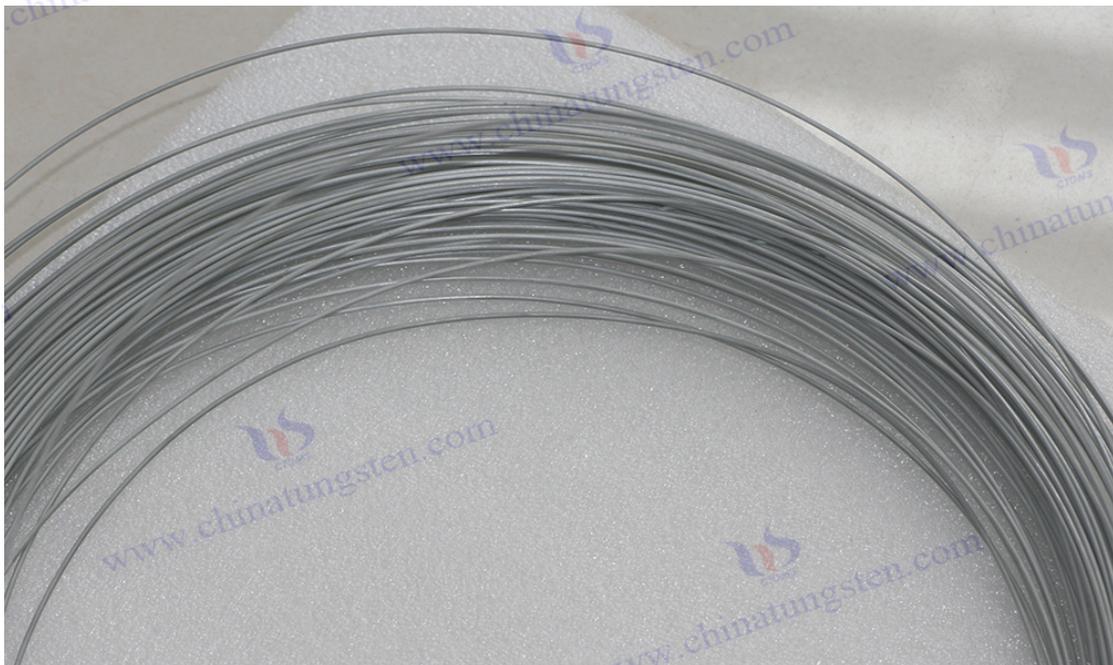
8.5.3 Analyse et amélioration des défauts de qualité

L'analyse des défauts de qualité est la clé de l'amélioration continue, grâce à l'analyse systématique des causes des défauts, à l'optimisation du processus de production et des méthodes d'inspection. Les défauts courants comprennent des fissures de surface dans les fils de molybdène, une porosité excessive du revêtement et une adhérence insuffisante, nécessitant une analyse scientifique pour identifier la cause profonde.

L'analyse des défauts utilise généralement un diagramme en arête de poisson, 5W1H (Why, Where, When, Who, What, How) et une analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE). Le diagramme en arête de poisson divise les causes des défauts en cinq catégories : l'homme, la machine, le matériau, la méthode et l'environnement, et trie systématiquement les facteurs d'influence possibles. 5W1H localise les scénarios et les conditions dans lesquels les défauts se produisent à travers des problèmes spécifiques. L'AMDEC évalue le risque potentiel de défauts et développe des mesures préventives telles que le prétraitement amélioré du substrat ou l'optimisation des paramètres de revêtement.

Les améliorations doivent être testées pour s'assurer de leur efficacité. Par exemple, si la porosité d'un revêtement est trop élevée, essayez d'augmenter le taux de pulvérisation ou d'utiliser la technologie HVOF et vérifiez l'amélioration par analyse MEB. Les résultats de l'amélioration doivent être intégrés dans les procédures opérationnelles normalisées et les plans de formation afin d'éviter que les problèmes ne se reproduisent.

L'analyse et l'amélioration des défauts de qualité sont un processus dynamique de gestion de la qualité, et grâce à une approche axée sur les données, les entreprises peuvent améliorer en permanence les performances et la fiabilité du fil de pulvérisation de molybdène pour répondre à la demande du marché.



CTIA GROUP LTD fil de pulvérisation de molybdène

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

Chapitre 9 Tendances de développement et perspectives d'avenir du fil de pulvérisation de molybdène

En tant que matériau important de la technologie de pulvérisation thermique, le fil de molybdène a joué un rôle irremplaçable dans l'aérospatiale, l'industrie automobile, l'énergie et l'industrie chimique. Avec la transformation de l'industrie mondiale vers l'industrie intelligente, verte et haut de gamme, la technologie, le marché et l'application du fil de pulvérisation de molybdène ouvrent la voie à de nouvelles opportunités et à de nouveaux défis. Ce chapitre discutera en profondeur de la tendance de développement technique du fil de pulvérisation de molybdène, de la demande du marché et de l'expansion des applications, de la protection de l'environnement et du développement durable, ainsi que de la perspective d'échanges et de coopération techniques internationaux, et fournira une perspective systématique pour le développement futur de l'industrie.

9.1 Tendances de développement technique du fil de pulvérisation de molybdène

Le développement technologique du fil de pulvérisation de molybdène évolue vers des performances plus élevées, une efficacité accrue et plus d'intelligence. La convergence de nouveaux matériaux, de nouveaux procédés et de technologies numériques a révolutionné la technologie de pulvérisation, permettant au fil de molybdène et à ses revêtements de répondre aux exigences d'applications de plus en plus complexes et exigeantes. Cette section se concentrera sur les tendances de développement de nouveaux matériaux et procédés de pulvérisation, la production intelligente et numérique et les technologies de revêtement composite.

