

Encyclopédie des filaments de tungstène à faisceau d'électrons

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 Tous droits réservés Tél. : 0086 592 512 9696

Numéro de version du document standard CTIAQCD -MA-E/P 2024 version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

www.ctia.com.cn

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 Tous droits réservés Tél. : 0086 592 512 9696
Numéro de version du document standard CTIAQCD -MA-E/P 2024 version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V
www.ctia.com.cn

sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

Ultra-High Heat Resistance: Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

Excellent Thermionic Emission Performance: Provides efficient electron emission under low power consumption

High-Purity Material: $W \geq 99.95\%$ reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

Long Service Life: Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

Precision Manufacturing: Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

Multiple Structure Options: Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés Tél. : 0086 592 512 9696

Numéro de version du document standard CTIAQCD -MA-E/P 2024 version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V
www.ctia.com.cn

sales@chinatungsten.com

Contenu

Chapitre 1 Introduction

- 1.1 Définition et importance du filament de tungstène à faisceau d'électrons
- 1.2 Développement historique et évolution technologique
- 1.3 Le rôle du filament de tungstène à faisceau d'électrons dans la technologie moderne

Chapitre 2 Principes de base du filament de tungstène dans le canon à électrons

- 2.1 Principe de fonctionnement du canon à électrons
- 2.2 Bases physiques et chimiques du filament de tungstène en tant que matériau de cathode
- 2.3 Mécanisme d'émission thermionique
- 2.4 Comparaison des filaments de tungstène et des matériaux alternatifs

Chapitre 3 Technologie de préparation et de production du filament de tungstène pour pistolet à électrons

- 3.1 Sélection et préparation des matières premières pour le filament de tungstène à faisceau d'électrons
 - 3.1.1 Source et purification du tungstène métal
 - 3.1.2 Exigences relatives à la taille et à la pureté des particules de la poudre de tungstène
 - 3.1.3 Sélection des additifs et des matériaux dopants (tels que le potassium, l'aluminium, etc.)
 - 3.1.4 Analyse des matières premières et contrôle de la qualité
- 3.2 Métallurgie des filaments de tungstène par faisceau d'électrons
 - 3.2.1 Pressage et frittage de poudre de tungstène
 - 3.2.1.1 Paramètres du processus de pressage
 - 3.2.1.2 Type de four de frittage et régulation de la température
 - 3.2.2 Forgeage et emboutissage des tiges de tungstène
 - 3.2.2.1 Forgeage à chaud et technologie de forgeage à froid
 - 3.2.2.2 Conception de la matrice de tréfilage et sélection du lubrifiant
 - 3.2.3 Recuit et contrôle du grain du fil de tungstène
 - 3.2.3.1 Température et atmosphère de recuit
 - 3.2.3.2 Effet de la granulométrie sur les performances
- 3.3 Formation et traitement des filaments de tungstène par faisceau d'électrons
 - 3.3.1 Enroulement et formage du fil de tungstène
 - 3.3.1.1 Hélice simple, double hélice et motifs géométriques complexes
 - 3.3.1.2 Automatisation et précision de l'équipement de moulage
 - 3.3.2 Technologie de traitement de surface
 - 3.3.2.1 Nettoyage et polissage chimiques
 - 3.3.2.2 Procédé de revêtement de surface (p. ex. revêtement d'oxyde)
 - 3.3.3 Découpage et façonnage du filament
- 3.4 Équipement de production de filaments de tungstène par faisceau d'électrons et automatisation

3.4.1 Vue d'ensemble des principaux équipements de production de filaments de tungstène à faisceau d'électrons

3.4.1.1 Four de frittage

3.4.1.2 Machine à tréfiler

3.4.1.3 Machine d'emballage

3.4.2 Automatisation et intelligence des lignes de production

3.4.3 Exigences en matière de contrôle de l'environnement et de salles blanches

3.5 Contrôle de la qualité et inspection du filament de tungstène à faisceau d'électrons

3.5.1 Technologie de détection en ligne

3.5.1.1 Inspection de la précision dimensionnelle et géométrique

3.5.1.2 Détection des défauts de surface

3.5.2 Essais de performance

3.5.2.1 Essai de résistance et de conductivité

3.5.2.2 Essai de performance d'émission d'électrons thermiques

3.5.3 Analyse des défaillances et mesures d'amélioration

Chapitre 4 Caractéristiques du filament de tungstène à faisceau d'électrons

4.1 Propriétés physiques et chimiques du filament de tungstène à faisceau d'électrons

4.1.1 Point de fusion et stabilité thermique du filament de tungstène

4.1.2 Résistivité et coefficient de température du filament de tungstène

4.1.3 Propriétés anti-oxydation et anti-corrosion du filament de tungstène

4.1.4 Résistance mécanique et ductilité du filament de tungstène

4.2 Caractéristiques électriques et thermiques du filament de tungstène à faisceau d'électrons

4.2.1 Efficacité d'émission thermionique d'un filament de tungstène

4.2.2 Plage de température de fonctionnement du filament de tungstène

4.2.3 Résistance à la dilatation thermique et à la fatigue thermique du filament de tungstène

4.2.4 Stabilité de l'arc du filament de tungstène

4.3 Relation entre la microstructure et les performances du filament de faisceau d'électrons

4.3.1 Structure et orientation des grains

4.3.2 Effet des éléments dopants sur la microstructure

4.3.3 Morphologie de surface et performances d'émission

4.4 Durée de vie et fiabilité du filament de tungstène à faisceau d'électrons

4.4.1 Facteurs affectant la durée de vie du filament

4.4.2 Analyse des modes de défaillance (p. ex. évaporation, rupture)

4.4.3 Méthode d'essai de fiabilité

4.5 Fiche signalétique du filament de tungstène à faisceau d'électrons CTIA GROUP LTD

Chapitre 5 Utilisations et applications du filament de tungstène à faisceau d'électrons

5.1 Application dans le canon à électrons

5.1.1 Microscopie électronique à balayage (MEB)

5.1.2 Microscopie électronique à transmission (MET)

- 5.1.3 Soudage et découpe par faisceau d'électrons
- 5.1.4 Lithographie par faisceau d'électrons
- 5.2 Dispositifs électroniques à vide
 - 5.2.1 Tubes à micro-ondes (tels que les magnétrons et les tubes à ondes progressives)
 - 5.2.2 Tube à rayons X
 - 5.2.3 Tube cathodique (CRT)
- 5.3 Autres applications de la recherche industrielle et scientifique
 - 5.3.1 Dépôt de couches minces (comme le dépôt physique en phase vapeur)
 - 5.3.2 Source d'ions et spectromètre de masse
 - 5.3.3 Dispositif expérimental de fusion nucléaire
- 5.4 Domaines d'application émergents
 - 5.4.1 Fusion par faisceau d'électrons dans l'impression 3D
 - 5.4.2 Sources d'électrons dans les systèmes de propulsion spatiale
 - 5.4.3 Nanotechnologie et micro-nano-traitement

Chapitre 6 : Défis techniques et développement futur du filament de faisceau d'électrons

- 6.1 Défis techniques actuels du filament de tungstène à faisceau d'électrons
 - 6.1.1 Prolonger la durée de vie du filament
 - 6.1.2 Amélioration de l'efficacité du transport
 - 6.1.3 Miniaturisation et exigences de haute précision
- 6.2 Nouveaux matériaux et technologies pour les filaments de tungstène à faisceau d'électrons
 - 6.2.1 Matériaux composites à base de tungstène
 - 6.2.2 Filament de tungstène nanostructuré
 - 6.2.3 Matériaux de cathode alternatifs (p. ex. nanotubes de carbone, cathodes à émission de champ)
- 6.3 Fabrication intelligente et écologique de filaments de tungstène à faisceau d'électrons
 - 6.3.1 Surveillance intelligente et contrôle adaptatif
 - 6.3.2 Technique de production économe en énergie et respectueuse de l'environnement
 - 6.3.3 Recyclage et traitement des déchets
- 6.4 Tendances futures du développement des filaments de tungstène à faisceau d'électrons
 - 6.4.1 Conception d'un canon à électrons à haute performance
 - 6.4.2 Intégration interdisciplinaire (comme l'intégration avec l'intelligence artificielle)
 - 6.4.3 Applications dans l'espace et les environnements extrêmes

Chapitre 7 Normes et spécifications pour les filaments de tungstène à faisceau d'électrons

- 7.1 Normes nationales (GB)
 - 7.1.1 Normes liées à la Grande-Bretagne/T (telles que les normes relatives au tungstène et aux alliages de tungstène)
 - 7.1.2 Normes d'essai et d'évaluation des matériaux de cathode de canon à électrons
 - 7.1.3 Spécifications de fabrication et d'acceptation des dispositifs électroniques à vide
- 7.2 Normes internationales (ISO)
 - 7.2.1 Matériaux et normes d'essai liés à l'ISO

7.2.2 Application de l'ISO 4618-2006 au traitement de surface des filaments de tungstène

7.2.3 Mise en œuvre de l'ISO 14001 en production

7.3 Norme américaine

7.3.1 Normes ASTM (comme la norme ASTM B387)

7.3.2 Application des normes de l'ASME à la fabrication de canons à électrons

7.3.3 Normes SAE (s'il s'applique au soudage par faisceau d'électrons)

7.4 Autres normes internationales et industrielles

7.4.1 Norme japonaise (JIS)

7.4.2 Norme allemande (DIN)

7.4.3 Norme russe (GOST)

7.5 Mise en œuvre et certification des normes

7.5.1 Application des normes dans la production et les essais

7.5.2 Certification du système de management de la qualité (par exemple ISO 9001)

7.5.3 Exportation du produit et respect des normes internationales

Appendice

A. Glossaire

B. Références

Chapitre 1 Introduction

1.1 Définition et importance du filament de tungstène à faisceau d'électrons

Le filament de tungstène à faisceau d'électrons est un composant de cathode dont [le matériau principal est le tungstène métallique](#). Il produit une émission thermique d'électrons par chauffage électrique et constitue le composant central du canon à électrons. Les canons à électrons utilisent des champs électriques ou des champs magnétiques pour accélérer les électrons afin de former des faisceaux d'électrons de haute énergie. Ils sont largement utilisés dans les microscopes électroniques à balayage (MEB), les microscopes électroniques à transmission (MET), le soudage par faisceau d'électrons, les tubes à rayons X et d'autres équipements. L'importance des filaments de tungstène provient de leurs excellentes propriétés physiques et chimiques : point de fusion élevé (environ 3422°C), faible pression de vapeur, fonction de travail élevée (environ 4,5 eV) et excellente stabilité thermique et résistance mécanique. Ces propriétés permettent aux filaments de tungstène de fonctionner de manière stable dans des environnements à haute température et sous vide poussé et de fournir des faisceaux d'électrons fiables.

Le filament de tungstène dans le canon à électrons doit le chauffer à 2000-2800°C en l'allumant, excitant les électrons sur la surface du tungstène pour surmonter la fonction de travail et s'échapper, formant un flux d'électrons. Ces électrons sont accélérés sous l'action du champ électrique pour générer un faisceau d'électrons focalisé pour l'imagerie, le traitement ou l'analyse. Par exemple, dans le MEB, la stabilité de l'émission et la luminosité du filament de tungstène affectent directement la résolution de l'imagerie ; En lithographie par faisceau d'électrons, la durée de vie et la consistance du filament déterminent la précision de traitement du motif à l'échelle nanométrique. De plus, en tant que métal rare, la rareté et la valeur élevée des ressources de tungstène soulignent encore la position stratégique des filaments de tungstène dans la chaîne d'approvisionnement mondiale de la science et de la technologie et de l'industrie. Selon les informations de [Chinatungsten Online](#), la technologie de fabrication des filaments de tungstène est directement liée aux performances et au coût des équipements électroniques, et constitue l'une des technologies clés dans le domaine de la haute technologie.

1.2 Développement historique et évolution technologique

Les filaments de tungstène ont vu le jour à la fin du 19^e siècle et sont étroitement liés à l'essor de l'électronique sous vide. En 1878, Thomas Edison a utilisé pour la première fois le tungstène dans des filaments incandescents et a découvert sa tolérance à haute température et son faible taux d'évaporation, jetant ainsi les bases du tungstène dans les applications à haute température. Au début du 20^e siècle, les progrès de la technologie des tubes à vide ont conduit à la naissance des canons à électrons, et le tungstène est devenu le matériau préféré pour les cathodes de canon à électrons en raison de son point de fusion élevé et de sa stabilité chimique. Dans les années 1920, [les filaments de tungstène](#) ont commencé à être utilisés dans les premiers tubes cathodiques (CRT), marquant leur utilisation généralisée dans les appareils électroniques.

Dans les années 1950, l'avènement des microscopes électroniques à balayage a imposé des

exigences plus élevées aux filaments de tungstène, ce qui a incité les chercheurs à optimiser leur microstructure et leur processus de fabrication. Dans les années 1960, l'introduction de la technologie de dopage est devenue une percée importante. Par exemple, l'ajout d'éléments tels que le potassium, l'aluminium et le silicium ([connaissance du tungstène](#)) a considérablement amélioré la résistance au fluage et l'efficacité de l'émission d'électrons thermiques du filament. À l'aube du 21^e siècle, les progrès de la nanotechnologie et de la fabrication de précision ont favorisé le développement de la technologie des filaments de tungstène. Par exemple, la technologie de contrôle des grains à l'échelle nanométrique peut optimiser les propriétés mécaniques du filament, et les technologies de revêtement de surface (telles que le revêtement d'oxyde) peuvent prolonger la durée de vie.

1.3 Le rôle du filament de tungstène à faisceau d'électrons dans la technologie moderne

Dans la technologie moderne, les filaments de tungstène sont un composant indispensable des canons à électrons et sont largement utilisés dans la recherche scientifique, la fabrication industrielle, le traitement médical et les domaines technologiques émergents. Ses principaux rôles sont les suivants :

Recherche scientifique : En MEB et MET, les filaments de tungstène fournissent des faisceaux d'électrons à haute luminosité pour l'observation de structures à l'échelle nanométrique. Par exemple, la stabilité de l'émission des filaments de tungstène affecte directement la résolution au niveau atomique du MET.

Fabrication industrielle : Les équipements de soudage, de découpe et de lithographie par faisceau d'électrons s'appuient sur des faisceaux d'électrons à haute énergie générés par des filaments de tungstène pour réaliser un traitement de haute précision.

Applications médicales : Les filaments de tungstène dans les tubes à rayons X sont utilisés pour générer les faisceaux d'électrons nécessaires à l'imagerie diagnostique et sont largement utilisés dans la tomodensitométrie et la radiothérapie.

Domaines émergents : Les filaments de tungstène sont de plus en plus utilisés dans l'impression 3D (fusion de faisceaux d'électrons), les systèmes de propulsion spatiale (tels que les propulseurs ioniques) et les nanotechnologies. Par exemple, la technologie de fusion par faisceau d'électrons utilise un faisceau d'électrons à haute énergie généré par un filament de tungstène pour faire fondre avec précision des poudres métalliques afin de créer des structures complexes.

Les filaments de tungstène affectent directement l'efficacité et la précision de l'équipement. Par exemple, en lithographie par faisceau d'électrons, la consistance de l'émission et la durée de vie des filaments déterminent la qualité des motifs à l'échelle nanométrique. Avec des exigences de plus en plus strictes en matière de protection de l'environnement et de développement durable, la fabrication écologique et le recyclage des filaments de tungstène sont devenus un sujet brûlant dans l'industrie. Les entreprises mondiales explorent les technologies de recyclage des déchets de tungstène et les

processus de production à faible consommation d'énergie pour faire face aux pénuries de ressources et aux défis environnementaux.



CTIA GROUP LTD Filament de tungstène à faisceau d'électrons

Chapitre 2 Principes de base du filament de tungstène dans le canon à électrons

2.1 Principe de fonctionnement du canon à électrons

Un canon à électrons est un dispositif qui accélère un faisceau d'électrons à travers un champ électrique ou magnétique et est largement utilisé dans les dispositifs électroniques sous vide. Sa structure de base comprend une cathode (généralement un filament de tungstène), une anode et une électrode de contrôle (telle qu'une grille). Lors du travail, le filament de tungstène est chauffé à une température élevée (2000-2800°C) par l'électricité, libérant des électrons chauds ; Ces électrons sont accélérés par le champ électrique formé par la haute tension (de plusieurs milliers de volts à dizaines de kilovolts) appliquée par l'anode pour former un faisceau d'électrons de haute énergie. L'électrode de contrôle ajuste l'intensité, la forme et la focalisation du faisceau d'électrons pour répondre aux besoins de différentes applications.

Les performances d'un canon à électrons dépendent de l'efficacité de l'émission, de la stabilité du faisceau et de la précision de focalisation du filament. Les filaments de tungstène sont le matériau de cathode préféré pour les canons à électrons en raison de leur point de fusion élevé, de leur faible pression de vapeur et de leurs caractéristiques d'émission d'électrons thermiques stables. Par exemple, dans un microscope électronique à balayage, le canon à électrons doit fournir un faisceau d'électrons à faisceau étroit et à haute luminosité, et la microstructure et l'état de surface du filament de tungstène affectent directement ces paramètres. Selon les données de Chinatungsten Online, les conceptions modernes de canons à électrons peuvent concentrer le faisceau d'électrons au niveau subnanométrique en optimisant la géométrie du filament et la configuration des électrodes.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés Tél. : 0086 592 512 9696

Numéro de version du document standard CTIAQCD -MA-E/P 2024 version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

www.ctia.com.cn

sales@chinatungsten.com

2.2 Bases physiques et chimiques du filament de tungstène en tant que matériau de cathode

Le tungstène en tant que matériau de cathode réside dans ses propriétés physiques et chimiques uniques :

Point de fusion élevé : Le point de fusion du tungstène est de 3422 °C, ce qui peut résister à l'environnement à haute température lorsque le canon à électrons fonctionne.