9.1.1 Nouveaux matériaux et procédés de pulvérisation

Le développement de nouveaux matériaux et procédés de pulvérisation est la direction clé pour améliorer les performances du fil de pulvérisation de molybdène. Le fil de molybdène conventionnel est basé sur son point de fusion élevé, sa résistance à la corrosion et ses excellentes propriétés mécaniques, mais un seul revêtement de molybdène peut être limité dans certains environnements extrêmes, tels que des températures ultra-élevées ou une forte corrosion. L'introduction de nouveaux matériaux et procédés vise à surmonter ces limitations et à élargir la gamme d'applications du fil de molybdène.

En termes de matériaux, les composites à matrice de molybdène et les fils de molybdène dopés sont devenus des points chauds de la recherche. Les composites à matrice de molybdène améliorent considérablement la dureté, la résistance à l'usure et la résistance à l'oxydation des revêtements en ajoutant des particules de céramique (par exemple, zircone, carbure de silicium) ou des éléments de terres rares (par exemple, lanthane, cérium) au molybdène. Par exemple, un fil de molybdène dopé à l'oxyde de lanthane peut former une couche protectrice d'oxyde stable lors de la pulvérisation à haute température, prolongeant ainsi la durée de vie du revêtement. Le développement de la poudre de molybdène à l'échelle nanométrique a également apporté une percée dans le processus de pulvérisation, et la taille fine et la distribution uniforme des nanoparticules rendent le revêtement plus dense et la porosité considérablement réduite. La préparation de ces matériaux à l'échelle nanométrique se fait souvent à l'aide de techniques de dépôt en phase vapeur ou d'alliage mécanique pour garantir une pureté et une consistance élevées des particules.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

En termes de processus, les technologies de pulvérisation à froid et de pulvérisation assistée par laser évoluent rapidement. La pulvérisation à froid dépose des particules de molybdène à la surface du substrat par le biais de flux de gaz supersoniques, évitant ainsi l'oxydation et le stress thermique causés par la fusion à haute température, et est particulièrement adaptée aux substrats sensibles à la chaleur tels que les alliages d'aluminium ou les polymères. La pulvérisation assistée par laser, combinée à la haute densité d'énergie du laser, contrôle avec précision le chemin de dépôt des gouttelettes de fusion et la microstructure du revêtement, ce qui permet d'obtenir un revêtement plus uniforme et une adhérence plus forte. De plus, les progrès des technologies de pulvérisation à la flamme supersonique (HVOF) et de pulvérisation au plasma suspendu (SPS) ont également permis d'améliorer l'efficacité du dépôt et la qualité du revêtement pour la pulvérisation de fils de molybdène. Ces procédés permettent d'obtenir une porosité plus faible et une force d'adhérence plus élevée en optimisant le flux de gaz, la puissance de la source de chaleur et la vitesse d'alimentation du fil.

La combinaison de nouveaux matériaux et de nouveaux procédés est également à l'origine du développement de revêtements fonctionnels. Par exemple, les revêtements autolubrifiants à base de molybdène sont dopés avec du disulfure de molybdène ou du graphite, ce qui réduit considérablement le coefficient de frottement et convient aux pièces coulissantes de haute précision ; Les revêtements de barrière thermique à base de molybdène sont appliqués sur les aubes de turbine de moteur d'avion en les combinant avec des couches de céramique pour prolonger leur durée de vie à haute température. Ces tendances technologiques montrent que le fil de molybdène enduit par pulvérisation évolue d'un matériau unique à une direction multifonctionnelle et personnalisée, offrant une solution plus flexible pour les applications haut de gamme.

9.1.2 Production intelligente et numérique

La production intelligente et numérique est une tendance révolutionnaire dans l'industrie du fil de molybdène, et l'intégration de l'intelligence artificielle, de l'Internet des objets et de l'analyse du big data a considérablement amélioré l'efficacité de la production, le contrôle de la qualité et les capacités d'optimisation des processus. Les systèmes de revêtement intelligents et les processus de production numériques remodelent la façon dont le fil de molybdène est fabriqué et utilisé.

Le système de pulvérisation intelligent est basé sur des robots industriels et des capteurs, qui peuvent surveiller et ajuster les paramètres de pulvérisation en temps réel. Le système de pulvérisation robotisé s'adapte au substrat avec des géométries complexes grâce à la reconnaissance visuelle et à la technologie de planification de trajectoire pour assurer l'uniformité du revêtement. Le capteur collecte des données telles que la température, la pression et la vitesse d'alimentation du fil en temps réel, et optimise dynamiquement les paramètres du processus grâce au système de contrôle par rétroaction. Par exemple, certains équipements de pulvérisation plasma avancés sont capables d'utiliser des algorithmes d'apprentissage automatique pour prédire les défauts de revêtement et ajuster automatiquement les distances de pulvérisation ou les débits de gaz pour réduire les taux de rebut.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

La production numérique permet la connectivité des appareils et le partage de données via l'Internet industriel des objets (IIoT). Chaque équipement de la ligne de production (par exemple, tréfileuse, pistolet de pulvérisation, détecteur) est équipé d'un module d'acquisition de données qui télécharge les paramètres de processus et les données de qualité sur la plate-forme cloud. Les plateformes d'analyse de données, telles que les systèmes SCADA, permettent de surveiller en temps réel les processus de production afin d'identifier les problèmes potentiels et d'optimiser les processus. Par exemple, l'analyse des fluctuations de tension pendant l'étirage du fil de molybdène permet d'ajuster les formulations de lubrifiants ou la conception des matrices pour améliorer la qualité du fil. La production numérique prend également en charge la maintenance à distance, permettant aux techniciens d'accéder à l'état des équipements via le cloud pour diagnostiquer rapidement les pannes et réduire les temps d'arrêt.

L'intelligence artificielle (IA) joue un rôle de plus en plus important dans l'optimisation des processus. Les algorithmes d'IA analysent les données de production historiques pour prédire la meilleure combinaison de paramètres de processus et raccourcir les cycles d'essai. Par exemple, dans la pulvérisation HVOF, le modèle d'IA peut recommander le rapport de carburant et la vitesse d'injection optimaux en fonction du type de substrat et des besoins de l'application, améliorant ainsi considérablement les performances du revêtement. De plus, l'IA prend en charge la prédiction de la qualité et réduit les risques de qualité en analysant les données d'inspection, telles que les images MEB ou les résultats des tests d'adhérence, afin d'identifier à l'avance les produits non conformes.

La tendance de la production intelligente et numérique a non seulement amélioré l'efficacité de la production, mais a également favorisé une fabrication flexible. Les lignes de revêtement modernes sont capables de basculer rapidement entre différentes tailles de fil de molybdène et les types de revêtement pour répondre aux besoins de petits lots et de commandes personnalisées. Cette avancée technologique permet à l'industrie du fil de pulvérisation de molybdène de mieux s'adapter aux évolutions du marché et de fournir des produits à forte valeur ajoutée pour des domaines haut de gamme tels que l'aérospatiale et l'automobile.

9.1.3 Technologie de revêtement composite

La technologie de revêtement composite améliore considérablement les performances globales du revêtement en le combinant avec d'autres matériaux, tels que la céramique, les métaux ou les polymères. Le développement de revêtements composites est une direction importante de la technologie du fil de pulvérisation de molybdène, qui peut répondre aux besoins d'application d'environnements multifonctionnels et extrêmes.

Le revêtement dégradé est un type de technologie de revêtement composite qui réduit l'écaillage causé par le stress thermique en introduisant une couche de transition entre le substrat et le revêtement de molybdène pour atténuer la différence de coefficient de dilatation thermique et de dureté. Par exemple, sur les aubes de turbine d'avion, une couche de liant d'alliage à base de nickel est combinée à un revêtement en molybdène et à un revêtement de barrière thermique en zircone pour former une structure en pente, ce qui améliore considérablement la résistance aux chocs thermiques du revêtement. Les revêtements dégradés sont généralement préparés à l'aide d'un

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

système de pulvérisation multi-sources qui permet un changement progressif de la composition et des performances en contrôlant avec précision le taux de dépôt de différents matériaux.

Le revêtement multicouche est une autre technologie composite importante qui permet d'optimiser les performances des revêtements en alternant le dépôt de différentes couches de matériau. Par exemple, les revêtements en molybdène sont déposés en alternance avec des revêtements en alumine, qui offrent à la fois une résistance à l'usure et à la corrosion, ce qui les rend adaptés à la protection des réacteurs chimiques. La préparation de revêtements multicouches nécessite un contrôle précis de l'épaisseur de chaque couche et la liaison interfaciale, et l'équipement moderne de pulvérisation plasma permet un dépôt multi-matériaux efficace grâce à une conception multi-pistolets.

Les revêtements composites fonctionnalisés confèrent des propriétés spéciales aux revêtements en les dotant avec des matériaux fonctionnels. Par exemple, les revêtements en molybdène dopés avec des nanotubes de carbone ont une excellente conductivité et une autolubrification, ce qui convient aux pièces coulissantes à grande vitesse des appareils électroniques ; Le revêtement en molybdène dopé à l'oxyde d'yttrium améliore la résistance à l'oxydation à haute température et convient aux aubes de turbines à gaz. Le développement de ces revêtements fonctionnels s'appuie sur les progrès de la nanotechnologie et de la technologie de modification de surface pour garantir que le matériau dopé est uniformément réparti et bien lié à la matrice de molybdène.

Les défis de la technologie de revêtement composite sont la complexité des processus et le contrôle des coûts. Les développements futurs nécessitent une optimisation intelligente des équipements et des processus pour réduire les coûts de production tout en améliorant la cohérence et la fiabilité des revêtements. L'application généralisée de ces technologies favorisera la compétitivité du marché du fil de pulvérisation de molybdène dans le domaine haut de gamme.

9.2 Demande du marché et expansion de l'application du fil de pulvérisation de molybdène

La demande du marché pour le fil de pulvérisation de molybdène est stimulée par l'industrialisation mondiale et le développement de technologies émergentes, et le domaine d'application se développe rapidement, passant des industries traditionnelles aux industries émergentes. Cette section analysera le potentiel d'application des industries émergentes ainsi que les tendances du marché mondial afin de fournir une perspective de marché pour le développement futur du fil de pulvérisation de molybdène.

9.2.1 Potentiel d'application dans les industries émergentes

Le développement rapide d'industries émergentes telles que les énergies renouvelables, les véhicules électriques, la fabrication additive et la biomédecine a ouvert de nouvelles possibilités d'application pour le fil de pulvérisation de molybdène. Ces industries exigent des performances et une polyvalence accrues dans les revêtements haute performance, ce qui stimule l'innovation et l'expansion du marché de la technologie des fils de molybdène.