Faible pression de vapeur : le tungstène a un faible taux d'évaporation à haute température, ce qui réduit la perte de filament et la contamination du système de vide.

Fonction de travail élevée : La fonction de travail du tungstène est d'environ 4,5 eV, ce qui convient à l'émission thermoïonique et fournit un flux d'électrons stable.

Stabilité chimique : Le tungstène résiste à l'oxydation et à la corrosion dans un environnement sous vide et convient à une utilisation à long terme.

La structure cristalline cubique centrée sur le corps du tungstène lui confère une excellente résistance mécanique et une stabilité thermique. L'ajout d'éléments dopants (tels que le potassium, l'aluminium et le silicium) peut optimiser davantage les performances, par exemple, en réduisant la fonction de travail ou en améliorant la résistance au fluage. Selon les données de Chinatungsten Online, l'efficacité d'émission des filaments dopés au tungstène peut être augmentée de 10 à 20 %, améliorant considérablement les performances des canons à électrons. De plus, la morphologie et la propreté de la surface du tungstène sont essentielles aux performances d'émission, et de minuscules impuretés ou couches d'oxyde peuvent réduire considérablement l'efficacité des émissions.

2.3 Mécanisme d'émission thermionique

Le filament de tungstène dans le canon à électrons est une émission thermoïonique. Lorsque le filament de tungstène est chauffé à haute température, les électrons libres à l'intérieur peuvent surmonter la barrière de potentiel (appelée fonction de travail) formée à la surface du matériau en raison d'une énergie thermique suffisante, puis s'échapper dans le vide pour former un flux d'électrons.

Selon l'équation de Richardson-Dushman, la relation entre la densité de courant J d'émission d'électrons thermiques et la température T et la fonction de travail du matériau ϕ peut être exprimée comme suit :

$$J = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}}$$

Dans:

J : Densité de courant d'émission d'électrons (A/cm²)

A : Constante de Richardson (généralement environ 120 A/cm²/K²)

T : Température de surface du filament de tungstène (K)

ϕ : fonction de travail électronique du matériau (eV)

k : constante de Boltzmann ($8,617 \times 10^{-5}$ eV /K)

Pour le tungstène, sa fonction de travail est d'environ 4,5 à 4,6 eV. Bien qu'il ne soit pas le plus bas, en raison de son point de fusion élevé, il peut résister à des températures de fonctionnement supérieures à 2000°C, ce qui rend son efficacité d'émission d'électrons thermique suffisante pour répondre aux besoins des canons à électrons.

La caractéristique de l'émission d'électrons thermiques est que la densité de courant électronique augmente rapidement avec la relation exponentielle de la température. Par conséquent, la conception du canon à électrons doit contrôler avec précision le courant de chauffage du filament de tungstène pour obtenir l'intensité requise du faisceau d'électrons tout en évitant la perte ou la rupture du filament due à la surchauffe.

Dans les applications pratiques, l'état de surface du filament a un impact significatif sur les performances d'émission. Par exemple, les oxydes ou les impuretés de surface augmenteront la fonction de travail et réduiront l'efficacité des émissions ; La morphologie microscopique (telle que l'orientation des grains et la rugosité de surface) affecte l'efficacité de l'échappement des électrons. Par conséquent, les techniques de nettoyage chimique, de polissage et de revêtement de surface sont souvent utilisées dans la production de filaments pour optimiser les performances.

2.4 Comparaison des filaments de tungstène et des matériaux alternatifs

Bien que les filaments de tungstène aient d'excellentes performances, leur fonction de travail élevée et leur durée de vie limitée ont incité les chercheurs à explorer des matériaux alternatifs. Voici une comparaison des filaments de tungstène avec des matériaux alternatifs courants :

Tungstène lanthane (LaB6) : Il a une faible fonction de travail (environ 2,7 eV) et une efficacité d'émission élevée, ce qui le rend adapté aux applications à haute luminosité, mais il a des exigences strictes en matière de vide et est facilement contaminé par l'oxygène.

Nanotubes de carbone (NTC) : Ils ont des propriétés d'émission de champ, ne nécessitent pas de chauffage et conviennent aux applications miniaturisées, mais leurs coûts de fabrication sont élevés et leur stabilité doit être vérifiée plus avant.

Cathode d'oxyde : rendement d'émission élevé et basse température de fonctionnement (environ 1000°C), mais faible résistance mécanique et ne convient pas aux canons à électrons de haute puissance.

Les matériaux composites à base de tungstène : tels que les matériaux en tungstène dopés avec des oxydes ou des carbures, ont à la fois une efficacité d'émission élevée et une longue durée de vie, mais le processus est complexe et le coût est élevé.

Le filament de tungstène lui permet de dominer le canon à électrons haute puissance et à longue

durée de vie. Cependant, sous la demande de miniaturisation et de faible consommation d'énergie, de nouveaux matériaux tels que les nanotubes de carbone et le tungstène nanostructuré deviennent des points chauds de la recherche.



CTIA GROUP LTD Filament de tungstène à faisceau d'électrons

Chapitre 3 Préparation et processus de production du filament de tungstène à faisceau d'électrons

Le filament de tungstène à faisceau d'électrons est un maillon clé pour garantir ses performances et sa fiabilité élevées, couvrant l'ensemble du processus, de la sélection des matières premières au formage final. Ce chapitre traite en détail de la préparation des matières premières, du processus métallurgique, du traitement de formage, de l'équipement de production, du contrôle de la qualité, etc., en combinant la technologie de pointe mondiale et les pratiques de l'industrie, et en analysant en profondeur les détails techniques et les défis de chaque étape.

3.1 Sélection et préparation des matières premières pour le filament de tungstène à faisceau d'électrons

La qualité des matières premières détermine directement les performances des filaments de tungstène, ce qui implique la purification du tungstène métallique, les caractéristiques de la poudre de tungstène, la sélection des matériaux dopants et un contrôle de qualité strict.

3.1.1 Source et purification du tungstène métal

Le tungstène métal est principalement extrait de la wolframite (FeMnWO_4) et de la scheelite (CaWO_4), les réserves mondiales étant principalement concentrées en Chine (environ 60 %), en Russie, en Australie et au Canada. La wolframite est principalement due à sa teneur élevée en tungstène et à ses caractéristiques de séparation faciles, tandis que la scheelite nécessite un processus

de purification plus complexe en raison du calcium associé. Le processus d'exploitation minière comprend l'exploitation minière à ciel ouvert ou l'exploitation minière souterraine, suivie de la séparation du concentré de tungstène par concassage, broyage et séparation par gravité (telle qu'une table vibrante, un concentrateur en spirale).

Le processus de purification du tungstène est divisé en deux étapes : l'enrichissement physique et la fusion chimique. L'enrichissement physique améliore encore la pureté du concentré de tungstène grâce à la flottation, à la séparation magnétique et à la séparation par gravité, et la teneur typique en WO₃ doit atteindre 65-70 %. La fusion chimique convertit le concentré de tungstène en paratungstate d'ammonium ou en acide tungstique. Le processus spécifique comprend :

Le concentré de tungstène est lixivié avec une solution d'hydroxyde de sodium ou de carbonate de sodium pour former une solution de tungstate de sodium.

Échange d'ions ou extraction par solvant : élimine les impuretés (telles que le silicium, le phosphore, l'arsenic) pour produire de l'APT de haute pureté.

Calcination et réduction : L'APT est calcinée à 800-1000°C pour générer du trioxyde de tungstène, puis réduite en poudre de tungstène dans une atmosphère d'hydrogène à une température de 700-900°C.

Au cours du processus de purification, le contrôle des impuretés est crucial. Les impuretés métalliques telles que le fer, le cuivre et le soufre doivent être inférieures à 50 ppm, et les impuretés non métalliques telles que l'oxygène et le carbone doivent être inférieures à 100 ppm. La poudre de tungstène de haute pureté (99,95 %) est utilisée dans les filaments de pistolet à électrons haut de gamme, ce qui peut améliorer considérablement l'efficacité des émissions et la durée de vie.

3.1.2 Exigences relatives à la taille et à la pureté des particules de la poudre de tungstène

La poudre de tungstène est un facteur clé affectant la densité des flans frittés et la microstructure des filaments. Le filament de tungstène à faisceau d'électrons nécessite que la poudre de tungstène ait une taille de particule uniforme, généralement dans la plage de 1 à 10 microns, et que l'écart-type de la distribution granulométrique soit contrôlé à $\pm 0,5$ micron. La taille fine et uniforme des particules aide à former un corps fritté dense avec une porosité réduite (la cible est inférieure à 2 %). Une taille de particule trop grande peut entraîner un frittage inégal, tandis qu'une taille de particule trop petite peut augmenter la difficulté de pressage.

En termes de pureté, la teneur en impuretés métalliques (telles que le fer, le nickel et le molybdène) dans la poudre de tungstène doit être inférieure à 30 ppm, et les impuretés non métalliques (telles que l'oxygène, l'azote et le carbone) doivent être inférieures à 80 ppm. La poudre de tungstène d'ultra-haute pureté (grade 5N, 99,999 %) est de plus en plus demandée dans les applications haut de gamme, telles que la fabrication de filaments pour le MEB haute résolution. Les méthodes de détection comprennent :

Analyse granulométrique : Un analyseur de taille de particules laser (tel que le Malvern Mastersizer) mesure la distribution granulométrique avec une précision de $\pm 0,1$ micron.

Détection de la pureté : La spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) est utilisée pour analyser la teneur en impuretés, avec une limite de détection aussi basse que le niveau ppb.

Observation de la microstructure : La microscopie électronique à balayage (MEB) a été utilisée pour examiner la morphologie de la poudre afin de s'assurer qu'il n'y avait pas d'agglomérats ou de particules anormales.

3.1.3 Sélection des additifs et des matériaux dopants (tels que le potassium, l'aluminium, le silicium, etc.)

Le dopage est la technologie de base pour optimiser les performances des filaments de tungstène. Il améliore ses performances à haute température, son efficacité d'émission et sa résistance au fluage en ajoutant des oligo-éléments. Les éléments de dopage couramment utilisés comprennent :

Potassium (K) : ajouté sous forme d'oxyde de potassium (K_2O), avec une teneur de 0,01-0,05 % en poids. Le potassium forme de minuscules bulles pendant le frittage, inhibe la croissance des grains et améliore la résistance au fluage à haute température.

Aluminium (Al) : Ajouté sous forme d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) à 0,005-0,02 % en poids. L'aluminium réduit la fonction de travail (de 4,5 eV à environ 4,3 eV) et améliore l'efficacité de l'émission d'électrons thermiques.

Silicium (Si) : Ajouté sous forme de dioxyde de silicium (SiO_2) à une teneur de 0,01-0,03 % en poids. Le silicium améliore la résistance à haute température et réduit l'oxydation de surface.

D'autres éléments : tels que le rhénium (Re, 0,1-1 % en poids) est utilisé pour améliorer la ductilité, et l'oxyde d'yttrium (Y_2O_3) est utilisé pour améliorer les propriétés d'émission.

L'ajout d'éléments dopants doit être réparti uniformément par mélange humide ou alliage mécanique. Un dopage excessif peut entraîner une croissance anormale des grains ou une fragilisation des filaments. Par exemple, une teneur en potassium supérieure à 0,1 % en poids réduira la résistance mécanique.

3.1.4 Analyse des matières premières et contrôle de la qualité

L'analyse des matières premières couvre la composition chimique, la distribution granulométrique, la morphologie et l'analyse des impuretés. Les équipements couramment utilisés comprennent :

Spectromètre à fluorescence X (XRF) : Analysez rapidement la composition chimique de la poudre de tungstène et des éléments dopants avec une précision de $\pm 0,01$ % en poids.

Microscopie électronique à balayage (MEB) : observer la morphologie des poudres et détecter les particules agglomérées ou irrégulières.

Microscopie électronique à transmission (MET) : Analysez les structures à l'échelle nanométrique et évaluez la distribution des éléments dopants.

ICP-MS : Détecter les impuretés à l'état de traces avec une sensibilité de l'ordre du ppb.

Le contrôle de la qualité suit les normes ISO 9001 et établit un système de traçabilité complet du stockage des matières premières à la production. Chaque lot de poudre de tungstène doit réussir au moins trois séries de tests indépendants et le taux de réussite doit atteindre plus de 99,9 %. Les matières premières non qualifiées sont repurifiées ou jetées pour éviter d'affecter les processus ultérieurs.

3.2 Métallurgie des filaments de tungstène par faisceau d'électrons

Le processus métallurgique transforme la poudre de tungstène en filament de tungstène haute performance, impliquant des étapes telles que le pressage, le frittage, le forgeage, l'étirage et le recuit. Chaque étape doit être contrôlée avec précision pour garantir la microstructure et les performances du filament.

3.2.1 Pressage et frittage de poudre de tungstène

3.2.1.1 Paramètres du processus de pressage

Le pressage de poudre de tungstène consiste à mettre de la poudre de tungstène dans un moule et à la presser dans une pièce brute à l'aide d'une presse hydraulique ou d'une presse isostatique. Les paramètres du processus sont les suivants :

Pression : 100-300 MPa, la valeur typique est de 200 MPa. Une pression trop élevée peut provoquer l'usure de la matrice, une pression trop basse affectera la densité de la billette.

Temps de maintien : 10 à 30 secondes pour s'assurer que les particules de poudre sont complètement combinées.

Matériau du moule : carbure de tungstène (www.tungsten-carbide-powder.com) ou acier à haute résistance, paroi intérieure polie à Ra 0,1 micron pour réduire l'adhérence.

Liant : Ajoutez 0,5 à 2 % en poids d'alcool polyvinylique (PVA) ou de paraffine pour améliorer la résistance de l'ébauche, qui doit être complètement éliminée au début du frittage.

La densité relative de l'ébauche pressée doit atteindre 60-70 % et la porosité doit être contrôlée à 30 % près. La technologie CIP peut encore améliorer l'uniformité de la densité et convient à la fabrication de filaments haute performance.

3.2.1.2 Type de four de frittage et régulation de la température

Le frittage est le processus de densification de la billette pressée à haute température, dans le but de réduire la porosité à moins de 2 % et de former une structure de grain uniforme. Les fours de frittage courants comprennent :

Four à chauffage par résistance : adapté à la production de petits lots, plage de température 1800-2800°C.

Four de chauffage par induction : adapté à la production à grande échelle, taux de chauffage élevé et bonne uniformité.

Four de frittage par micro-ondes : une technologie émergente qui permet une densification rapide grâce au chauffage par micro-ondes, réduisant ainsi la consommation d'énergie de 20 à 30 %.

Le processus de frittage est divisé en trois étapes :

Étape basse température (800-1200°C) : élimine les liants et les impuretés volatiles, pendant 30 à 60 minutes.

Stade à température moyenne (1500-2000°C) : Favorise la liaison des grains et les pores commencent à se fermer, durant 1 à 2 heures.

Phase haute température (2500-2800°C) : permet une densification complète, dure 30 à 90 minutes.

L'atmosphère de frittage est de l'hydrogène de haute pureté (pureté 99,999 %) ou du vide (10^{-4} Pa) pour éviter l'oxydation. La précision du contrôle de la température doit atteindre $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Une température trop élevée provoquera une croissance anormale des grains, tandis qu'une température trop basse affectera la densité.

3.2.2 Forgeage et emboutissage des tiges de tungstène

3.2.2.1 Forgeage à chaud et technologie de forgeage à froid

La billette de tungstène frittée est transformée en tiges de tungstène par forgeage pour améliorer la structure interne et la densité. Le forgeage est divisé en forgeage à chaud et forgeage à froid :

Forgeage à chaud : Il est effectué à 1500-1800°C, à l'aide d'une forgeuse rotative ou d'une machine à forger hydraulique. La quantité de déformation est contrôlée à 10-20 % à chaque fois, et le taux de déformation total atteint 50-70 %. Le forgeage à chaud peut éliminer les pores de frittage et augmenter la densité à plus de 99 %.

Forgeage à froid : Il est effectué à température ambiante et convient à la finition finale. Le forgeage à froid améliore l'état de surface et la précision dimensionnelle, mais le taux de déformation doit être contrôlé (0,1-0,5 mm/s) pour éviter les fissures.

L'équipement de forgeage doit être équipé de moules de haute précision et de systèmes de surveillance de la température pour s'assurer que la tolérance de diamètre de la tige de tungstène est inférieure à $\pm 0,05$ mm.

3.2.2.2 Conception de la matrice de tréfilage et sélection du lubrifiant

La tige de tungstène est transformée en un fil de 0,01 à 0,5 mm de diamètre par plusieurs procédés d'étirage. Les éléments clés du processus de tréfilage sont les suivants :

Matériau du moule : carbure de tungstène ou diamant polycristallin (PCD), précision de l'ouverture du moule $\pm 0,1$ micron, rugosité de surface Ra 0,05 micron.

Passes d'étirage : 20-40, avec un taux de réduction de surface de 10-15 % pour chaque passe et un taux de réduction de surface totale de plus de 99 %.

Lubrifiant : Émulsion de graphite, lubrifiant à base de molybdène ou suspension nano-diamant, réduisant le coefficient de frottement à moins de 0,1.

Vitesse d'étirage : 0,5-5 m / s, doit être ajusté dynamiquement en fonction du diamètre du fil et de l'état du moule.

Pendant le processus de tréfilage, la température de surface du fil de tungstène peut atteindre 300-500°C, et l'accumulation de chaleur doit être contrôlée par un système de refroidissement (tel que le refroidissement par eau ou par air). La machine à tréfiler est équipée d'un capteur de tension et d'un jauge de diamètre laser pour surveiller l'écart de diamètre du fil ($\pm 0,5$ microns) en temps réel.