Dans le domaine des énergies renouvelables, le fil de molybdène enduit par pulvérisation est largement utilisé comme revêtement protecteur pour les équipements de production d'énergie solaire,

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

thermique et éolienne. Les tubes des capteurs solaires doivent fonctionner à des températures élevées pendant de longues périodes, et les revêtements en molybdène améliorent l'efficacité du transfert de chaleur et la durabilité grâce à leur conductivité thermique élevée et à leur résistance à l'oxydation. Les pales et les roulements des éoliennes sont soumis au vent, au sable et à l'humidité, et la résistance à l'usure et à la corrosion des revêtements en molybdène peut prolonger considérablement leur durée de vie. À mesure que la demande mondiale d'énergie propre augmente, le potentiel d'application du fil de molybdène dans les équipements d'énergie renouvelable continuera de se développer.

L'essor de l'industrie des véhicules électriques (VE) a créé un vaste marché pour le fil de pulvérisation de molybdène. Le système de gestion de batterie et les composants du moteur des véhicules électriques doivent fonctionner à des températures élevées et à des courants élevés, et le revêtement en molybdène peut améliorer la conductivité et la résistance à l'usure des électrodes, prolongeant ainsi la durée de vie des composants. De plus, le système de freinage des véhicules électriques utilise le freinage régénératif, ce qui nécessite une plus grande résistance à l'usure des disques de frein, et le revêtement en molybdène répond à ces besoins grâce à son faible coefficient de frottement et à sa dureté élevée. La croissance rapide du marché des véhicules électriques entraînera une plus grande popularité du fil de pulvérisation de molybdène dans l'industrie automobile.

La fabrication additive (impression 3D) est un autre domaine d'application émergent. Les revêtements en molybdène sont utilisés pour protéger les buses et les moules des équipements d'impression 3D contre l'usure et la corrosion causées par les matériaux fondus à haute température. Le fil de molybdène peut également être utilisé comme matière première pour l'impression 3D afin de préparer des pièces à base de molybdène aux formes complexes par dépôt laser ou plasma pour les applications aérospatiales et médicales. Les exigences élevées de la fabrication additive en matière de propriétés des matériaux et de flexibilité des processus ont alimenté l'innovation technologique dans le domaine du fil de pulvérisation de molybdène.

Dans le domaine biomédical, les revêtements préparés par fil de molybdène sont appliqués à la protection de surface des implants et des outils chirurgicaux en raison de leur biocompatibilité et de leur résistance à la corrosion. Par exemple, les revêtements en molybdène sur les articulations artificielles peuvent réduire la corrosion des fluides et augmenter la durée de vie des implants ; Le revêtement en molybdène du scalpel améliore la précision de coupe grâce à sa dureté élevée et à son faible frottement. Avec les progrès de la médecine de précision et le vieillissement de la société, les revêtements en molybdène ont de larges perspectives d'application dans les dispositifs médicaux.

Le potentiel d'application de ces industries émergentes montre que le fil de molybdène pulvérisé est en train de se transformer d'une industrie traditionnelle en un domaine de haute technologie. Les entreprises doivent augmenter leurs investissements en R-D et développer des produits personnalisés pour répondre aux besoins émergents afin de saisir les opportunités de marché.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Spray Wire Introduction

1. Overview of Molybdenum Spray Wire

Molybdenum spray wire is a high-purity molybdenum metal wire that is melted and deposited onto a substrate surface through thermal spray techniques such as flame spraying, plasma spraying, arc spraying, or HVOF (High Velocity Oxy-Fuel). The resulting coating offers excellent resistance to wear, corrosion, and high temperatures. Due to its high melting point and superior performance, molybdenum wire is widely used across various industrial sectors.

2. Characteristics of Molybdenum Spray Wire

High Melting Point: Approximately 2623°C, suitable for high-temperature environments.

Excellent Corrosion Resistance: Resists attack from acids, alkalis, and chemical media.

High Hardness & Wear Resistance: Tough coating that withstands mechanical wear.

Low Friction Coefficient: Reduces component wear and improves efficiency.

Chemical Stability: Maintains performance in harsh environments.

High Thermal Conductivity: Effectively dissipates heat and extends component lifespan.

3. Typical Uses of Molybdenum Spray Wire

Aerospace: Turbine blades, engine parts, thermal barrier coatings.

Automotive Industry: Wear-resistant coatings for piston rings, engine blocks, and brake discs.

Chemical & Energy Sectors: Corrosion-resistant pipelines, heat exchangers, wind power equipment.

Electronics & Semiconductors: Vacuum deposition heating wires, semiconductor leads.

Medical Field: Corrosion-resistant coatings for implants and surgical instruments.

Others: Marine anti-corrosion, wear-resistant construction machinery, high-temperature furnaces.

4. Basic Data of Molybdenum Spray Wire from CTIA GROUP LTD

Purity	≥99.95%
Density	10.2 g/cm ³
Diameter Range	1.0-3.0 mm, customizable
Tensile Strength	Moderate to ensure stable wire feeding
Packaging	Customized Packaging

5. 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

9.2.2 Analyse des tendances du marché mondial

Le marché mondial du fil de pulvérisation de molybdène est affecté par le processus d'industrialisation, l'économie régionale et les orientations politiques, montrant une tendance de développement diversifiée. La Chine, l'Union européenne, l'Amérique du Nord et l'Asie-Pacifique sont les principaux marchés, avec des caractéristiques de marché et des moteurs de demande différents dans chaque région.

La Chine est le plus grand producteur et consommateur mondial de ressources en molybdène, et le marché du fil de pulvérisation de molybdène bénéficie du développement rapide de la fabrication nationale et de la construction d'infrastructures. L'aérospatiale, l'automobile et les équipements énergétiques sont les principaux domaines de demande du marché chinois, et les politiques nationales telles que l'objectif de « neutralité carbone » ont favorisé le développement des industries des énergies renouvelables et des véhicules électriques, augmentant encore la demande de fil de molybdène. Les entreprises chinoises ont occupé une position importante sur le marché mondial grâce à la mise à niveau technologique et à l'optimisation des coûts.

Le marché de l'UE se caractérise par des applications haut de gamme et des exigences environnementales, les industries aérospatiale et automobile étant les principales sources de demande. Les réglementations de l'Union européenne en matière de fabrication écologique, telles que REACH et RoHS, exigent des entreprises qu'elles adoptent des procédés de pulvérisation peu polluants, ce qui a stimulé le développement de technologies de pulvérisation à froid et de revêtement en molybdène vert. Les entreprises européennes sont à l'avant-garde de l'innovation technologique et des normes de qualité, en se concentrant sur la coopération technique avec le marché international.

Le marché nord-américain est dominé par les industries de l'aérospatiale et de l'énergie, et la demande de revêtements haute performance aux États-Unis continue de croître, en particulier dans les turbines à gaz et les équipements pétroliers et gaziers des grands fonds. Les entreprises nord-américaines ouvrent la voie à la technologie HVOF et à la pulvérisation plasma, en mettant l'accent sur le développement et l'application d'équipements intelligents. La politique de relocalisation de l'industrie manufacturière du gouvernement américain a insufflé une nouvelle vitalité au marché régional.

L'Asie-Pacifique, en particulier l'Inde, le Japon et la Corée du Sud, est un marché en pleine croissance, avec une expansion dans les industries de l'électronique automobile, des énergies renouvelables et de la construction navale qui stimulent la demande de fil de molybdène. L'avantage du faible coût du marché indien en a fait un centre de traitement de fil de molybdène émergent, tandis que le Japon et la Corée du Sud se concentrent sur des applications de haute précision dans les industries des semi-conducteurs et de l'affichage. La promotion de l'intégration économique régionale, telle que le RCEP, a facilité l'échange de technologies et le partage des ressources sur le marché de l'Asie-Pacifique.

Les tendances du marché mondial indiquent que la demande de fil de pulvérisation de molybdène

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

continuera de croître, en particulier dans les segments haut de gamme et émergents. Les entreprises doivent prêter attention aux besoins différenciés des marchés régionaux et améliorer la couverture du marché grâce à une production localisée et à l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement mondiale. Dans le même temps, le risque des barrières commerciales internationales et des fluctuations des prix des matières premières doit être traité par des achats diversifiés et une coopération stratégique.

9.3 Protection de l'environnement et développement durable de la pulvérisation

La protection de l'environnement et le développement durable sont une direction de développement importante de l'industrie de la pulvérisation de molybdène, et le concept de technologie verte et d'économie circulaire affecte profondément le mode de production et la sélection du processus. La réduction de la pollution de l'environnement, l'amélioration de l'utilisation des ressources et la promotion d'une production à faible émission de carbone sont des défis communs auxquels l'industrie est confrontée. Cette section traite des technologies de pulvérisation écologique et des systèmes de gestion de l'environnement.

Technologie de pulvérisation verte

La technologie de pulvérisation verte vise à réduire les émissions polluantes et la consommation d'énergie pendant le processus de pulvérisation, et à atteindre les objectifs environnementaux grâce à l'innovation des processus et à la mise à niveau des équipements. Le développement de la technologie de pulvérisation verte apporte une solution aux problèmes que les techniques de pulvérisation thermique traditionnelles, telles que la pulvérisation à la flamme, peuvent produire des gaz d'échappement, de la poussière et du bruit.

La technologie de pulvérisation à froid est une technologie verte typique, qui évite les émissions d'oxydes et le gaspillage d'énergie thermique causés par les températures élevées en projetant des particules de molybdène à basse température et à grande vitesse. L'équipement de pulvérisation à froid utilise un système de circulation de gaz efficace qui réduit la quantité d'hélium ou d'azote utilisée et réduit les coûts d'exploitation. Le faible apport de chaleur de la pulvérisation froide le rend adapté à la manipulation de substrats sensibles à la chaleur et à la réduction de la génération de déchets, ce qui le rend largement utilisé dans les industries automobile et électronique.

Les équipements de pulvérisation à faibles émissions sont au cœur du développement écologique. Les systèmes modernes de pulvérisation de plasma et HVOF sont équipés d'unités de traitement des gaz d'échappement qui éliminent les gaz nocifs tels que le dioxyde de soufre ou les oxydes d'azote grâce à la technologie de filtration et d'adsorption, garantissant ainsi le respect des normes d'émission (par exemple, EU REACH). Les systèmes de combustion efficaces réduisent les émissions de carbone tout en améliorant l'efficacité énergétique en optimisant le rapport carburant/oxygène. Certains équipements de pulvérisation à la pointe de la technologie intègrent également des systèmes de récupération de chaleur qui utilisent la chaleur résiduelle pour préchauffer le substrat ou pour le chauffage, réduisant ainsi la consommation d'énergie.

L'introduction de la technologie de nettoyage à base d'eau a également favorisé le développement

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

de la pulvérisation verte. Les processus de nettoyage conventionnels utilisent des solvants organiques, qui peuvent produire une contamination par des composés organiques volatils (COV). Les nettoyeurs à base d'eau sont très efficaces pour éliminer l'huile et les oxydes de la surface du fil de molybdène grâce à des formulations biodégradables et à la technologie de nettoyage par ultrasons, réduisant ainsi l'impact environnemental. L'application complète de ces technologies vertes rend la production de fil de molybdène plus respectueuse de l'environnement et répond aux exigences du développement durable mondial.