3.2.3 Recuit et contrôle du grain du fil de tungstène

3.2.3.1 Température et atmosphère de recuit

Le recuit est utilisé pour éliminer les contraintes internes pendant le processus d'étirage et optimiser la structure du grain et la ductilité du fil de tungstène. Les paramètres du processus de recuit comprennent :

Température : 1200-1600 °C, la valeur typique est de 1400 °C. Le recuit à basse température (1200°C) convient aux fils minces, le recuit à haute température (1600°C) est utilisé pour les fils épais.

Temps : 10-60 secondes, temps de recuit court pour éviter une croissance excessive des grains.

Atmosphère : Hydrogène de haute pureté (99,999 %) ou gaz inerte (comme l'argon) pour éviter l'oxydation.

Équipement : Four de recuit continu ou four de recuit sous vide, précision de contrôle de la température $\pm 3^\circ\text{C}$.

Pendant le processus de recuit, le fil de tungstène est chauffé par chauffage par résistance ou par induction, et la surchauffe locale doit être évitée.

3.2.3.2 Effet de la granulométrie sur les performances

La taille des grains affecte directement la résistance mécanique, la ductilité et les performances d'émission d'électrons thermiques du fil de tungstène. La taille idéale des grains est de 1 à 5 microns :

Grains trop gros (>10 microns) : réduisent la résistance à la traction et augmentent le fluage à haute température.

Grains trop petits (<1 micron) : augmentent la fragilité et réduisent la ductilité.

Le contrôle des grains est réalisé par des processus de dopage et de recuit. Le dopage potassique forme de minuscules bulles, entravant la migration des joints de grains et le maintien de grains fins ; Un contrôle précis de la température et du temps de recuit évite la recristallisation secondaire. La microscopie électronique à balayage et la diffraction par rétrodiffusion d'électrons (EBSD) sont utilisées pour analyser la taille et l'orientation des grains afin d'assurer la formation de structures fibreuses.

3.3 Formation et traitement du filament de tungstène par faisceau d'électrons

Le formage et l'usinage sont le processus de traitement des filaments de tungstène en formes géométriques spécifiques (telles que des spirales ou des cônes) pour garantir les performances d'émission et la stabilité mécanique du filament dans le canon à électrons.

3.3.1 Enroulement et formage du fil de tungstène

3.3.1.1 Hélice simple, double hélice et motifs géométriques complexes

La géométrie du filament de tungstène affecte directement la luminosité et les performances de focalisation du faisceau d'électrons. Les conceptions courantes comprennent :

Filament hélicoïdal unique : adapté aux canons à électrons de faible puissance (tels que les petits MEB).

Filament à double hélice : Deux filaments de tungstène sont enroulés en parallèle pour augmenter la zone d'émission, ce qui convient aux applications à haute luminosité (telles que le TEM).

Conceptions géométriques complexes : telles que les spirales coniques, les spirales à plusieurs segments ou les spirales plates, pour des canons à électrons spéciaux, par exemple dans les équipements de lithographie haute résolution.

Les paramètres suivants doivent être pris en compte pour la conception en spirale :

Diamètre de la spirale : 0,5-2,0 mm.

Uniformité de l'espacement : Assure l'uniformité de l'émission.

Angle d'hélice : 30-60 °, affecte les caractéristiques de focalisation du faisceau d'électrons.

La conception géométrique complexe est optimisée grâce à la conception assistée par ordinateur (CAO) et à l'analyse par éléments finis (FEA) pour assurer la distribution thermique et la stabilité mécanique.

3.3.1.2 Automatisation et précision de l'équipement de moulage

L'équipement de bobinage adopte un système CNC, équipé d'un servomoteur de haute précision et d'un télémètre laser. Les technologies clés comprennent :

Servocommande : vitesse d'enroulement 0,1-10 tr/min, précision $\pm 0,01$ tr/min.

Télémétrie laser : suivi en temps réel du diamètre et du pas de la spirale, précision de ± 1 micron.

Contrôle de la tension : 0,1-5 N, pour éviter que le fil de tungstène ne se déforme ou ne se casse.

L'enrouleur automatisé prend en charge la liaison multi-axes, ce qui permet le prototypage rapide de formes géométriques complexes. Les équipements modernes intègrent des systèmes de vision industrielle pour détecter les défauts en spirale (tels que les espacements inégaux et les rayures de surface), réduisant ainsi le taux de rebut à moins de 0,5 %.

3.3.2 Technologie de traitement de surface

3.3.2.1 Nettoyage et polissage chimiques

La surface du fil de tungstène doit être exempte d'oxydes, d'huiles et de résidus de tréfilage pour garantir les performances d'émission. Le processus de nettoyage chimique comprend :

Décapage : Utilisez un mélange d'acide fluorhydrique (HF) et d'acide nitrique (HNO₃) (rapport 1 : 3), laissez tremper pendant 10 à 30 secondes pour éliminer les oxydes de surface.

Nettoyage alcalin : Utilisez une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) pour neutraliser les résidus acides, et le temps de nettoyage est de 5 à 15 secondes.

Nettoyage par ultrasons : effectué dans de l'eau déminéralisée, fréquence 40 kHz, durée 1-3 minutes, pour éliminer les minuscules particules.

Après le nettoyage, le polissage électrochimique est effectué à l'aide d'un électrolyte mixte d'acide phosphorique (H₃PO₄) et d'acide sulfurique (H₂SO₄), d'une densité de courant de 0,1 à 0,5 A/cm² et d'un temps de polissage de 10 à 20 secondes. Après le polissage, la rugosité de surface Ra tombe en dessous de 0,05 micron, ce qui améliore considérablement l'uniformité de l'émission.

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

Ultra-High Heat Resistance: Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

Excellent Thermionic Emission Performance: Provides efficient electron emission under low power consumption

High-Purity Material: $W \geq 99.95\%$ reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

Long Service Life: Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

Precision Manufacturing: Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

Multiple Structure Options: Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés Tél. : 0086 592 512 9696

Numéro de version du document standard CTIAQCD -MA-E/P 2024 version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V
www.ctia.com.cn

sales@chinatungsten.com

3.3.2.2 Procédé de revêtement de surface (p. ex. revêtement d'oxyde)

Les revêtements de surface réduisent la fonction de travail et améliorent l'efficacité des émissions et la durée de vie. Les revêtements courants comprennent l'oxyde d'yttrium (Y_2O_3), l'oxyde de zirconium (ZrO_2) et l'oxyde de thorium (ThO_2). Les procédés de revêtement comprennent :

Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) : Dépôt de revêtements d'oxyde à 600-800°C avec une épaisseur de 0,1-1 micron et une uniformité de $\pm 0,01$ micron.

Projection plasma : convient aux revêtements épais (1-5 microns), forte adhérence à haute température.

Méthode sol-gel : produit des revêtements à l'échelle nanométrique, adaptés aux filaments de haute précision.

Le revêtement doit être ferme pour éviter de s'écailler en raison de la température élevée.

3.3.3 Découpage et façonnage du filament

La découpe filament utilise la découpe laser ou la découpe EDM avec une précision de ± 5 microns. La découpe laser utilise un laser pulsé (longueur d'onde 1064 nm, puissance 10-50 W), vitesse de coupe 0,1-1 mm/s, évitant les zones affectées par la chaleur. La découpe EDM convient aux formes complexes et l'écartement des électrodes est contrôlé à 10-20 microns.

Après la découpe, le filament est façonné à l'aide d'un dispositif de haute précision et d'un microscope pour ajuster la forme du filament. L'équipement de façonnage est équipé d'un système d'asservissement avec une précision de positionnement de ± 2 microns pour garantir que la géométrie de la spirale répond aux exigences de conception.

3.4 Équipement de production de filaments de tungstène par faisceau d'électrons et automatisation

Les équipements de production et la technologie d'automatisation sont la clé de l'amélioration de la cohérence et de l'efficacité des filaments, couvrant les fours de frittage, les tréfileuses, les bobineuses et les lignes de production intelligentes.

3.4.1 Vue d'ensemble des principaux équipements de production

3.4.1.1 Four de frittage

Le four de frittage doit prendre en charge un environnement à haute température (2800°C) et à vide poussé (10^{-5} Pa). Les fours de frittage modernes utilisent les technologies suivantes :

Contrôle PLC : programme de chauffage à plusieurs niveaux, écart de température $\pm 3^\circ C$.

Système atmosphérique: hydrogène ou argon de haute pureté, précision du contrôle de débit $\pm 0,1$ L/min.

Système de refroidissement: refroidissement par eau ou refroidissement par air, vitesse de refroidissement 10-50°C/min.

Les fours de frittage par micro-ondes sont une tendance émergente, réduisant la consommation d'énergie de 30 % et raccourcissant le temps de frittage de 50 %.

3.4.1.2 Machine à tréfiler

La machine à tréfiler est équipée de matrices multi-passes et d'un système de lubrification automatique. Les paramètres clés sont les suivants :

Nombre de moules : 20-40, taux de réduction d'ouverture 10-15 %.

Vitesse d'étirage : 0,5-10 m / s, ajustée dynamiquement pour éviter la rupture du fil.

Système de mesure du diamètre : Instrument de mesure du diamètre laser, précision $\pm 0,5$ micron.

Les tréfileuses à grande vitesse prennent en charge une production continue, avec une longueur de dessin unique de plusieurs milliers de mètres.

3.4.1.3 Machine d'emballage

La bobineuse adopte un système CNC à six axes pour prendre en charge des conceptions en spirale complexes. Les technologies clés comprennent :

Servomoteur : précision de vitesse $\pm 0,01$ tr/min.

Surveillance laser : Détection en temps réel de la géométrie de la spirale avec une précision de ± 1 micron.

Contrôle de la tension : 0,1-5 N, réglable dynamiquement.

L'enrouleur automatisé peut produire 150 à 200 spirales par minute avec un taux de rebut inférieur à 0,3 %.

3.4.2 Automatisation et intelligence des lignes de production

La ligne de production automatisée intègre les technologies suivantes :

Capteur : surveille la température, la pression, le diamètre du fil et d'autres paramètres avec une précision de $\pm 0,1$ %.

Vision industrielle : Détectez les défauts de surface et les écarts géométriques avec un taux de reconnaissance de 99,9 %.

Algorithmes d'IA : analysez les données de production, prévoyez les pannes d'équipement et optimisez les paramètres de processus.

Les lignes de production intelligentes connectent les appareils via l'Internet industriel des objets (IIoT), et les données sont téléchargées sur le cloud en temps réel pour être analysées.

3.4.3 Exigences en matière de contrôle de l'environnement et de salle blanche

La production de filaments de tungstène doit être effectuée dans une salle blanche de classe ISO 5 (classe 100). Les paramètres environnementaux comprennent :

Température : $20 \pm 1^\circ\text{C}$, pour éviter que la dilatation thermique n'affecte la précision.

Humidité : 40-60 %, pour éviter l'accumulation d'électricité statique.

Propreté de l'air : moins de 100 particules de 0,5 micron par mètre cube.

La salle blanche est équipée d'un filtre à haute efficacité (HEPA) et d'un système de pression positive pour éviter la contamination par la poussière. La concentration des particules dans l'air est régulièrement testée pour garantir la conformité aux normes ISO 14644-1.

3.5 Contrôle de la qualité et inspection du filament de tungstène à faisceau d'électrons

Le contrôle de la qualité s'étend tout au long du processus de production, couvrant l'inspection en ligne, les tests de performance et l'analyse des défaillances pour s'assurer que les performances du filament répondent aux exigences du canon à électrons.

3.5.1 Technologie de détection en ligne

3.5.1.1 Inspection de la précision dimensionnelle et géométrique

L'inspection dimensionnelle utilise un mesureur de diamètre laser et un microscope optique pour mesurer le diamètre du fil de tungstène, le pas de la spirale et la déviation géométrique :

Diamètre : précision $\pm 0,1$ mm, écart inférieur à $\pm 1,0$ mm.

Pas en spirale : précision $\pm 2,0$ mm, assurant l'uniformité de l'émission.

Déviations géométriques : mesurées par scanner 3D, la déviation est inférieure à $\pm 0,5$ mm.

Le système de détection en ligne collecte 1 000 points de données par seconde, fournit un retour d'information en temps réel au système de contrôle et ajuste automatiquement les paramètres du processus.

3.5.1.2 Détection des défauts de surface

Les défauts de surface (par exemple, fissures, résidus d'oxyde, rayures) sont identifiés par les techniques suivantes :

Microscope électronique à balayage (MEB) : grossissement 1000-10000 fois, détection des défauts à l'échelle nanométrique.

Contrôle non destructif par rayons X : Identification des fissures internes et des pores, profondeur de pénétration 0,1-1 mm.

Vision industrielle : Caméras haute résolution combinées à des algorithmes d'IA, avec un taux de détection de 99,8 %.

La détection des défauts couvre 100 % des produits et le taux de rebut est contrôlé en dessous de 0,2 %.

3.5.2 Essais de rendement

3.5.2.1 Essai de résistance et de conductivité

Le test de résistance utilise la méthode à quatre sondes pour mesurer la résistivité ($5,6 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, 20°C) et le coefficient de température ($0,0045/^\circ\text{C}$) du fil de tungstène. Les conditions d'essai comprennent :

Plage de température : $20-2800^\circ\text{C}$, simulant l'environnement de travail réel.

Précision du courant : $\pm 0,1 \mu\text{A}$, assurant la précision de la mesure.

Le test de conductivité est effectué dans une chambre à vide pour vérifier la stabilité électrique du filament à haute température.

3.5.2.2 Essai de performance d'émission d'électrons thermiques

Les tests d'émission thermoïonique sont effectués dans un environnement à vide poussé (10^{-6} Pa) pour mesurer la densité du courant d'émission du filament à $2000-2800^\circ\text{C}$. L'équipement d'essai comprend :

Chambre à vide : équipée d'un collecteur d'électrons et d'une source de tension.

Surveillance de la température : Thermomètre infrarouge, précision $\pm 5^\circ\text{C}$.

Mesure du courant : Picoampèremètre, précision $\pm 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Les résultats des tests doivent être conformes à l'équation de Richardson-Dushman et la densité de courant d'émission cible est de 1 à $5 \text{ A}/\text{cm}^2$.

3.5.3 Analyse des défaillances et mesures d'amélioration

L'analyse des défaillances permet d'identifier la cause de la rupture du filament, de l'évaporation ou de la dégradation de surface. Les méthodes courantes comprennent :

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés Tél. : 0086 592 512 9696

Numéro de version du document standard CTIAQCD -MA-E/P 2024 version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

www.ctia.com.cn

sales@chinatungsten.com

MEB et spectromètre à dispersion d'énergie (EDS) : analysent la morphologie des fractures et la composition chimique, et identifient les défauts ou les impuretés des joints de grains.

Tomographie à rayons X (TDM) : Détecte les fissures et les pores internes avec une précision de ± 1 micron.

Analyse thermogravimétrique (TGA) : mesure le taux d'évaporation à haute température et évalue la durée de vie.

Les améliorations comprennent l'optimisation de la formule de dopage (comme l'augmentation de la teneur en potassium), l'ajustement de la température de frittage (la réduction de 50°C) et le renforcement du revêtement de surface.



CTIA GROUP LTD Filament de tungstène à faisceau d'électrons

Chapitre 4 Caractéristiques du filament de tungstène à faisceau d'électrons

Les filaments de tungstène à faisceau d'électrons déterminent directement leurs performances dans les équipements électroniques de haute précision, y compris les microscopes électroniques à balayage, les équipements de soudage par faisceau d'électrons et les tubes à rayons X. Ce chapitre traite en détail des propriétés physiques et chimiques, des propriétés électriques et thermiques, de la microstructure et des relations de performance, de la durée de vie et de la fiabilité des filaments de tungstène, ainsi que de la fiche de données de sécurité (FDS) fournie par CTIA GROUP LTD. Grâce à l'analyse approfondie de ces caractéristiques, le comportement des filaments de tungstène dans des conditions extrêmes et leur direction d'optimisation sont révélés.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés Tél. : 0086 592 512 9696

Numéro de version du document standard CTIAQCD -MA-E/P 2024 version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

www.ctia.com.cn

sales@chinatungsten.com

4.1 Propriétés physiques et chimiques du filament de tungstène à faisceau d'électrons

Les filaments de tungstène sont à la base de leur utilisation comme matériaux de cathode dans les canons à électrons, et déterminent leur stabilité et leur fonctionnalité dans des environnements à haute température et sous vide poussé.

4.1.1 Point de fusion et stabilité thermique du filament de tungstène

Les filaments de tungstène sont connus pour leur point de fusion extrêmement élevé (3422°C), l'un des points de fusion les plus élevés des métaux trouvés dans la nature. Cette propriété lui permet de maintenir son intégrité structurelle aux températures de fonctionnement du canon à électrons (généralement 2000-2800°C) sans fondre ni se déformer de manière significative. Le point de fusion élevé du tungstène provient de sa structure cristalline cubique centrée sur le corps (BCC), qui présente des liaisons métalliques extrêmement fortes entre les atomes.

La stabilité thermique est un autre avantage clé des filaments de tungstène, ce qui se reflète dans leur pression de vapeur extrêmement faible. À 2800°C, la pression de vapeur du tungstène n'est que de 10^{-7} Pa, ce qui signifie que même à des températures élevées pendant une longue période, le taux d'évaporation du matériau est extrêmement faible. Par exemple, à 2500°C, le taux de perte de masse du filament de tungstène est d'environ 0,01 mg/cm²·h, ce qui est beaucoup plus bas que d'autres matériaux de cathode tels que le lanthane tungstène (LaB6). Cette caractéristique de faible évaporation réduit l'amincissement du diamètre du filament, prolongeant ainsi la durée de vie tout en évitant la contamination dans le système de vide.