Récupération et recyclage des déchets

La récupération et le recyclage des déchets constituent une partie importante du développement durable de l'industrie du fil de pulvérisation de molybdène. En tant que métal rare, le molybdène a des ressources limitées, et le recyclage peut réduire les coûts de production et réduire le fardeau environnemental. Les particules d'éclaboussures, les filaments usagés et les anciens revêtements issus du processus de pulvérisation sont les principaux objets du recyclage.

La récupération des particules d'éclaboussures est réalisée grâce à un système de collecte dédié. Les équipements de pulvérisation modernes sont équipés de dépoussiéreurs et de filtres pour capturer et séparer les particules de molybdène qui s'échappent pendant le processus de pulvérisation. Ces particules sont tamisées et purifiées et peuvent être réutilisées pour la pulvérisation ou la production de poudre de molybdène. L'efficacité du système de recyclage a un impact direct sur l'utilisation des ressources, et l'équipement de pointe est capable de récupérer jusqu'à 90 % des particules d'éclaboussures.

Le recyclage des déchets de filaments et d'anciens revêtements est assuré par des méthodes chimiques ou mécaniques. Les déchets de fil sont purifiés par fusion ou électrolyse et convertis en poudre de molybdène de haute pureté, qui est réintroduite dans le processus de production. Le recyclage des anciens revêtements utilise généralement des techniques de sablage ou de décapage chimique pour séparer le revêtement du substrat, et le matériau molybdène récupéré est broyé et purifié avant d'être réutilisé. Le processus de recyclage nécessite un contrôle strict de l'introduction d'impuretés afin de s'assurer que la qualité du matériau recyclé répond à la norme (par exemple GB/T 3462-2017).

La mise en place d'un système de recyclage nécessite la coopération de l'amont et de l'aval de la chaîne industrielle. Les transformateurs de molybdène et les prestataires de services de pulvérisation doivent mettre en place un réseau de recyclage pour collecter et traiter les déchets de manière unifiée. Des entreprises de premier plan, telles que H.C. Starck, ont développé des systèmes de recyclage en boucle fermée qui convertissent directement les déchets en matières premières, réduisant ainsi considérablement la consommation de ressources. Le soutien politique a également contribué au développement d'une économie circulaire, comme la loi chinoise sur la promotion de l'économie circulaire, qui encourage les entreprises à adopter des technologies de recyclage et à réduire les déchets de métaux rares.

Le recyclage et le recyclage des déchets permettent non seulement de réduire les coûts de production,

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

mais aussi d'améliorer l'image de responsabilité sociale de l'entreprise. À l'avenir, l'industrie doit encore améliorer les technologies et les normes de recyclage pour promouvoir l'utilisation durable des ressources en molybdène.

9.4 Échange technique international et coopération dans le domaine du fil de molybdène pulvérisé

Les échanges et la coopération techniques internationaux sont les principaux moteurs du développement de l'industrie du fil de molybdène, qui favorise l'innovation technologique, l'unification des normes et la mondialisation des marchés. Grâce à la R-D transfrontalière, à la collaboration industrielle et aux conférences internationales, les industries sont en mesure de partager des ressources, de résoudre des problèmes communs et de stimuler le progrès technologique. Cette section explorera les perspectives d'harmonisation des normes techniques internationales et de collaboration transfrontalière en matière de R&D et industrielle.

9.4.1 Harmonisation des normes techniques internationales

L'unification des normes techniques internationales constitue la base du commerce mondial et de l'échange technique de fil de pulvérisation de molybdène, et réduit les obstacles techniques causés par les différences de normes. À l'heure actuelle, les normes pour le fil de pulvérisation de molybdène sont principalement dominées par l'ISO, l'ASTM et les systèmes chinois GB / T, mais il existe des différences de composition chimique, de méthodes d'essai et d'exigences d'application entre les normes, ce qui affecte la compatibilité des marchés multinationaux.

Les normes ISO, telles que ISO 14919 et ISO 20407, sont au cœur de l'harmonisation des normes techniques internationales et couvrent les exigences de performance des fils et revêtements pour la pulvérisation. Ces normes ont été élaborées par des experts de plusieurs pays et reflètent le consensus technique de l'industrie mondiale. Par exemple, la norme ISO 14919 spécifie les tolérances dimensionnelles et la qualité de surface pour les fils de molybdène revêtus par pulvérisation, qui sont largement reconnus dans l'Union européenne, en Amérique du Nord et dans la région Asie-Pacifique. À l'avenir, l'ISO devra élargir encore la couverture des normes pour inclure des spécifications pour les technologies émergentes (par exemple, la pulvérisation à froid, le nanorevêtement) afin de s'adapter aux évolutions de l'industrie.

Les normes ASTM, telles que la norme ASTM B387-18, ont un impact significatif sur le marché nord-américain, et leurs exigences de précision élevées conviennent aux applications haut de gamme telles que l'aérospatiale. Par rapport à la norme chinoise GB/T, l'ASTM a des spécifications plus strictes pour la teneur en impuretés et les méthodes de détection. Les efforts d'harmonisation des normes nécessitent l'harmonisation de l'ISO et de l'ASTM afin d'élaborer des spécifications plus compatibles. Par exemple, l'ASTM et le GB/T peuvent simplifier le processus de certification transfrontalière en harmonisant les méthodes d'essai de la composition chimique et des propriétés mécaniques du fil de molybdène par le biais d'accords bilatéraux de reconnaissance mutuelle.