Une autre manifestation de la stabilité thermique est la tolérance du filament de tungstène aux chocs thermiques. Lors du démarrage et de l'arrêt du canon à électrons, le filament subit des cycles rapides de chaud et de froid (de la température ambiante à 2500°C, avec une vitesse de chauffage allant jusqu'à 100°C/s). La capacité thermique élevée du tungstène (0,13 J/g·K) et une excellente conductivité thermique (173 W/m·K) lui permettent de disperser rapidement la chaleur, réduisant ainsi la surchauffe locale et le stress thermique. Les éléments dopants (tels que le potassium) améliorent encore la stabilité thermique, inhibent la croissance des grains en formant de minuscules bulles et réduisent les taux de fluage à haute température. Des tests réels ont montré que les filaments de tungstène dopés au potassium peuvent fonctionner en continu pendant plus de 5000 heures à 2600°C avec une perte de masse inférieure à 5 %.

4.1.2 Résistivité et coefficient de température du filament de tungstène

Les filaments de tungstène sont le paramètre central de leurs performances électriques, ce qui affecte directement l'efficacité de chauffage et la stabilité du courant. À 20 °C, la résistivité du tungstène est de 5,6 μΩ·cm, et à mesure que la température augmente, la résistivité augmente de manière non linéaire. À 2500°C, la résistivité peut monter jusqu'à 50-60 μΩ·cm, soit une augmentation d'environ 10 fois. Ce changement est dû à l'effet de la température sur la diffusion des électrons. À des températures élevées, la vibration du réseau est améliorée, ce qui entrave le mouvement des électrons.

TCR) du tungstène est d'environ $0,0045/^{\circ}\text{C}$ dans la plage de 20-1000 $^{\circ}\text{C}$, ce qui indique que la résistivité augmente linéairement avec la température, mais à des températures plus élevées (telles que $>2000^{\circ}\text{C}$), le TCR diminue légèrement (environ $0,0038/^{\circ}\text{C}$), reflétant de légers changements dans la structure cristalline. La stabilité de la résistivité garantit que le filament a des propriétés électriques prévisibles dans des conditions de température dynamiques. Par exemple, dans les canons à électrons, le filament est généralement chauffé par une alimentation à courant constant (courant 0,5-5 A), et le changement stable de la résistivité permet un contrôle précis de la puissance de chauffage (50-200 W) pour éviter la surchauffe ou la sous-chauffe.

Les éléments dopants ont un petit effet sur la résistivité. Par exemple, l'ajout de 0,01 % en poids d'aluminium peut réduire la résistivité d'environ 5 %, car les atomes d'aluminium remplacent partiellement les atomes de tungstène, optimisant ainsi le chemin de conduction des électrons. Les traitements de surface (tels que les revêtements d'oxyde) ont un effet plus faible sur la résistivité, mais peuvent légèrement augmenter la résistance de surface à des températures élevées en raison de la décomposition du revêtement. Dans les applications pratiques, la résistance du filament est mesurée par la méthode à quatre sondes avec une précision de $\pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ pour garantir la cohérence d'un lot à l'autre.

4.1.3 Propriétés anti-oxydation et anti-corrosion du filament de tungstène

Les filaments de tungstène présentent une excellente résistance à l'oxydation dans des environnements à vide poussé (10^{-6} Pa) car leur surface est difficile à réagir avec l'oxygène résiduel pour former des oxydes. Dans des conditions de fonctionnement typiques du canon à électrons (2500 $^{\circ}\text{C}$, vide 10^{-7} Pa), le taux d'oxydation est presque nul et la surface reste lisse et exempte d'accumulation d'oxyde. Cependant, dans des environnements sous vide non idéaux (tels que 10^{-4} Pa) ou dans l'air, le tungstène réagit facilement avec l'oxygène à haute température pour former du trioxyde de tungstène, un composé volatil jaune. Par exemple, dans l'air à 1000 $^{\circ}\text{C}$, le taux d'oxydation de surface du tungstène est d'environ $0,1 \text{ mg/cm}^2\cdot\text{min}$, ce qui entraîne une perte rapide de matière.

La résistance à la corrosion permet aux filaments de tungstène de résister aux gaz résiduels dans les canons à électrons, tels que la vapeur d'eau, l'azote et les hydrocarbures à l'état de traces. Sous vide poussé, la pression partielle de ces gaz est extrêmement faible ($<10^{-8}$ Pa) et leur effet sur le tungstène est négligeable. Cependant, à des niveaux de vide inférieurs (tels que 10^{-5} Pa), la vapeur d'eau peut provoquer une micro-corrosion à la surface, formant une fine couche d'oxyde et réduisant l'efficacité de l'émission. Les revêtements de surface tels que l'yttria ou l'oxyde de zirconium améliorent considérablement la résistance à la corrosion en formant une couche protectrice qui bloque la pénétration des molécules de gaz. Les tests montrent que le revêtement en oxyde d'yttrium peut réduire le taux d'oxydation de 60 % et ne maintenir aucune dégradation évidente pendant 2000 heures sous un vide de 10^{-5} Pa.

Les filaments de tungstène à la corrosion chimique se reflètent également dans leur résistance aux produits de décharge d'arc. Dans les canons à électrons, la décharge d'arc peut produire du plasma

contenant des ions actifs (tels que O^{2+} , N^{2+}). La grande stabilité chimique du tungstène rend sa surface moins sensible aux dommages causés par le bombardement d'ions, ce qui permet de maintenir des performances à long terme.

4.1.4 Résistance mécanique et ductilité du filament de tungstène

Les filaments de tungstène sont une propriété importante pour eux dans les environnements à haute température et à fort stress. À température ambiante, le tungstène a une résistance à la traction de 800-1000 MPa et une limite d'élasticité d'environ 600 MPa. Même à 2500°C, la résistance à la traction reste à 300-500 MPa, ce qui est beaucoup plus élevé que d'autres matériaux de cathode tels que le nickel (<100 MPa). La haute résistance provient de la structure cristalline BCC du tungstène et de la faible densité de défauts, et les éléments de dopage optimisent encore les propriétés. Par exemple, l'ajout de 0,05 % en poids de potassium peut augmenter la résistance à la traction de 20 % grâce au renforcement des joints de grains et réduire la déformation à haute température.

La ductilité est un paramètre clé des filaments de tungstène lors de l'étirage et du bobinage. Le tungstène pur est cassant à température ambiante, avec un allongement à la rupture de seulement 1 à 2 %, mais grâce au dopage (comme le rhénium, 0,1 à 1 % en poids) et aux processus de recuit, l'allongement à la rupture peut être augmenté à 5 à 10 %. Le dopage au rhénium réduit la barrière d'énergie pour le mouvement de dislocation et améliore la capacité de déformation plastique. Le recuit (1200-1600°C, atmosphère d'hydrogène) élimine les contraintes d'étirage, forme une structure de grain fibreuse uniforme et améliore encore la ductilité. Des tests réels montrent que le taux de rupture du fil de tungstène dopé au rhénium lors de l'étirage est inférieur à 0,1 %, ce qui convient au formage en spirale complexe.

L'équilibre entre la résistance mécanique et la ductilité est essentiel à la résistance aux vibrations du filament. Dans les canons à électrons, le filament peut être soumis à des vibrations mécaniques (10-100 Hz) ou à des chocs thermiques. Le filament de tungstène optimisé a montré une excellente fiabilité mécanique sans fissures lors de 1000 tests de vibration (amplitude 0,5 mm).

4.2 Caractéristiques électriques et thermiques du filament de tungstène à faisceau d'électrons

Les propriétés électriques et thermiques déterminent l'efficacité de chauffage, les performances d'émission d'électrons et les capacités de gestion thermique du filament de tungstène dans le canon à électrons, et sont au cœur de sa fonctionnalité.

4.2.1 Efficacité d'émission thermoïonique du filament de tungstène

L'efficacité d'émission thermoïonique est l'indicateur central du filament de tungstène en tant que matériau de cathode, qui est déterminé par la fonction de travail, l'état de surface et la température de fonctionnement. La fonction de travail du tungstène pur est de 4,5 eV, ce qui indique que l'énergie nécessaire pour que les électrons s'échappent de la surface est élevée. À 2500°C, la densité de courant d'émission du filament de tungstène est de 1-5 A/cm², et la luminosité est d'environ 10⁵-10⁶ A/cm²·SR, qui convient à la plupart des applications de canon à électrons. L'efficacité des émissions suit l'équation de Richardson-Dushman :

$$J = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}}$$

Où (J) est la densité du courant d'émission, (A) est la constante de Richardson (environ 120 A/cm²· K²), (T) est la température absolue, (φ) est la fonction de travail et (k) est la constante de Boltzmann (8,617×10⁻⁵ eV/K). L'équation montre que l'efficacité d'émission augmente de façon exponentielle avec la température, mais qu'une température élevée accélère l'évaporation et qu'un équilibre doit être optimisé.

Le dopage et les revêtements de surface augmentent considérablement l'efficacité des émissions. L'ajout de 0,01 % en poids d'aluminium peut réduire la fonction de travail à 4,3 eV et augmenter la densité du courant d'émission de 15 à 20 %. Le revêtement en oxyde d'yttrium (Y2O3) (épaisseur 0,1-1 micron) réduit encore la fonction de travail à 4,2 eV et augmente l'efficacité d'émission de 30 %, atteignant 8 A/cm² à 2600°C. La propreté des surfaces a un impact significatif sur les performances d'émission, et la contamination par des traces d'oxyde ou de carbone peut augmenter la fonction de travail de 0,1 à 0,2 eV et réduire l'efficacité de 10 %. Le nettoyage chimique (acide fluorhydrique + acide nitrique) et le polissage électrochimique (Ra < 0,05 microns) assurent une surface pure et optimisent l'uniformité des émissions.

Dans les applications pratiques, l'efficacité d'émission est mesurée par un banc d'essai sous vide équipé d'un collecteur d'électrons et d'un picoampèremètre d'une précision de ±0,1 μA/cm². Les filaments dopés et enrobés peuvent fournir une luminosité de 10⁷ A/cm²· sr en MEB haute résolution, répondant aux besoins de l'imagerie sub-nanométrique.

4.2.2 Plage de température de fonctionnement du filament de tungstène

Les filaments de tungstène sont de 2000 à 2800 °C, selon le scénario d'application. Les appareils de faible puissance (tels que les tubes cathodiques) utilisent 2000-2200°C et un courant d'émission de 0,1-1 mA ; Les appareils à haute luminosité (tels que les microscopes électroniques à transmission) utilisent 2600-2800 °C et un courant d'émission de 5-10 mA. Le choix de la température doit équilibrer l'efficacité des émissions et la durée de vie. Pour chaque augmentation de 100 °C de la température, la densité du courant d'émission augmente d'environ 2 fois, mais le taux d'évaporation augmente de 3 à 4 fois et la durée de vie est raccourcie de 30 à 50 %.

Le contrôle de la température est réalisé par une alimentation à courant constant ou à tension constante, avec une puissance de chauffage typique de 50 à 200 W. Un thermomètre infrarouge (précision ±5°C) ou un thermocouple surveille la température du filament en temps réel pour éviter une surchauffe locale. La conception géométrique du filament (telle que la double hélice) augmente la surface de dissipation thermique, réduit les gradients de température et réduit le stress thermique. Par exemple, l'uniformité de la température d'un filament à double hélice est supérieure de 20 % à celle d'une simple hélice, et les points chauds locaux sont réduits de 50 %.

Dans des conditions extrêmes (telles que les dispositifs de fusion nucléaire), le filament peut brièvement atteindre plus de 3000°C, moment auquel un dopage spécial (comme le rhénium) ou un revêtement (tel que l'oxyde de zirconium) est nécessaire pour maintenir les performances. Des tests ont montré que les filaments dopés au rhénium peuvent fonctionner à 2900°C pendant 100 heures avec une perte de masse inférieure à 10 %.

4.2.3 Résistance à la dilatation thermique et à la fatigue thermique du filament de tungstène

Le coefficient de dilatation thermique du tungstène est de $4,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (20-1000°C), ce qui est relativement faible parmi les métaux, ce qui indique qu'il a peu de déformation à haute température. À 2500°C, le coefficient de dilatation thermique augmente légèrement à $5,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, tout en conservant une excellente stabilité dimensionnelle. La faible dilatation thermique réduit les contraintes mécaniques du filament pendant les cycles chauds et froids, ce qui est particulièrement adapté au démarrage et à l'arrêt fréquents des canons à électrons. Par exemple, la longueur du filament ne change que de 1,1 % lorsqu'il passe de 20 °C à 2500 °C, et l'effet sur la géométrie de la spirale est négligeable.

Les performances de fatigue thermique reflètent la durabilité du filament dans des cycles répétés de chauffage-refroidissement. Dans 1000 essais de cycle chaud-froid (20-2500°C, vitesse de chauffage 100°C/s), le taux d'incidence de fissure des filaments de tungstène dopés au potassium était inférieur à 1 %, ce qui est bien mieux que le tungstène pur (taux de fissuration 5 %). L'amélioration de la fatigue thermique est due aux facteurs suivants :

Optimisation de la structure des grains : Les grains fins (1-5 microns) dispersent les contraintes à travers les joints de grains et réduisent la propagation des fissures.

Renforcement du dopage : Les bulles de potassium et le dopage au rhénium augmentent la résistance des joints de grains et inhibent la formation de microfissures.

Traitement de surface : Le polissage et le revêtement réduisent la concentration des contraintes de surface et réduisent les points de départ de la fatigue.

Les essais de fatigue thermique utilisent un four à cycle haute température et un microscope électronique à balayage (MEB) pour analyser la morphologie des fissures, combinés à une simulation par éléments finis pour prédire la distribution des contraintes et optimiser la conception des filaments.

4.2.4 Stabilité de l'arc du filament de tungstène

La stabilité de l'arc fait référence à la capacité du filament à éviter les décharges anormales (telles que la rupture de l'arc) à haute tension (5-20 kV), qui est la clé de la qualité du faisceau du canon à électrons. Les arcs électriques peuvent être causés par des défauts de surface, un gaz résiduel ou une inhomogénéité du champ électrique, entraînant une gigue du faisceau d'électrons ou des dommages à l'équipement. La grande stabilité chimique et la finition de surface ($R_a < 0,05$ micron) du filament

de tungstène réduisent considérablement le risque d'arc électrique.

Le degré de vide est un facteur important dans la stabilité de l'arc. À 10^{-7} Pa, la pression partielle du gaz résiduel est extrêmement faible et la probabilité d'apparition d'un arc est inférieure à 0,01 %. À des degrés de vide plus faibles (tels que 10^{-5} Pa), la vapeur d'eau ou l'oxygène peuvent provoquer des micro-décharges. Les revêtements de surface (tels que l'oxyde de zirconium) réduisent le risque de décharge de 50 % en augmentant la rigidité diélectrique. La conception de la géométrie du filament affecte également la stabilité. Le filament à double hélice réduit le taux d'occurrence de l'arc de 30 % grâce à une distribution uniforme du champ électrique.

L'essai de stabilité de l'arc a été effectué dans une chambre à vide poussé, avec une tension de 10 à 20 kV appliquée et un courant de décharge surveillé ($<1 \mu\text{A}$ a été jugé acceptable). Les résultats des tests ont montré que le filament avec un traitement de surface optimisé pouvait fonctionner en continu pendant 1000 heures à 15 kV sans arc électrique, répondant ainsi aux exigences des canons à électrons de haute précision.

4.3 Relation entre la microstructure et les performances du filament de tungstène à faisceau d'électrons

La microstructure des filaments de tungstène, y compris la structure des grains, la distribution des éléments dopants et la morphologie de surface, affecte directement leurs propriétés mécaniques, électriques et d'émission.

4.3.1 Structure et orientation des grains

Les filaments de tungstène sont généralement de fins cristaux équiaxes d'une taille moyenne de 1 à 5 microns. Le processus d'étirage et de recuit forme une structure fibreuse le long de la direction axiale, l'orientation du grain étant principalement dans la direction $\langle 110 \rangle$, représentant 70 à 80 %. La structure fibreuse améliore la résistance à la traction en renforçant les joints de grains (augmentation de 15 à 20 %), tout en optimisant le chemin conducteur électronique et en réduisant la résistivité de 5 %. L'analyse de diffraction par rétrodiffusion d'électrons (EBSD) montre que les grains orientés $\langle 110 \rangle$ ont un taux de fluage plus faible à haute température et prolongent la durée de vie du filament de 30 %.

La taille des grains a un effet significatif sur les performances. Des grains trop gros (>10 microns) réduisent la résistance mécanique et augmentent la déformation à haute température ; Des grains trop petits (<1 micron) augmentent la densité des joints de grains et provoquent une fragilité. La taille idéale (2-4 microns) est contrôlée par le dopage et le recuit, par exemple, le dopage potassique forme de minuscules bulles, entravant la migration des joints de grains et maintenant des grains uniformes. Les observations MEB et microscopie électronique à transmission (MET) montrent que le filament à structure de grain optimisée a une résistance à la traction de 400 MPa et un allongement à la rupture de 8 % à 2500°C.

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

Ultra-High Heat Resistance: Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

Excellent Thermionic Emission Performance: Provides efficient electron emission under low power consumption

High-Purity Material: $W \geq 99.95\%$ reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

Long Service Life: Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

Precision Manufacturing: Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

Multiple Structure Options: Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés Tél. : 0086 592 512 9696

Numéro de version du document standard CTIAQCD -MA-E/P 2024 version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

www.ctia.com.cn

sales@chinatungsten.com

4.3.2 Effet des éléments dopants sur la microstructure

Les éléments dopants (tels que le potassium, l'aluminium, le rhénium) optimisent les performances du filament en modifiant la croissance des grains et la structure électronique de surface :

Potassium (K, 0,01-0,05 % en poids) : forme des bulles d'un diamètre de 0,1 à 0,5 μm pendant le frittage, qui sont réparties aux joints de grains, entravant la croissance des grains et maintenant la taille des grains de 2-3 μm . Les bulles de potassium augmentent également la résistance des joints de grains, réduisent les fissures à haute température et prolongent la durée de vie de 20 à 40 %.

Aluminium (Al, 0,005-0,02 % en poids) : favorise l'exposition du plan cristallin $\{100\}$, réduit la fonction de travail de 0,2 eV et augmente la densité du courant d'émission de 15 %. La distribution uniforme des atomes d'aluminium dans le réseau (vérifiée par TEM-EDS) optimise la conductivité électronique.

Rhénium (Re, 0,1-1 % en poids) : Améliore la plasticité du réseau, réduit la densité de dislocation et augmente la ductilité de 10 %. Le rhénium inhibe également la recristallisation à haute température et maintient la structure fibreuse.

La distribution des éléments dopants doit être uniforme pour éviter un enrichissement local conduisant à des performances inégales. L'analyse par spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS) montre que le dopage au tungstène réduit les défauts de joints de grain de 30 %, améliore la cohérence de l'orientation des grains de 20 % et améliore considérablement les propriétés mécaniques et d'émission.

4.3.3 Morphologie de surface et performances d'émission

La morphologie de surface, y compris la rugosité, l'exposition de la face cristalline et les défauts microscopiques, affecte directement l'uniformité et l'efficacité de l'émission d'électrons thermiques. La rugosité de surface idéale $R_a < 0,05$ micron est obtenue par polissage électrochimique, ce qui réduit la concentration locale du champ électrique et améliore la cohérence de l'émission de 10 %. L'analyse par microscopie à force atomique (AFM) montre que la hauteur de crête à vallée de la surface polie est < 10 nm, ce qui est beaucoup plus bas que celle de la surface non traitée (50-100 nm).

L'exposition du visage du cristal est essentielle aux performances en matière d'émissions. $\{100\}$ facettes sont plus favorables à l'échappement des électrons que les facettes $\{110\}$ (4,6 eV) en raison de leur fonction de travail plus faible (4,3 eV). Le dopage avec de l'aluminium et des revêtements de surface (tels que l'oxyde d'yttrium) augmente la proportion de facettes de $\{100\}$ de 20 % et améliore la densité du courant d'émission de 15 %. Les revêtements d'oxyde d'yttrium (épaisseur 0,1-1 micron) optimisent les états électroniques de surface en formant des structures cristallines à l'échelle nanométrique, réduisant encore la fonction de travail à 4,2 eV.

Les défauts de surface (tels que les rayures et les résidus d'oxyde) peuvent provoquer une surchauffe

locale ou une décharge d'arc, réduisant ainsi l'efficacité des émissions. Le nettoyage chimique et le traitement au plasma éliminent les défauts et la propreté de la surface atteint 99,9 %, assurant l'uniformité des émissions. Les tests réels montrent que l'écart de densité du courant d'émission du filament avec une morphologie de surface optimisée à 2600°C est inférieur à 1 %, répondant aux exigences des canons à électrons à haute résolution.

4.4 Durée de vie et fiabilité des filaments de tungstène du canon à électrons

La durée de vie et la fiabilité des filaments de tungstène sont des indicateurs clés qui déterminent leurs performances d'application dans des équipements de haute précision (tels que les microscopes électroniques à balayage, les tubes à rayons X et les équipements de lithographie par faisceau d'électrons). La durée de vie des filaments de tungstène est généralement comprise entre 500 et 2000 heures et est affectée par de nombreux facteurs, notamment les conditions de travail, les propriétés des matériaux, les processus de fabrication et les facteurs environnementaux. Cette section traite en détail des facteurs affectant la durée de vie du filament, des principaux modes de défaillance et de leurs méthodes d'analyse, ainsi que du processus standardisé de test de fiabilité pour fournir un support technique permettant d'optimiser la conception du filament et de prolonger sa durée de vie.

4.4.1 Facteurs affectant la durée de vie du filament

La durée de vie des filaments de tungstène est affectée par une combinaison de multiples facteurs internes et externes. Les principaux facteurs et leurs mécanismes d'action sont les suivants :

Température de fonctionnement

Fonction : Les filaments de tungstène fonctionnent généralement à 2500-2800 °C. Une température élevée accélère l'évaporation des atomes de tungstène, ce qui entraîne un amincissement du diamètre et une résistance accrue.

Détails techniques : À 2700°C, le taux d'évaporation est d'environ 0,01-0,05 mg/cm²·h, et le taux d'amincissement du diamètre est de 0,1-0,5 µm/h. Par exemple, dans un microscope électronique à balayage (MEB), après l'amincissement du diamètre du filament de 0,2 mm à 0,15 mm, la densité du courant d'émission diminue de 20 % et la durée de vie est réduite à 500 heures. Pour chaque augmentation de 100 °C de la température, le taux d'évaporation augmente d'environ 4 fois et la durée de vie diminue de 50 %.

Stratégie d'optimisation : Inhiber la croissance des grains par dopage avec du potassium (0,01-0,05 % en poids) et réduire le taux d'évaporation de 30 %. Les revêtements de surface (tels que l'oxyde de zirconium, épaisseur 0,5-1 micron) réduisent le taux d'évaporation de 50 % et prolongent la durée de vie à 1500 heures.

Environnement sous vide

Action : Les gaz résiduels (tels que l'oxygène et l'azote) déclenchent l'oxydation de surface ou la décharge de l'arc, accélérant ainsi la dégradation des filaments.

Détails techniques : Sous un vide de 10⁻⁵ Pa, une pression partielle d'oxygène > 0,01 Pa entraînera la formation de trioxyde de tungstène (WO₃, www.tungsten-oxide.com), augmentera la fonction de travail de 0,1 à 0,2 eV et réduira l'efficacité des émissions de 15 %. La décharge de l'arc (taux

d'occurrence de 0,01 %) peut provoquer la rupture du filament ou l'endommagement de l'électrode. Par exemple, dans les tubes à rayons X, lorsque le degré de vide est insuffisant à 10^{-7} Pa, la durée de vie du filament est réduite de 2000 heures à 1000 heures.

Stratégie d'optimisation : Utiliser un système de vide poussé (10^{-8} Pa) équipé d'une pompe turbomoléculaire (vitesse de pompage 500-2000 L/s) pour réduire le taux d'oxydation de 80 %. La cuisson à haute température (400°C, 24 heures) élimine les gaz résiduels et prolonge la durée de vie de 25 %.

Cycle thermique et stress thermique

Action : Le cycle chaud et froid du canon à électrons (20-2700°C, vitesse de chauffage 100°C/s) induit une contrainte thermique, entraînant des microfissures aux joints de grains.

Détails techniques : Après 1000 cycles thermiques, le taux de fissuration des filaments de tungstène pur a atteint 5 %, et la résistance à la traction a diminué de 10 % (de 800 MPa à 720 MPa). En microscopie électronique à transmission (MET), la contrainte thermique a provoqué un décalage du faisceau de 0,5 nm, affectant la résolution. Le dopage au rhénium (0,1-1 % en poids) a amélioré la ductilité et réduit le taux de fissuration à 1 %.

Stratégie d'optimisation : L'optimisation de la géométrie du filament (par exemple, double hélice, augmentation de la zone d'émission de 30 %) disperse les contraintes thermiques et réduit le taux de fissuration de 20 %. Le chauffage lent (50°C/s) réduit l'accumulation de contraintes et prolonge la durée de vie de 15 %.

Charge actuelle

Effet : Un courant d'émission élevé (par exemple, 10-100 mA) augmente la charge thermique du filament, accélérant l'évaporation et la fatigue mécanique.

Détails techniques : Dans le soudage par faisceau d'électrons (EBW), un courant de 100 mA provoque une augmentation locale de la température du filament de 50°C, augmente le taux d'évaporation d'un facteur 2 et réduit la durée de vie de 1000 heures à 600 heures. La fluctuation du courant >1 % entraîne une non-uniformité thermique, ce qui entraîne une augmentation de 10 % du taux de casse.

Stratégie d'optimisation : En utilisant une alimentation à courant constant (précision $\pm 0,1$ mA) pour contrôler la stabilité du courant, le taux de rupture est réduit de 50 %. Les filaments en spirale multi-segments réduisent la surchauffe locale grâce à l'émission segmentée et prolongent la durée de vie de 20 %.

Défauts de fabrication

Effet : Les défauts de surface (tels que les rayures, les inclusions, $R_a > 0,05$ microns) ou les pores internes provoquent une surchauffe et une casse locales.

Détails techniques : Les rayures de surface provoquent un écart de 5 % de la densité du courant et un écart de motif de >1 nm en EBL. Les pores internes (diamètre >1 micron) réduisent la résistance à la traction de 15 % et le taux de rupture atteint 2 %. Par exemple, la durée de vie des filaments MEB est réduite de 1500 heures à 800 heures en raison de l'accumulation d'oxyde de surface.

Stratégie d'optimisation : Le polissage électrochimique ($R_a < 0,05$ microns) élimine les défauts de

surface et améliore l'uniformité des émissions de 15 %. La tomographie à rayons X (résolution 0,1 microns) détecte les défauts internes et réduit le taux de rebut à 0,3 %.

Dopage et qualité du revêtement

Fonction : La non-uniformité des éléments de dopage et du revêtement affecte la stabilité thermique et l'efficacité des émissions.

Détails techniques : Le dopage au potassium (0,01-0,05 % en poids) avec un écart de >5 % entraîne une granulométrie inégale (2-10 microns) et une diminution de 10 % de la stabilité thermique. Un revêtement d'yttrium (épaisseur 0,1-1 micron) avec un taux de pelage de >1 % exposera le substrat de tungstène et augmentera le taux d'oxydation de 50 %. En TEM, les défauts de revêtement réduisent la luminosité de 20 % (de 10^7 à 8×10^6 A/cm²·sr).

Stratégie d'optimisation : la métallurgie des poudres garantit l'uniformité du dopage (écart <1 %), le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) contrôle l'écart d'épaisseur du revêtement <5 % et prolonge la durée de vie de 30 %.

4.4.2 Analyse des modes de défaillance (tels que l'évaporation, la rupture)

Les modes de défaillance des filaments de tungstène comprennent principalement l'évaporation, la rupture, la dégradation de surface et la décharge d'arc, chacun d'entre eux ayant un impact significatif sur la durée de vie et les performances. Voici une analyse détaillée :

Évaporation

Définition : Les atomes de tungstène s'échappent de la surface à des températures élevées, ce qui entraîne un amincissement du diamètre du filament et une dégradation des performances.

Mécanisme : À 2700°C, le taux d'évaporation est de 0,01-0,05 mg / cm²·h, le diamètre est aminci de 0,1 à 0,5 µm / h, la résistance augmente de 20 % et la densité du courant d'émission diminue de 30 %. Par exemple, en MEB, après l'évaporation du filament à un diamètre de <0,15 mm, la luminosité passe de 10^6 à 5×10^5 A/cm²·sr, et la qualité de l'image diminue.

Facteurs d'influence : température de travail (>2600°C), vide (> 10^{-7} Pa), rugosité de surface (Ra>0,05 microns).

Méthode d'analyse : Observer le changement de diamètre par microscopie électronique à balayage (MEB) (précision ±0,1 microns), et mesurer le taux d'évaporation par analyse thermogravimétrique (TGA, précision ±0,01 mg).

Mesures d'optimisation : Le dopage à l'aluminium (0,005-0,02 % en poids) réduit le taux d'évaporation de 30 % et le revêtement en oxyde de zirconium (épaisseur 0,5 micron) réduit le taux d'évaporation de 50 %. Le système de surveillance intelligent (mesure de la température infrarouge, précision ±2°C) ajuste la température en temps réel et prolonge la durée de vie de 20 %.

Fracture

Définition : Rupture fragile ou ductile du filament causée par une contrainte thermique ou une fatigue mécanique.

Mécanisme : Le cycle thermique (20-2700°C, 1000 fois) induit des microfissures (longueur 1-10 microns) aux joints de grains, et la résistance à la traction diminue de 15 %. Un courant élevé (>10

mA) provoque une surchauffe locale et augmente le taux de rupture de 10 %. Par exemple, dans l'EBW, la rupture du filament entraîne une interruption du soudage et des temps d'arrêt >4 heures.

Facteurs d'influence : taille des grains (>5 microns), contrainte thermique (>100 MPa), défauts de surface (profondeur de rayure >1 micron).

Méthodes d'analyse : Analyse de rupture (MEB, grossissement 1000 fois) pour déterminer la cause des fissures (limite ou surface de grain), diffraction par rétrodiffusion d'électrons (EBSD) pour analyser l'orientation des grains (<110> représente 80 %).

Mesures d'optimisation : le dopage au rhénium (0,1-1 % en poids) améliore la ductilité de 20 %, la conception en double hélice disperse les contraintes et le taux de fracture est réduit de 30 %. Le chauffage lent (50°C/s) réduit les chocs thermiques et prolonge la durée de vie de 15 %.

Dégradation de surface

Définition : Dégradation des performances de surface causée par l'oxydation, l'accumulation de contaminants ou l'écaillage du revêtement.

Mécanisme : À 10^{-5} Pa, l'oxygène déclenche la formation de WO_3 (épaisseur 0,1-1 micron), la fonction de travail augmente de 0,2 eV et l'efficacité d'émission diminue de 15 %. Le pelage du revêtement (>1 %) expose le substrat de tungstène et augmente le taux d'oxydation de 50 %. Par exemple, dans les tubes à rayons X, la dégradation de la surface réduit la résolution de l'image à 0,8 mm.

Facteurs d'influence : degré de vide ($>10^{-7}$ Pa), qualité du revêtement (écart d'uniformité >5 %), gaz résiduel ($O_2 > 0,01$ Pa).

Méthode d'analyse : La spectroscopie photoélectronique à rayons X (XPS, précision $\pm 0,1$ at %) analyse la composition chimique de surface, et la microscopie à force atomique (AFM, précision ± 1 nm) mesure la rugosité ($R_a < 0,05$ micron).

Mesures d'optimisation : Le vide poussé (10^{-8} Pa) réduit le taux d'oxydation de 80 %, et le revêtement par dépôt de couche atomique (ALD) (épaisseur 10-50 nm) améliore l'adhérence et réduit le taux de pelage à 0,5 %.

Décharge d'arc

Définition : Décharge anormale causée par des gaz résiduels ou des défauts de surface, entraînant des dommages ou la rupture du filament.

Mécanisme : À 10^{-6} Pa, le taux d'occurrence de l'arc est de 0,01 % et la température locale augmente $>3000^\circ\text{C}$, provoquant une fusion ou une fracture. Par exemple, en TEM, l'arc électrique entraîne un décalage du faisceau de 1 nm et une chute de la résolution à 0,3 nm.

Facteurs d'influence : degré de vide ($>10^{-7}$ Pa), rugosité de surface ($R_a > 0,05$ microns), espacement des électrodes (écart $> 0,01$ mm).

Méthode d'analyse : l'oscilloscope haute fréquence (fréquence d'échantillonnage 1 GHz) enregistre la forme d'onde de l'arc, le spectromètre de masse (précision $\pm 0,01$ ppm) analyse le gaz résiduel.

Mesures d'optimisation : la conception précise de l'électrode (tolérance d'espacement $\pm 0,01$ mm) réduit le risque d'arc de 50 %, la cuisson à haute température (400°C , 24 heures) élimine les gaz et le taux d'incidence tombe à 0 élevé

Mesures d'optimisation : la conception précise de l'électrode (tolérance d'espacement $\pm 0,01$ mm) réduit le risque d'arc de 50 %, la cuisson à haute température (400 °C, 24 heures) élimine les gaz et le taux d'incidence tombe à 0,001 %.

4.4.3 Méthode d'essai de fiabilité

Le test de fiabilité évalue la durée de vie, les performances, la stabilité et le risque de défaillance des filaments de tungstène à l'aide de méthodes standardisées pour garantir leur fiabilité dans des applications pratiques. Les principales méthodes d'essai sont les suivantes :

Test de durée de vie accéléré

Définition : simuler un fonctionnement à long terme dans des conditions de température et de courant élevés pour prédire la durée de vie du filament.

Méthode : Fonctionner dans une chambre à vide à 2700°C, 10^{-7} Pa pendant 1000 heures, avec un courant d'émission de 10-100 mA et en enregistrant la décroissance de la densité de courant (cible < 5 %). Mesurez le diamètre (MEB, précision $\pm 0,1$ micron) et la résistance (méthode à quatre sondes, $\pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) toutes les 100 heures.

Scénario d'application : Dans les tests de filaments MEB, le test de durée de vie accéléré prédit une durée de vie de 1500 heures et un taux d'évaporation de 0,02 mg/cm²·h, ce qui répond à la norme GB/T 15065.

Détails techniques : Utilisez un picoammètre (précision $\pm 0,1 \mu\text{A}$) pour mesurer le courant et un thermomètre infrarouge ($\pm 5^\circ\text{C}$) pour surveiller la température. Ajustez les données à la distribution de Weibull et préisez le temps de défaillance (erreur < 5 %).

Optimisation : La plateforme de test automatisée (temps de réponse < 1 s) améliore l'efficacité de 50 % et la cohérence des lots > 99 %.

Test de cycle thermique

Définition : Simuler des cycles thermiques et froids (20-2700°C, 1000 fois) pour évaluer les contraintes thermiques et la stabilité mécanique.

Méthode : Vitesse de chauffage 100°C/s, refroidissement à 20°C, temps de cycle 10 minutes. Détection des fissures (MEB, grossissement 1000 fois) et de la résistance à la traction (machine d'essai universelle, $\pm 0,1$ MPa).

Scénario d'application : Dans les essais de filaments TEM, les essais de cycle thermique montrent que le taux de fissuration des filaments dopés au rhénium est de < 1 % et que la résistance à la traction reste à 400 MPa.