Le rôle de la Chine dans l'établissement de normes internationales ne cesse de croître. Les entreprises nationales (p. ex., Chinatungsten High-tech) participent activement aux comités

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

techniques de l'ISO afin de promouvoir l'intégration des normes GB/T (p. ex., GB/T 4181-2017) avec les normes internationales. L'unification des normes favorise non seulement les échanges techniques, mais renforce également la compétitivité des entreprises chinoises sur le marché mondial. À l'avenir, l'industrie doit renforcer la coopération multilatérale, accélérer la révision et la promotion des normes et construire un cadre technique mondial unifié pour le fil de pulvérisation de molybdène.

9.4.2 R-D transfrontalière et collaboration industrielle

La R&D transnationale et la coopération industrielle sont un moyen important d'innover dans la technologie du fil de molybdène dans la pulvérisation de molybdène, ce qui accélère le développement de nouveaux matériaux et processus grâce au partage des ressources et de l'expertise. Les collaborations prennent la forme de laboratoires communs, de licences technologiques, d'alliances industrielles et de conférences internationales.

Le laboratoire commun est la plate-forme centrale pour la R&D transfrontalière. Par exemple, l'Académie chinoise des sciences a coopéré avec l'Institut Fraunhofer en Allemagne pour créer un laboratoire commun pour la technologie de projection thermique, axé sur la recherche sur les revêtements composites à base de molybdène et la technologie de pulvérisation à froid. En partageant des équipements et des données, ces laboratoires résolvent les défis techniques de l'oxydation à haute température et des performances aux chocs thermiques des revêtements en molybdène. Le laboratoire commun a également cultivé des talents internationaux et fourni des réserves techniques pour le développement de la filière.

L'octroi de licences de technologie est une forme courante de collaboration avec l'industrie. Les entreprises européennes ont encouragé la mise à niveau technologique du marché régional en concédant des licences de technologie de production de fil de molybdène à des entreprises asiatiques. L'octroi de licences de technologie s'accompagne d'un contrôle de qualité strict afin de s'assurer que les performances des produits sous licence sont conformes aux normes. Ce modèle collaboratif réduit le coût de diffusion de la technologie tout en élargissant la portée du marché des entreprises.

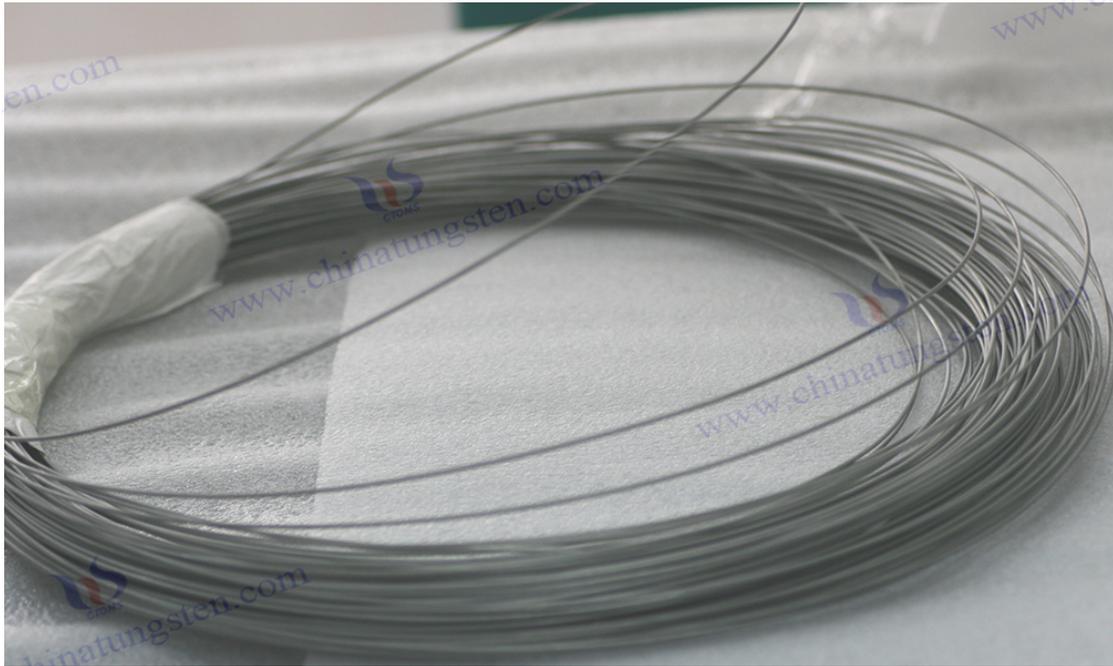
L'alliance industrielle a promu l'application à grande échelle du fil de pulvérisation de molybdène en intégrant les ressources de la chaîne industrielle. Par exemple, la Conférence internationale sur la pulvérisation thermique organisée conjointement par l'American Thermal Spray Society (ASM TSS) et le Groupe national de collaboration sur la pulvérisation thermique de Chine offre aux entreprises une plate-forme pour échanger des technologies et se connecter au marché. L'alliance coordonne également la collaboration des fournisseurs de matières premières, des fabricants d'équipements et des prestataires de services de revêtement afin d'optimiser la chaîne d'approvisionnement mondiale.

Les conférences et expositions internationales, telles que la conférence internationale ITSC sur la pulvérisation thermique, sont des canaux importants pour l'échange technique, réunissant des experts et des entreprises du monde entier pour présenter les dernières technologies en matière de fil de pulvérisation de molybdène. La conférence a facilité la mise en place de projets de coopération

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

transfrontalière par le biais de présentations techniques, de séminaires et d'expositions. Par exemple, la conférence ITSC 2024 s'est concentrée sur la pulvérisation intelligente et les technologies vertes, indiquant la direction du développement futur de l'industrie du fil de molybdène.

Le défi de la R&D transfrontalière et de la collaboration industrielle réside dans la protection de la propriété intellectuelle et les différences culturelles. À l'avenir, l'industrie doit mettre en place un mécanisme de coopération plus transparent pour équilibrer les intérêts de toutes les parties par le biais du partage des brevets et du dépôt conjoint. Dans le même temps, renforcer la formation des talents et les échanges culturels, améliorer l'efficacité de la collaboration et promouvoir le développement mondial de la technologie du fil de pulvérisation de molybdène.



CTIA GROUP LTD fil de pulvérisation de molybdène

Appendice

A. Glossaire

Fil de pulvérisation de molybdène : Un matériau qui utilise du fil de molybdène de haute pureté comme matière première pour former un revêtement fonctionnel à la surface du substrat grâce à la technologie de pulvérisation thermique.

Pulvérisation thermique : Le processus de fusion ou de semi-fusion d'un matériau par la chaleur et de le pulvériser sur la surface d'un substrat pour former un revêtement.

Pulvérisation de plasma : Une technologie de pulvérisation à haute température qui utilise le flux de flamme plasma comme source de chaleur.

Pulvérisation à la flamme : Une méthode de pulvérisation qui utilise une flamme brûlante comme source de chaleur.

Pulvérisation à l'arc : Une technique qui fait fondre des fils métalliques en les formant et en les pulvérisant sur la surface d'un substrat.

Oxy-pulvérisation à grande vitesse (HVOF) : Une technologie de pulvérisation qui utilise du gaz

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

de combustion à grande vitesse pour injecter des matériaux fondus.

Adhérence du revêtement : La force de liaison entre le revêtement et le substrat, généralement évaluée par des essais de traction ou de cisaillement.

Porosité du revêtement : Le rapport de volume des pores du revêtement, ce qui affecte les performances du revêtement.

Résistance à la corrosion : La capacité d'un matériau à résister à la corrosion chimique ou galvanique.

Résistance à l'abrasion : La capacité de la surface d'un matériau à résister à l'usure mécanique.

Poudre de molybdène : particules de molybdène de haute pureté préparées par réduction chimique ou par des méthodes physiques.

Métallurgie des poudres : Le processus de préparation des matériaux par pressage et frittage de poudres métalliques.

Processus de tréfilage : Le processus de transformation de barres métalliques en filaments à l'aide de matrices d'étirage.

Activation de surface : Un traitement qui améliore l'activité de surface du fil de molybdène par des méthodes chimiques ou physiques.

Analyse par fluorescence X (XRF) : Technique d'analyse spectroscopique utilisée pour détecter la composition élémentaire des matériaux.

Microscopie électronique à balayage (MEB) : Technique de microscopie utilisée pour observer la morphologie et la structure microscopiques des matériaux.

Spectroscopie d'énergie (EDS) : Technique utilisée en combinaison avec le MEB pour analyser la distribution élémentaire des matériaux.

Traitement thermique : Le processus d'amélioration des propriétés d'un matériau en contrôlant le processus de chauffage et de refroidissement.

Fabrication verte : Une méthode de production dans le but d'économiser de l'énergie, de réduire les émissions et de protéger l'environnement.

B. Références

- [1] Chinatungsten en ligne. Bibliothèque de tungstène-molybdène.
- [2] Chine Tungstène. Fondée en 1986, bimensuelle.
- [3] Institut de recherche sur les métaux, Académie chinoise des sciences. Progrès de la recherche sur les revêtements à base de molybdène.
- [4] Praxair Surface Technologies. Brochure sur le revêtement par projection thermique.
- [5] GB/T 4181-2017 Fil de molybdène. Administration chinoise de la normalisation.
- [6] GB/T 3462-2017 « Barres de molybdène et ébauches de molybdène ». Administration chinoise de la normalisation.
- [7] ASTM B387-18 « Spécification standard pour les barres, tiges et fils en molybdène et en alliage de molybdène ». ASTM International.
- [8] ISO 14919 « Projection thermique - Fils, tiges et cordons pour la pulvérisation à la flamme et à l'arc ». Organisation internationale de normalisation.
- [9] ISO 20407 « Céramiques fines - Méthode d'essai pour la résistance à la traction et au cisaillement interfaciaux ». Organisation internationale de normalisation.
- [10] Journal de la science des matériaux. Tendances en matière de revêtements par projection

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

thermique.

[11] Technologie des surfaces et des revêtements. Progrès dans les systèmes de pulvérisation à froid et de pulvérisation intelligents.

[12] Conférence internationale sur la pulvérisation thermique (ITSC). Actes 2024.

[13] ISO 9001:2015, « Systèmes de management de la qualité – Exigences ». Organisation internationale de normalisation.

[14] ISO 14001:2015 «Systèmes de management environnemental - Exigences» . Organisation internationale de normalisation.

[15] Règlement REACH de l'UE. Agence européenne des produits chimiques.

[16] Loi chinoise sur la promotion de l'économie circulaire. Commission nationale du développement et de la réforme.

[17] Institut de recherche sur les métaux, Académie chinoise des sciences. Progrès de la recherche sur les revêtements à base de molybdène.

[18] Norme ASTM C633. Méthode d'essai standard pour l'adhérence ou la cohésion des revêtements par projection thermique.

[19] Norme ISO 4287. Spécification géométrique du produit (GPS) - Texture de surface.

[20] Journal de la technologie de pulvérisation thermique. Revêtements en molybdène : propriétés et applications.