Détails techniques : L'EBS est utilisé pour analyser l'orientation des grains (< 110) représente 80 %), et l'analyse des ruptures détermine la cause des fissures (joint de grain ou surface). Le test est conforme à la norme ISO 11539.

Optimisation : Le chauffage lent (50°C/s) réduit le taux de fissuration de 20 %, et le système d'enregistrement automatique (précision $\pm 0,1$ %) améliore la fiabilité des données.

Essai de stabilité des émissions

Définition : Mesure les fluctuations de courant et la diminution de la luminosité pendant le

fonctionnement à long terme.

Méthode : Fonctionnement à 2600°C, 10^{-8} Pa pendant 500 heures, courant d'émission 1-10 μ A, fluctuations record (cible $<0,5\%$). Utilisez un picoampèremètre ($\pm 0,01 \mu$ A) et un luminomètre (10^5 - 10^8 A/cm²·sr).

Scénario d'application : Dans les tests de filament EBL, les tests de stabilité montrent une fluctuation de courant de 0,1 % et une baisse de luminosité de $<3\%$, répondant aux exigences de la fabrication de puces de nœud de 7 nm.

Détails techniques : Le courant est ajusté par un système de contrôle par rétroaction (temps de réponse <1 ms), et les données sont conformes à la distribution normale ($\sigma < 1\%$). Le test est conforme à la norme DIN EN 60695.

Optimisation : L'algorithme d'IA (précision $>95\%$) prédit les tendances de fluctuation, ajuste les paramètres d'alimentation et améliore la stabilité de 10 %.

Test d'anti-oxydation

Définition : Évaluer la stabilité de surface du filament dans un environnement d'oxygène à l'état de traces.

Méthode : Mesurer l'épaisseur de la couche d'oxyde (XPS, $\pm 0,1$ nm) à 10^{-5} Pa, 2600°C pendant 1000 heures avec une pression partielle d'oxygène de 0,01 Pa.

Scénario d'application : Épaisseur de la couche d'oxyde de filament revêtue d'yttrium $<0,1$ micron et changement de fonction de travail $<0,1$ eV dans les tests de filament de tube à rayons X.

Détails techniques : observation MEB de la morphologie des oxydes (grains WO₃ <100 nm), mesure TGA de la perte de masse ($\pm 0,01$ mg). Les tests sont conformes à la norme ISO 6848.

Optimisation : Le vide poussé (10^{-8} Pa) réduit le taux d'oxydation de 80 %, le revêtement ALD (épaisseur 10 nm) améliore la résistance à l'oxydation de 50 %.

Analyse des modes de défaillance

Définition : Identifier les causes de défaillance et proposer des mesures d'amélioration par de multiples moyens techniques.

Méthode : Combinez SEM (analyse de rupture), XPS (chimie de surface), EBSD (structure des grains) et TGA (taux d'évaporation) pour analyser l'évaporation, la rupture, la dégradation de surface et la décharge d'arc.

Scénario d'application : Dans le test du filament EBW, l'analyse montre que 80 % des défaillances sont causées par l'oxydation de surface et que la durée de vie est prolongée de 40 % après l'amélioration du processus de revêtement.

Détails techniques : Les données sont intégrées dans le modèle AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, des Effets et des Aléas), et la priorité de risque (RPN) est de <100 . Le rapport d'analyse répond aux exigences de la norme ISO 9001.

Optimisation : L'apprentissage automatique (précision $>95\%$) prédit les modes de défaillance, optimise le dopage (rhénium 0,1 % en poids) et le revêtement (zircone 0,5 microns), et le taux de rebut est réduit à 0,2 %.

Les tests de fiabilité garantissent la stabilité des filaments dans des applications réelles. Les données

d'essai doivent être enregistrées pendant 5 ans conformément aux normes ISO 9001 et GB/T 9383. À l'avenir, il est nécessaire de développer une plate-forme de test intégrée multiparamètre (coût réduit à 50 % du niveau actuel) et d'améliorer l'efficacité de 30 %.

4.5 Fiche signalétique du filament de tungstène Electron Gun de CTIA GROUP LTD

La fiche de données de sécurité (FDS) fournit des informations standardisées sur l'utilisation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des filaments de tungstène de pistolet à électrons, conformément aux exigences GB/T 16483 et OSHA. Vous trouverez ci-dessous des détails pour garantir la conformité en matière de sécurité pendant la production, le transport et l'utilisation.

Partie I : Nom du produit

Nom anglais : Filament de tungstène à faisceau d'électrons

N° CAS : 7440-33-7

Partie II : Renseignements sur les ingrédients et la composition

Contenu en $\geq 99.95\%$

Teneur totale en impuretés $\leq 0.05\%$

Partie III : Aperçu des dangers

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

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

Partie IV : Premiers soins

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

Contact visuel : Soulevez les paupières et rincez à l'eau courante ou au sérum physiologique.

Consultez un médecin.

Inhalation : Laissez les lieux prendre l'air. Si la respiration est difficile, donnez de l'oxygène.

Consultez un médecin.

Ingestion : Buvez beaucoup d'eau tiède et faites vomir. Consultez un médecin.

Partie V : Mesures de lutte contre l'incendie

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

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

Poudre de cuir sec, sable et terre.

Partie VI : Traitement d'urgence en cas de fuite

Traitement d'urgence : Isolez la zone contaminée qui a fui et limitez l'entrée et la sortie. Coupez la source du feu. Il est recommandé que le personnel d'intervention d'urgence porte des masques anti-poussière (masques faciaux) et des vêtements antitoxiques. Évitez de soulever la poussière, balayez-le soigneusement, placez-le dans un sac et transférez-le dans un endroit sûr. S'il y a une grande quantité de fuites, couvrez-la d'une bâche en plastique ou d'une toile. Collectez-les et recyclez-les.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés Tél. : 0086 592 512 9696

Numéro de version du document standard CTIAQCD -MA-E/P 2024 version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

www.ctia.com.cn

sales@chinatungsten.com

ou transportez-les vers un site de traitement des déchets pour élimination.

Partie VII : Exploitation, élimination et entreposage

Précautions d'utilisation : Les opérateurs doivent suivre une formation spéciale et respecter strictement les procédures d'utilisation. Il est recommandé aux opérateurs de porter des masques anti-poussière à filtre auto-amorçant, des lunettes de protection chimique, des vêtements de travail anti-pénétration toxiques et des gants en caoutchouc. Restez à l'écart du feu et des sources de chaleur, et il est strictement interdit de fumer sur le lieu de travail. Utilisez des systèmes et des équipements de ventilation antidéflagrants. Évitez de générer de la poussière. Évitez tout contact avec des oxydants et des halogènes. Chargez et déchargez en douceur pendant le transport pour éviter d'endommager l'emballage et les contenants. Équipez-vous des types et des quantités correspondants d'équipement de lutte contre l'incendie et d'équipement de traitement d'urgence en cas de fuite. Les contenants vides peuvent contenir des substances nocives résiduelles.

Précautions de stockage : Stocker dans un entrepôt frais et ventilé. Tenir à l'écart du feu et des sources de chaleur. Il doit être stocké séparément des oxydants et des halogènes, et ne doit pas être mélangé. Équipez-vous des types et des quantités correspondants d'équipement de lutte contre l'incendie. La zone de stockage doit être équipée de matériaux appropriés pour contenir les fuites.

Partie VIII : Contrôle des contacts et protection personnelle

CMA Chine (mg/m³) : 6

CMA de l'ex-Union soviétique (mg/m³) : 6

TLVTN : ACGIH 1 mg/m³

TLVWN : ACGIH 3 mg/m³

Méthode de surveillance : Spectrophotométrie thiocyanate-chlorure de titane de potassium

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

Protection de l'appareil respiratoire : Lorsque la concentration de poussières dans l'air dépasse la norme, un masque anti-poussière à filtre auto-amorçant doit être porté. Lors du sauvetage et de l'évacuation en cas d'urgence, un respirateur à air doit être porté.

Protection oculaire : Portez des lunettes de sécurité chimique.

Protection corporelle : Portez des vêtements de travail qui empêchent la pénétration toxique.

Protection des mains : Portez des gants en caoutchouc.

Partie IX : Propriétés physiques et chimiques

Ingrédients principaux : Pur

Apparence et propriétés : Solide, blanc brillant métallique

Point de fusion (°C) : N/A

Boiling Point (°C): N/A

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

Densité de vapeur (air = 1) : aucune donnée

Pression de vapeur saturée (kPa) : Aucune donnée

Chaleur de combustion (kJ/mol) : Aucune donnée

Température critique (°C) : Aucune donnée

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés Tél. : 0086 592 512 9696

Numéro de version du document standard CTIAQCD -MA-E/P 2024 version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V

www.ctia.com.cn

sales@chinatungsten.com

Pression critique (MPa) : Aucune donnée
Logarithme du coefficient de partage de l'eau : aucune donnée
Point d'éclair (°C) : Aucune donnée
Température d'inflammation (°C) : Aucune donnée
Limite supérieure d'explosion % (V/V) : Aucune donnée
Limite inférieure d'explosion % (V/V) : Aucune donnée
Solubilité : Soluble dans l'acide nitrique et l'acide fluorhydrique

Partie X : Stabilité et réactivité
Incompatibilité interdite : acides et bases forts

Partie XI :
Toxicité aiguë : Aucune donnée
CL50 : Aucune donnée

Partie XII : Renseignements écologiques
Aucune donnée pour cette partie

Partie XIII : Élimination des déchets
Propriétés des déchets Méthodes d'élimination des déchets : Reportez-vous aux réglementations nationales et locales pertinentes avant l'élimination. Recyclez si possible.

Partie XIV : Renseignements sur le transport
Catégorie d'emballage : Z01
Précautions de transport : L'emballage doit être complet et le chargement doit être sécurisé au moment de l'expédition. Pendant le transport, assurez-vous que le contenant ne fuit pas, ne s'effondre pas, ne tombe pas et ne s'endommage pas. Il est strictement interdit de mélanger et de transporter avec des oxydants, des halogènes, des produits chimiques comestibles, etc. Pendant le transport, il doit être protégé de l'exposition au soleil, à la pluie et aux températures élevées. Le véhicule doit être soigneusement nettoyé après le transport.

Partie XV : Renseignements sur le fournisseur
Fournisseur : CTIA GROUP LTD
Tél. : 0592-5129696/5129595



CTIA GROUP LTD Filament de tungstène à faisceau d'électrons

Chapitre 5 But et application du filament de tungstène dans le canon à électrons

Les filaments de tungstène dans les canons à électrons sont largement utilisés dans la recherche scientifique, la fabrication industrielle, les équipements médicaux et les technologies émergentes. Leur point de fusion élevé, leur faible pression de vapeur et leur efficacité d'émission élevée en font les composants essentiels des canons à électrons, conduisant à une variété d'applications allant de l'imagerie à l'échelle nanométrique au traitement de haute précision. Ce chapitre traite en détail des utilisations spécifiques des filaments de tungstène dans les canons à électrons, les dispositifs électroniques à vide, les applications de recherche industrielle et scientifique et les domaines émergents, et analyse leurs exigences de performance, leurs défis techniques et leurs orientations d'optimisation.

5.1 Application dans le canon à électrons

Les canons à électrons utilisent des filaments de tungstène pour générer des faisceaux d'électrons à haute énergie et sont largement utilisés dans les microscopes, les équipements de traitement et la fabrication de semi-conducteurs. Cette section explore le rôle clé des filaments de tungstène dans la microscopie électronique à balayage (MEB), la microscopie électronique à transmission (MET), le soudage et la découpe par faisceau d'électrons et la lithographie par faisceau d'électrons.

5.1.1 Microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB) utilise un faisceau d'électrons généré par un filament de tungstène pour balayer la surface d'un échantillon, et forme une image à haute résolution en détectant les électrons secondaires, les électrons rétrodiffusés ou les rayons X caractéristiques. Il est largement utilisé dans la science des matériaux, la biologie et l'analyse des semi-conducteurs. La

résolution du MEB est généralement de 1 à 5 nm et la profondeur de champ est grande, ce qui convient à l'observation de structures tridimensionnelles complexes.

Le filament de tungstène dans le MEB doit fournir une luminosité élevée et un faisceau d'électrons stable. Les conditions de travail typiques comprennent :

Courant d'émission : 1-10 μA , la fluctuation doit être maintenue inférieure à 1 % pour assurer la stabilité de l'imagerie.

Luminosité : 10^5 - 10^6 A/cm²· SR , affecte la résolution et la force du signal.

Température de fonctionnement : 2500-2700 °C, équilibrant l'efficacité des émissions et la durée de vie.

Degré de vide : 10^{-7} Pa, pour éviter l'oxydation et la décharge d'arc.

Les filaments de tungstène affectent directement la résolution et la qualité d'image du MEB. Par exemple, en mode haute résolution, le filament doit fournir un faisceau d'électrons avec une largeur de faisceau étroite (<5 nm), et le dopage au potassium (0,01-0,05 % en poids) peut améliorer l'uniformité de l'émission de 15 % en optimisant la structure du grain. Les revêtements de surface (tels que l'oxyde d'yttrium, épaisseur de 0,1 à 1 micron) réduisent la fonction de travail (de 4,5 eV à 4,2 eV) et augmentent la luminosité de 20 %, ce qui convient à l'observation de caractéristiques à l'échelle nanométrique, telles que les défauts dans les plaquettes de semi-conducteurs ou les ultrastructures d'échantillons biologiques.

La durée de vie du filament est un facteur clé dans les coûts d'exploitation du MEB. La durée de vie standard du filament de tungstène est de 500 à 2000 heures et peut être prolongée à 3000 heures en optimisant le dopage et le revêtement. Par exemple, les filaments à double hélice augmentent la zone d'émission pour réduire la surchauffe locale et augmenter la durée de vie de 30 %. Dans les applications pratiques, le cycle de remplacement du filament affecte les temps d'arrêt de l'équipement, et le système d'alignement automatisé du filament (précision ± 1 micron) peut réduire le temps de maintenance de 50 %.

Les défis techniques comprennent :

Stabilité de l'émission : les fluctuations de courant (>1 %) provoquent un bruit d'image, nécessitant une alimentation à courant constant (précision $\pm 0,1$ mA) et un environnement de vide poussé.

Durée de vie et coût : Le remplacement fréquent des filaments augmente les coûts d'exploitation, et des filaments à longue durée de vie doivent être développés (objectif de 5 000 heures).

Miniaturisation : Le MEB portable nécessite que le diamètre du filament soit réduit à 0,05-0,1 mm tout en maintenant une luminosité élevée.

Les stratégies d'optimisation comprennent l'utilisation d'un traitement de surface à l'échelle nanométrique (tel que le polissage au plasma, $R_a < 0,02$ micron) et de systèmes de surveillance intelligents (détection en temps réel du courant et de la température) pour réduire le taux de rebut à moins de 0,5 % et améliorer la qualité de l'image de 10 %.

5.1.2 Microscopie électronique à transmission (MET)

La microscopie électronique à transmission (MET) utilise des faisceaux d'électrons de haute énergie pour pénétrer des échantillons minces et générer des images de résolution atomique (0,1-0,2 nm). Il est largement utilisé dans l'analyse de la structure cristalline, la caractérisation des nanomatériaux et l'imagerie biomoléculaire. Les filaments de tungstène ont des exigences de performance plus élevées pour les filaments de tungstène que les MEB, ce qui nécessite une luminosité plus élevée et une largeur de faisceau plus étroite.

Les filaments de tungstène dans le TEM comprennent :

Courant d'émission : 10-50 μA , avec une fluctuation inférieure à 0,5 % nécessaire pour assurer une résolution au niveau atomique.

Luminosité : 10^7 - 10^8 A/cm²·SR, une efficacité d'émission élevée est nécessaire pour prendre en charge l'imagerie à haute résolution.

Température de fonctionnement : 2600-2800 °C, une stabilité thermique élevée est nécessaire pour maintenir un fonctionnement à long terme.

Degré de vide : 10^{-8} Pa, pour éviter la diffusion du faisceau d'électrons et l'oxydation du filament. Les filaments de tungstène sont la clé de la résolution TEM. Par exemple, dans le cadre d'un TEM à haute résolution (HRTEM), le filament doit fournir un faisceau d'électrons d'une largeur de faisceau de $<0,5$ nm. Le dopage avec de l'aluminium (0,005-0,02 % en poids) et un revêtement en oxyde d'yttrium augmente la luminosité de 30 % et réduit la fonction de travail à 4,2 eV, répondant ainsi aux exigences de l'imagerie sous-angström. Les filaments à double hélice ou coniques améliorent la focalisation du faisceau en optimisant la distribution du champ électrique et réduisent l'écart de largeur du faisceau de 20 %.

La durée de vie du filament est particulièrement importante pour les MET en raison du coût élevé de remplacement (y compris l'entretien du système de vide). Les filaments optimisés ont une durée de vie de 800 à 1500 heures à 2600°C, et les filaments dopés au rhénium (0,1-1 % en poids) peuvent atteindre 2000 heures, réduisant la rupture mécanique en augmentant la ductilité. Le polissage de surface ($R_a < 0,05$ microns) et l'environnement à vide poussé (10^{-8} Pa) réduisent le taux d'évaporation de 50 % et prolongent la durée de vie de 25 %.

Les défis techniques comprennent :

Exigence de luminosité élevée : le TEM nécessite $10^8 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{SR}$, qui est difficile à rencontrer avec des filaments de tungstène purs. De nouveaux revêtements ou matériaux composites sont nécessaires.

Dérive thermique : Les fluctuations de température du filament ($>5^\circ\text{C}$) provoquent une dérive du faisceau et nécessitent un contrôle précis de la température ($\pm 2^\circ\text{C}$).

Longue durée de vie : Une température de fonctionnement élevée accélère l'évaporation et des revêtements résistants aux hautes températures (tels que l'oxyde de zirconium) doivent être développés.

Les stratégies d'optimisation comprennent l'utilisation de filaments de tungstène nanostructurés (granulométrie $<100 \text{ nm}$) pour améliorer l'efficacité des émissions de 20 %, et l'intégration d'un système de surveillance par IA pour prédire la durée de vie du filament et réduire les défaillances inattendues de 50 %.

5.1.3 Soudage et découpe par faisceau d'électrons

Le soudage par faisceau d'électrons (EBW) et la découpe utilisent un faisceau d'électrons à haute énergie (10-100 kW) généré par un filament de tungstène pour fondre ou vaporiser des matériaux pour un traitement de haute précision. Il est largement utilisé dans l'aérospatiale, la construction automobile et les industries nucléaires. EBW peut former des soudures profondes (rapport profondeur/largeur $>20:1$) et a une précision de coupe de $\pm 0,01 \text{ mm}$.

Le filament de tungstène dans EBW et la découpe comprennent :

Courant d'émission : 10-100 mA, courant élevé prend en charge une puissance de sortie élevée.

Tension d'accélération : 50-150 kV, générant un faisceau d'électrons de haute énergie.

Température de fonctionnement : 2600-2800 $^\circ\text{C}$, doit résister à des charges thermiques élevées.

Degré de vide : 10^{-5} Pa , un léger gaz résiduel est autorisé.

Le filament doit fournir un faisceau d'électrons stable et de haute puissance. Par exemple, dans EBW, le filament génère un faisceau d'électrons de 60 kW, et lors du soudage d'un alliage de titane (50 mm d'épaisseur), la largeur de la soudure est de $<1 \text{ mm}$ et la zone affectée par la chaleur est de $<0,5 \text{ mm}$. Les filaments dopés au potassium améliorent la stabilité thermique en inhibant la croissance des grains et ont une durée de vie de 1000 heures. Les revêtements de surface (tels que l'oxyde de zirconium) réduisent la fonction de travail et augmentent la densité du courant d'émission de 20 %, ce qui permet une puissance de sortie élevée.

Dans les applications de coupe, le filament doit fournir un faisceau d'électrons d'une largeur de

faisceau étroite ($<0,1$ mm). Lors de la coupe de l'acier inoxydable (épaisseur 10 mm), la douceur de coupe Ra est de $<0,1$ micron. Le filament à double hélice augmente la zone d'émission pour améliorer la stabilité du faisceau, et la fluctuation du courant est de <1 %. L'environnement de vide poussé (10^{-5} Pa) réduit la diffusion du faisceau et garantit la précision du traitement.

Les défis techniques comprennent :

Grande stabilité de puissance : les fluctuations de courant (>2 %) entraînent des soudures inégales, nécessitant une alimentation électrique à courant constant (précision $\pm 0,5$ mA).

Durée de vie du filament : Un courant élevé accélère l'évaporation, nécessitant un filament à longue durée de vie (objectif 2000 heures).

Gaz résiduel : L'oxygène à 10^{-5} Pa peut provoquer une oxydation et nécessiter un revêtement de protection de surface.

Les stratégies d'optimisation comprennent l'utilisation de filaments composites de tungstène (tels que l'oxyde de tungstène-yttrium) pour augmenter l'efficacité des émissions de 30 % et un système de surveillance du courant de faisceau en temps réel (précision $\pm 0,1$ μ A) pour assurer l'uniformité du traitement.

5.1.4 Lithographie par faisceau d'électrons

La lithographie par faisceau d'électrons (LBE) utilise un faisceau d'électrons généré par un filament de tungstène pour écrire directement des motifs à l'échelle nanométrique afin de fabriquer des dispositifs semi-conducteurs, des masques et des nanostructures. La résolution peut atteindre <10 nm et il est largement utilisé dans la recherche et le développement de puces et la fabrication de dispositifs quantiques.

Les filaments de tungstène de l'EBL comprennent :

Courant d'émission : 1-10 nA, stabilité extrêmement élevée requise (fluctuation $<0,1$ %).

Luminosité : 10^7 - 10^8 A/cm²·sr, prend en charge la mise au point à l'échelle nanométrique.

Température de fonctionnement : 2500-2700°C, émission et durée de vie équilibrées.

Degré de vide : 10^{-8} Pa, pour éviter la diffusion du faisceau.

La constance de l'émission du filament est la clé de l'EBL. Par exemple, lors de la fabrication de puces de nœud de 7 nm, le filament doit fournir un faisceau d'électrons d'une largeur de faisceau de <5 nm. Le dopage avec des revêtements d'aluminium et d'oxyde d'yttrium augmentera la luminosité de 25 %, assurant une précision de motif de ± 1 nm. Le filament à double hélice améliore la stabilité

du faisceau en optimisant la distribution du champ électrique, et l'écart de courant est de $<0,05\%$. La durée de vie du filament doit être supérieure à 500 heures. En raison du coût de maintenance élevé des équipements EBL, les filaments dopés au rhénium peuvent atteindre 1 000 heures et le taux d'évaporation est réduit de 40 %.

Les défis techniques comprennent :

Ultra-haute stabilité : les fluctuations de courant ($>0,1\%$) provoquent une distorsion du motif, nécessitant une alimentation ultra-précise (précision $\pm 0,01\text{ nA}$).

Longue durée de vie : La demande d'une luminosité élevée accélère la perte de filaments et nécessite de nouveaux matériaux (tels que le tungstène nanostructuré).

Focalisation du faisceau : Les modèles à l'échelle nanométrique nécessitent des largeurs de faisceau inférieures au nanomètre, ce qui nécessite une géométrie de filament et une conception d'électrode optimisées.

Les stratégies d'optimisation comprennent l'utilisation de revêtements d'émission assistés par le terrain (tels que la thorie) pour augmenter la luminosité de 30 %, et un système intégré de retour de faisceau (temps de réponse $<1\text{ ms}$) pour assurer l'étalonnage en temps réel.

5.2 Appareils électroniques sous vide

Les dispositifs à électrons-du-vide utilisent des filaments de tungstène pour générer des courants d'électrons, pilotant les technologies de micro-ondes, de rayons X et d'affichage. Cette section traite de leurs applications dans les tubes à micro-ondes, les tubes à rayons X et les tubes cathodiques.

5.2.1 Tubes à micro-ondes (tels que les magnétrons et les tubes à ondes progressives)

Les tubes à micro-ondes utilisent des filaments de tungstène pour générer un flux d'électrons, qui génère des ondes électromagnétiques à haute fréquence sous l'action de champs magnétiques ou électriques. Ils sont largement utilisés dans les communications radar, par satellite et le chauffage par micro-ondes. Les magnétrons sont utilisés dans les fours à micro-ondes et les radars militaires, et les tubes à ondes progressives (TWT) sont utilisés dans les communications à haute fréquence.

Le filament de tungstène dans le tube à micro-ondes comprend :

Courant d'émission : 1-10 mA, stabilité $<1\%$ nécessaire pour garantir la qualité du signal.

Température de fonctionnement : 2400-2600°C, émission et durée de vie équilibrées.

Degré de vide : 10^{-6} Pa , pour éviter l'arc et l'oxydation.

Puissance de sortie : Magnétron 1-10 kW, TWT 10-100 W.

Dans un magnétron, le filament fournit 5 mA de courant d'électrons, générant des micro-ondes de 2,45 GHz d'une puissance de 1 kW. Les filaments dopés au potassium prolongent leur durée de vie à 5 000 heures en améliorant la stabilité thermique, ce qui les rend adaptés aux fours à micro-ondes domestiques. Les tubes à ondes progressives nécessitent une plus grande stabilité, avec des fluctuations de courant de filament de $<0,5\%$. Le dopage avec des revêtements d'aluminium et d'oxyde d'yttrium augmente l'efficacité des émissions de 20 %, prenant en charge les signaux haute fréquence de 10 GHz.

Les défis techniques comprennent :

Grande stabilité : les fluctuations de courant ($>1\%$) provoquent une distorsion du signal et nécessitent une alimentation de précision (précision $\pm 0,1$ mA).

Longue durée de vie : la puissance de sortie élevée accélère l'évaporation et nécessite un revêtement résistant aux hautes températures.

Miniaturisation : Le TWT par satellite nécessite un diamètre de filament $< 0,1$ mm pour maintenir une émission élevée.

Les stratégies d'optimisation comprennent l'utilisation de filaments de grains à l'échelle nanométrique (grains < 100 nm) pour augmenter l'efficacité des émissions de 15 %, et la technologie d'emballage sous vide (10^{-7} Pa) pour prolonger la durée de vie de 30 %.

5.2.2 Tube à rayons X

Les tubes à rayons X utilisent des filaments de tungstène pour générer des faisceaux d'électrons, qui bombardent des cibles métalliques (telles que le tungstène ou le molybdène) pour produire des rayons X. Ils sont largement utilisés dans l'imagerie médicale (scanner, appareils à rayons X) et le contrôle non destructif industriel.

Les filaments de tungstène dans le tube à rayons X comprennent :

Courant d'émission : 1-10 mA, prend en charge les rayons X de haute intensité.

Tension d'accélération : 30-150 kV, détermine l'énergie des rayons X.

Température de fonctionnement : 2500-2700 °C, stabilité thermique élevée requise.

Degré de vide : 10^{-7} Pa, pour éviter l'oxydation et l'arc électrique.

Le filament doit fournir une efficacité d'émission élevée et une longue durée de vie. Par exemple, en tomographie, le filament génère un courant d'électrons de 5 mA, produit des rayons X de 120 kV et a une résolution d'imagerie de $<0,5$ mm. Les filaments dopés au potassium ont une durée de vie de 1000 à 3000 heures, et les revêtements de surface (tels que l'oxyde de zirconium)

augmentent la densité du courant d'émission de 20 %, ce qui permet une imagerie à haut débit. Les filaments à double hélice réduisent la surchauffe locale en augmentant la zone d'émission et prolongent la durée de vie de 25 %.

Les défis techniques comprennent :

Exigences d'intensité élevée : Les rayons X à haute dose nécessitent un courant élevé (>10 mA), ce qui accélère la perte de filament.

Gestion thermique : La distance entre le filament et la cible est faible (<10 mm) et une dissipation efficace de la chaleur est requise.

Coût à vie : Le remplacement fréquent du filament augmente les coûts de maintenance des équipements médicaux.

Les stratégies d'optimisation comprennent l'utilisation d'un filament composite de tungstène (par exemple, l'oxyde de tungstène-yttrium) pour augmenter l'efficacité des émissions de 30 % et un système de refroidissement intégré (refroidissement par eau, débit de 0,5 L/min) pour réduire la température du filament de 50 °C.

5.2.3 Tube cathodique (CRT)

Les tubes cathodiques (CRT) utilisent des filaments de tungstène pour générer des faisceaux d'électrons qui bombardent un écran fluorescent pour produire des images. Ils sont utilisés dans les écrans traditionnels, la surveillance industrielle et les instruments aéronautiques. Bien que les écrans LCD et OLED remplacent progressivement les CRT, ils sont toujours utilisés dans des domaines spécifiques (tels que les écrans haute fiabilité).

Les filaments de tungstène en tube cathodique comprennent :

Courant d'émission : 0,1-1 mA, le courant faible prend en charge la fonction d'affichage.

Température de fonctionnement : 2000-2200 °C, la basse température prolonge la durée de vie.

Degré de vide : 10^{-6} Pa, pour éviter la contamination de l'écran fluorescent.

Tension d'accélération : 10-30 kV, produit des images lumineuses.

Le filament doit fournir un flux d'électrons stable et de faible puissance. Par exemple, dans les écrans d'aviation, le filament génère un flux d'électrons de 0,5 mA, produit des images à contraste élevé et a une durée de vie de 5 000 à 10 000 heures. Les filaments dopés au potassium augmentent l'efficacité des émissions de 15 % en réduisant la fonction de travail. Les filaments à simple hélice ont une structure simple et un faible coût, ce qui les rend adaptés à la production à grande échelle.

Les défis techniques comprennent :

Longue durée de vie : le tube cathodique doit avoir une durée de vie ultra-longue (>10 000 heures), et l'évaporation à haute température est le goulot d'étranglement.

Faible consommation d'énergie : L'écran nécessite une faible puissance de chauffage (<50 W) et une géométrie de filament optimisée.

Adaptabilité à l'environnement : Les tubes cathodiques de l'aviation doivent résister aux vibrations (10-100 Hz) et aux changements de température (-40 à 70 °C).

Les stratégies d'optimisation comprennent l'utilisation de revêtements à faible fonction de travail (tels que l'oxyde de thorium) pour réduire la température de fonctionnement de 100 °C, et une conception antivibratoire (précision de fixation du filament de ± 1 micron) pour améliorer la fiabilité de 20 %.

5.3 Autres applications de la recherche industrielle et scientifique

Les filaments de tungstène ont d'importantes applications dans le dépôt de couches minces, les sources d'ions, les spectromètres de masse et les dispositifs expérimentaux de fusion nucléaire, soutenant la production industrielle et la recherche scientifique de pointe.

5.3.1 Dépôt de couches minces (comme le dépôt physique en phase vapeur)

Le dépôt physique en phase vapeur (PVD) utilise un filament de tungstène pour générer un faisceau d'électrons afin de s'évaporer ou de pulvériser des matériaux pour déposer des films minces (0,1 à 10 microns d'épaisseur) pour des applications dans les revêtements optiques, la fabrication de semi-conducteurs et les revêtements résistants à l'usure.

Les filaments de tungstène en PVD comprennent :

Courant d'émission : 1-10 mA, favorise l'évaporation du matériau.

Température de fonctionnement : 2500-2700 °C, stabilité thermique élevée requise.

Degré de vide : 10^{-6} Pa, pour éviter la contamination du film.

Puissance de sortie : 1-10 kW, entraînant la source d'évaporation.

Le filament doit fournir un faisceau d'électrons stable à haute énergie. Par exemple, dans les revêtements optiques, le filament génère un courant d'électrons de 5 mA, évapore le dioxyde de silicium (SiO_2), et dépose un film antireflet d'une épaisseur de 0,5 micron et d'une uniformité de ± 1 %. Les filaments dopés à l'aluminium augmentent l'efficacité des émissions de 20 %, et les filaments à double hélice réduisent les fluctuations de courant à < 1 %, garantissant la qualité du film.

Les défis techniques comprennent :

Uniformité des couches minces : le courant de faisceau inégal entraîne une déviation de l'épaisseur et la géométrie du filament doit être optimisée.

Longue durée de vie : une puissance élevée accélère l'évaporation et nécessite un revêtement résistant aux hautes températures.

Compatibilité des matériaux : Différents matériaux d'évaporation nécessitent un ajustement des paramètres du faisceau.

La stratégie d'optimisation comprend l'utilisation d'un filament en spirale multi-segments pour améliorer l'uniformité du faisceau de 15 % et d'un système de contrôle du faisceau en temps réel (précision $\pm 0,1 \mu\text{A}$) pour assurer la cohérence du dépôt.

5.3.2 Source d'ions et spectromètre de masse

La source d'ions utilise un filament de tungstène pour générer un flux d'électrons, ionisant des molécules de gaz pour former un faisceau d'ions, qui est utilisé dans la spectrométrie de masse, l'implantation d'ions et l'analyse de surface. Les spectromètres de masse sont utilisés pour l'analyse chimique avec une résolution de 10^{-6} Da.

Les filaments de tungstène dans la source d'ions comprennent :

Courant d'émission : 0,1-1 mA, grande stabilité requise (fluctuation $< 0,1 \%$).

Température de fonctionnement : 2400-2600°C, émission et durée de vie équilibrées.

Degré de vide : 10^{-7} Pa, pour éviter la diffusion du faisceau d'ions.

Efficacité d'ionisation : $> 10 \%$, prise en charge d'une analyse à haute sensibilité.

Le filament doit fournir un flux d'électrons stable et de faible puissance. Par exemple, dans un spectromètre de masse, le filament génère un flux d'électrons de 0,5 mA, ionisant l'hélium et produisant un signal ionique de 10^6 cps. Le filament dopé au potassium a une durée de vie de 2000 heures, et le polissage de surface ($R_a < 0,05$ microns) réduit les fluctuations de courant de 50 %, améliorant ainsi la précision analytique.

Les défis techniques comprennent :

Stabilité ultra-élevée : les fluctuations de courant ($> 0,1 \%$) réduisent la résolution et nécessitent une alimentation de précision.

Longue durée de vie : Le remplacement fréquent des filaments affecte l'efficacité de l'analyse.

Miniaturisation : Les spectromètres de masse portables nécessitent de petits filaments (diamètre < 0,1 mm).

Les stratégies d'optimisation comprennent l'utilisation de revêtements d'assistance aux émissions de champ pour augmenter l'efficacité des émissions de 20 %, et un système intégré de retour d'information sur le courant (temps de réponse < 1 ms) pour assurer la stabilité.

5.3.3 Dispositif expérimental de fusion nucléaire

Les dispositifs expérimentaux de fusion nucléaire (tels que les tokamaks et la fusion par confinement inertiel) utilisent des filaments de tungstène pour générer un flux d'électrons à haute énergie, piloter du plasma ou des systèmes de diagnostic, et étudier le comportement du plasma à haute température.

Les filaments de tungstène dans les dispositifs de fusion nucléaire comprennent :

Courant d'émission : 10-100 mA, prend en charge le plasma de haute puissance.

Température de fonctionnement : 2700-3000°C, stabilité thermique extrêmement élevée requise.

Degré de vide : 10^{-8} Pa, pour éviter la contamination.

Résistance aux radiations : Résistant aux neutrons et aux rayons gamma.

Le filament doit résister à des conditions extrêmes. Par exemple, dans un tokamak, le filament génère 50 mA de courant électronique, pilote un plasma de 1 keV et fonctionne pendant 1000 heures. Les filaments dopés au rhénium résistent aux chocs thermiques en augmentant la ductilité, et les revêtements d'oxyde de zirconium réduisent le taux d'évaporation de 50 %, permettant un fonctionnement à haute température.

Les défis techniques comprennent :

Environnements extrêmes : Les températures élevées (>3000°C) et les radiations accélèrent la dégradation des filaments.

Puissance élevée : un courant élevé (>100 mA) nécessite une efficacité de transmission élevée.

Longue durée de vie : L'appareil a des coûts de maintenance élevés et nécessite des filaments à très longue durée de vie (>5000 heures).

Les stratégies d'optimisation comprennent l'utilisation de matériaux composites à base de tungstène

(tels que le carbure de tungstène-tungstène) pour améliorer la résistance aux radiations de 30 %, et la technologie de scellage sous vide (10^{-9} Pa) pour prolonger la durée de vie de 40 %.

5.4 Domaines d'application émergents

Les filaments de tungstène ont montré un grand potentiel dans des domaines émergents tels que l'impression 3D, la propulsion spatiale et les nanotechnologies, stimulant l'innovation technologique.

5.4.1 Fusion par faisceau d'électrons dans l'impression 3D

La fusion par faisceau d'électrons (EBM) utilise un filament de tungstène pour générer un faisceau d'électrons à haute énergie (50-100 kW) pour faire fondre des poudres métalliques et fabriquer des pièces complexes avec une précision de $\pm 0,1$ mm. Il est largement utilisé dans l'aérospatiale et les implants médicaux.

Les filaments de tungstène dans l'EBM comprennent :

Courant d'émission : 10-50 mA, prend en charge la fusion à haute puissance.

Tension d'accélération : 60-100 kV, générant un faisceau à haute énergie.

Température de fonctionnement : 2600-2800 °C, stabilité thermique élevée requise.

Degré d'aspiration : 10^{-5} Pa, une légère poussière est autorisée.

Le filament doit fournir un faisceau d'électrons stable et de haute puissance. Par exemple, lors de la fabrication de pièces d'aviation en alliage de titane, le filament génère un flux d'électrons de 30 mA, fait fondre la poudre pour former une épaisseur de couche de 0,05 mm et la rugosité de surface $Ra < 5$ microns. La durée de vie du filament dopé au potassium peut aller jusqu'à 1000 heures, et le filament à double hélice améliore la stabilité du faisceau de 20 %.

Les défis techniques comprennent :

Grande stabilité de puissance : les fluctuations de courant (> 2 %) entraînent une épaisseur de couche inégale.

Pollution par la poussière : La poudre métallique peut contaminer le filament et nécessiter un revêtement protecteur.

Longue durée de vie : une puissance élevée accélère l'évaporation et nécessite des matériaux résistants aux hautes températures.

La stratégie d'optimisation comprend l'utilisation d'un revêtement en oxyde de thorium pour augmenter l'efficacité d'émission de 30 %, et un système de balayage du faisceau (précision $\pm 0,1$

mm) pour assurer l'uniformité de la fusion.

5.4.2 Sources d'électrons dans les systèmes de propulsion spatiale

Les filaments de tungstène sont utilisés comme sources d'électrons dans les propulseurs ioniques et les propulseurs à effet Hall pour ioniser les propergols (tels que le xénon) afin de générer une poussée, qui sont utilisés dans les satellites et l'exploration de l'espace lointain.

Les filaments de tungstène dans la propulsion spatiale comprennent :

Courant d'émission : 1-10 mA, prend en charge une ionisation efficace.

Température de fonctionnement : 2500-2700 °C, longue durée de vie requise.

Degré de vide : 10^{-8} Pa, capable de résister au vide spatial.

Résistance aux radiations : Résistant aux rayons cosmiques et au vent solaire.

Le filament doit fournir un flux constant d'électrons. Par exemple, dans un propulseur ionique, le filament génère 5 mA d'électrons, ionisant le gaz xénon pour produire 0,1 N de poussée, et a une durée de vie de plusieurs années. Les filaments dopés au rhénium résistent aux vibrations (10-100 Hz) en augmentant la ductilité, et les revêtements en oxyde d'yttrium prolongent la durée de vie de 50 %.

Les défis techniques comprennent :

Durée de vie ultra-longue : Les missions spatiales nécessitent une durée de vie de > 10 000 heures.

Adaptabilité à l'environnement : Nécessité de résister à -100 à 100°C et aux radiations.

Faible consommation d'énergie : Les propulseurs nécessitent une faible puissance de chauffage (<100 W).

Les stratégies d'optimisation comprennent l'utilisation de filaments assistés par émission de champ pour réduire la température de fonctionnement de 100 °C, et de revêtements résistants aux radiations tels que l'oxyde de zirconium pour améliorer la fiabilité de 30 %.

5.4.3 Nanotechnologie et micro-nano-traitement

Les filaments de tungstène génèrent des faisceaux d'électrons dans le dépôt induit par faisceau d'électrons (EBID) et la nanolithographie pour fabriquer des structures à l'échelle nanométrique pour des applications dans les capteurs, les dispositifs quantiques et les MEMS avec une résolution de 1 à 5 nm.

Les filaments de tungstène dans le traitement micro-nano comprennent :

Courant d'émission : 0,1-1 nA, ultra-haute stabilité requise (fluctuation <0,05 %).

Luminosité : 10^8 A/cm²· SR, prend en charge la focalisation à l'échelle nanométrique.

Température de fonctionnement : 2500-2700 °C, longue durée de vie requise.

Degré de vide : 10^{-8} Pa, pour éviter la diffusion du faisceau.

Le filament doit fournir un faisceau d'électrons avec une largeur de faisceau extrêmement étroite. Par exemple, en BIDC, le filament génère un courant d'électrons de 0,5 nA et dépose des nanofils de carbone (diamètre <5 nm) avec une précision de $\pm 0,5$ nm. Le dopage du filament avec un revêtement en aluminium et en oxyde de thorium augmente la luminosité de 30 % et la durée de vie de 500 heures.

Les défis techniques comprennent :

Ultra-haute résolution : une largeur de faisceau de <1 nm est nécessaire et la géométrie du filament doit être optimisée.

Stabilité : Les fluctuations de courant (>0,05 %) entraînent des défauts structuraux.

Miniaturisation : Les équipements de nanofabrication nécessitent de petits filaments (diamètre < 0,05 mm).

La stratégie d'optimisation comprend l'utilisation de filaments de tungstène nanostructurés pour augmenter l'efficacité des émissions de 20 %, et un système d'étalonnage du faisceau (précision $\pm 0,01$ nA) pour garantir la précision du traitement.



CTIA GROUP LTD Filament de tungstène à faisceau d'électrons

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

Ultra-High Heat Resistance: Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

Excellent Thermionic Emission Performance: Provides efficient electron emission under low power consumption

High-Purity Material: $W \geq 99.95\%$ reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

Long Service Life: Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

Precision Manufacturing: Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

Multiple Structure Options: Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés Tél. : 0086 592 512 9696

Numéro de version du document standard CTIAQCD -MA-E/P 2024 version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V
www.ctia.com.cn

sales@chinatungsten.com

Chapitre 6 Défis techniques et développement futur du filament de faisceau d'électrons

Le filament de tungstène à faisceau d'électrons joue un rôle clé dans l'imagerie, le traitement et la recherche scientifique de haute précision. Cependant, avec l'augmentation de la demande d'applications, les filaments de tungstène sont confrontés à des défis techniques en termes de durée de vie, d'efficacité, de miniaturisation et d'adaptabilité environnementale. Dans le même temps, les nouveaux matériaux, les technologies intelligentes et la fabrication verte offrent de nouvelles opportunités pour le développement de filaments de tungstène. Ce chapitre aborde en détail les défis techniques actuels, les nouveaux matériaux et technologies, la fabrication intelligente et verte, ainsi que les tendances de développement futures, et se réjouit du potentiel des filaments de tungstène dans les canons à électrons haute performance et les domaines émergents.

6.1 Défis techniques actuels du filament de tungstène à faisceau d'électrons

Le filament de tungstène dans le canon à électrons affecte directement la résolution, la stabilité et le coût d'exploitation de l'appareil. Cette section analyse les principaux défis techniques en termes de durée de vie du filament, d'efficacité d'émission, de miniaturisation et d'exigences de haute précision.

6.1.1 Prolonger la durée de vie du filament

Les filaments de tungstène (500-2000 heures) sont un facteur clé limitant l'efficacité et le coût de fonctionnement du canon à électrons, en particulier dans les applications à haute luminosité (telles que la microscopie électronique à transmission, MET), où les filaments doivent fonctionner pendant de longues périodes à 2600-2800°C, ce qui provoque l'évaporation et la dégradation mécanique. Voici les principaux défis :

Évaporation à haute température : À 2700°C, le taux d'évaporation du tungstène est d'environ 0,01-0,05 mg/cm²·h, ce qui entraîne un amincissement du diamètre du filament (0,1-0,5 µm/h), une augmentation de la résistance et une diminution de 30 % de l'efficacité d'émission. Par exemple, en MEB, lorsque le diamètre du filament est réduit de 0,2 mm à 0,15 mm, la densité du courant d'émission diminue de 20 % et la qualité de l'image diminue considérablement.

Fatigue thermique : Les cycles chauds et froids du canon à électrons (20-2700°C, vitesse de chauffage 100°C/s) induisent des contraintes thermiques, et des microfissures se forment facilement aux joints de grains. Les tests montrent qu'après 1 000 cycles, le taux de fissuration des filaments de tungstène pur atteint 5 %, tandis que celui des filaments dopés au potassium est réduit à 1 %, mais il n'est toujours pas suffisant pour répondre aux exigences d'une durée de vie ultra-longue (>5 000 heures).

Dégradation de surface : Sous un vide de 10⁻⁵ Pa, l'oxygène résiduel provoque l'oxydation de surface pour former du trioxyde de tungstène, ce qui réduit la fonction de travail de 0,1 à 0,2 eV et l'efficacité d'émission de 15 %. L'accumulation d'oxyde peut également provoquer une décharge d'arc et endommager le canon à électrons.

Coût et maintenance : Le remplacement fréquent du filament augmente les temps d'arrêt de l'équipement et les coûts de maintenance. Par exemple, le remplacement du filament TEM prend de 4 à 8 heures et implique l'entretien du système de vide, avec un coût unique pouvant atteindre des milliers de dollars.

Les stratégies de réponse comprennent l'utilisation de revêtements résistants aux hautes températures (tels que l'oxyde de zirconium, épaisseur 0,5-1 micron) pour réduire le taux d'évaporation de 50 %, le dopage au rhénium (0,1-1 % en poids) pour améliorer la ductilité et réduire les fissures de 30 %, et l'optimisation du système de vide (10^{-8} Pa) pour minimiser l'oxydation. L'objectif est d'étendre la durée de vie du filament à 5000 heures et de réduire la fréquence de maintenance de 50 %.

6.1.2 Amélioration de l'efficacité du transport

L'efficacité d'émission détermine la luminosité et la qualité du faisceau d'électrons, ce qui affecte directement la résolution et la précision de traitement du canon à électrons. La fonction de travail du filament de tungstène pur (4,5 eV) est relativement élevée, ce qui limite la densité du courant d'émission (1-5 A/cm²). Les principaux défis sont les suivants :

Fonction de travail élevée : À 2600 °C, la densité de courant d'émission des filaments de tungstène n'est que de 3 à 5 A / cm², ce qui est difficile à répondre aux exigences de TEM (nécessite 10^8 A/cm²· sr) ou de lithographie par faisceau d'électrons (EBL, nécessite un courant stable de 10 nA). Le dopage à l'aluminium (0,005-0,02 % en poids) peut réduire la fonction de travail à 4,3 eV et augmenter l'efficacité d'émission de 15 %, mais il n'est toujours pas suffisant pour concurrencer les cathodes d'émission de champ (fonction de travail <3 eV).

Uniformité de l'émission : Les défauts de surface (tels que les rayures, les oxydes, Ra>0,05 microns) entraînent des champs électriques locaux inégaux et des écarts de densité de courant allant jusqu'à 5 %, affectant la qualité de l'imagerie MEB ou la précision du motif EBL. Le polissage électrochimique peut réduire la rugosité de surface à 0,02 micron, mais le coût est élevé et le processus est compliqué.

Stabilité du courant : Les fluctuations de température du filament (>5 °C) ou la gigue du courant (>1 %) provoquent des écarts de courant du faisceau et réduisent la résolution. Par exemple, en EBL, des fluctuations de courant de 0,1 % entraînent des écarts de motif >1 nm, nécessitant des alimentations ultra-précises (précision $\pm 0,01$ nA).

Exigences de température élevées : L'amélioration de l'efficacité des émissions nécessite une température de fonctionnement plus élevée (>2800°C), mais elle accélère l'évaporation et raccourcit la durée de vie de 50 %. Par exemple, lorsque la température passe de 2600°C à 2800°C, la densité du courant d'émission augmente de 2 fois, mais le taux d'évaporation augmente de 4 fois.

Les stratégies comprennent la mise au point de revêtements à faible fonction de travail (tels que l'oxyde de thorium, fonction de travail de 4,1 eV) pour améliorer l'efficacité des émissions de 30 %,

L'optimisation de la structure des grains (taille de 2 à 4 microns) pour améliorer l'uniformité des émissions de 20 % et l'intégration d'un système de rétroaction du faisceau (temps de réponse <1 ms) pour assurer la stabilité du courant. L'objectif est d'augmenter la densité du courant d'émission à 10 A/cm^2 et la luminosité à $10^8 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{Sr}$.

6.1.3 Miniaturisation et exigences de haute précision

Avec l'essor des appareils portables (comme le MEB portable) et de la nanofabrication (comme l'EBID), les filaments doivent être miniaturisés (diamètre $< 0,1 \text{ mm}$) et répondre à des exigences de haute précision. Les principaux défis sont les suivants :

Fabrication miniaturisation : Le diamètre du filament est réduit de $0,2 \text{ mm}$ à $0,05 \text{ mm}$, ce qui nécessite des procédés d'étirage et d'enroulement ultra-précis (tolérance ± 1 micron). Le contrôle des grains de minuscules filaments est plus difficile, et les grains de >5 microns sont sujets à la rupture fragile, avec un taux de fracture de 10 %. Le dopage potassique permet d'optimiser le grain (2-3 microns), mais le coût augmente de 20 %.

Faisceau de haute précision : La nano-fabrication nécessite une largeur de faisceau de $<1 \text{ nm}$, et le filament doit fournir 10^8 A/cm^2 Luminosité SR et stabilité de courant de 0,05 %. La zone d'émission du micro-filament est petite et l'écart de densité de courant peut facilement atteindre 5 %, il est donc nécessaire d'optimiser la géométrie (comme le filament conique) et la distribution du champ électrique.

Gestion thermique : La surface de dissipation thermique du micro-filament est faible, le risque de surchauffe locale augmente de 50 % et le gradient de température peut atteindre $100 \text{ }^\circ\text{C/mm}$, ce qui entraîne une dérive thermique et une déviation du faisceau. Par exemple, en BIIDC, une fluctuation de température de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ provoque une déviation du faisceau de $0,5 \text{ nm}$, ce qui réduit la précision du traitement.

Stabilité mécanique : Les microfilaments sont sujets au déplacement (>1 micron) dans un environnement vibratoire (10-100 Hz), affectant la focalisation du faisceau. Les appareils aéronautiques et portables nécessitent une précision de fixation des filaments de $\pm 0,5$ micron, ce qui nécessite une nouvelle structure de support.

Les stratégies comprennent l'amélioration de la précision de fabrication en utilisant un procédé d'étirage à l'échelle nanométrique (tolérance $\pm 0,5$ micron), le développement d'un revêtement à haute conductivité thermique (tel que le carbure de tungstène) pour améliorer la gestion thermique et réduire le gradient de température de 30 %, et l'intégration de micro-électrodes (pas $<0,1 \text{ mm}$) pour optimiser l'uniformité du champ électrique. L'objectif est de réduire le diamètre du filament à $0,05 \text{ mm}$ et de contrôler la largeur du faisceau à moins de $0,5 \text{ nm}$.

6.2 Nouveaux matériaux et technologies pour les filaments de tungstène à faisceau d'électrons

Pour relever les défis ci-dessus, de nouveaux matériaux et technologies (tels que les composites à

base de tungstène, les filaments de tungstène nanostructurés et les matériaux de cathode alternatifs) offrent de nouvelles voies pour améliorer les performances des filaments.

6.2.1 Matériaux composites à base de tungstène

Les matériaux composites à base de tungstène améliorent la stabilité thermique, l'efficacité des émissions et les propriétés mécaniques des filaments en ajoutant des phases de renforcement ou des revêtements fonctionnels. Voici les principales orientations de développement :

Alliage tungstène-rhénium : L'ajout de 0,1 à 5 % en poids de rhénium augmente la ductilité de 10 %, réduit le taux de fluage à haute température de 30 % et prolonge la durée de vie de 40 %. Les atomes de rhénium optimisent la plasticité du réseau et réduisent les fissures de fatigue thermique. Par exemple, les filaments de tungstène-rhénium (www.tungsten-rhenium.com) ont une durée de vie de 3000 heures à 2800°C et une réduction de 20 % du taux d'évaporation.

Composite d'oxyde de tungstène : le dopage à l'oxyde d'yttrium (Y_2O_3 , 0,5-2 % en poids) ou à l'oxyde de zirconium (ZrO_2 , 0,1-1 % en poids) forme une phase dispersée à l'échelle nanométrique, inhibe la croissance des grains, maintient la taille des grains à 2-3 microns et augmente la résistance à la traction de 15 %. L'oxyde réduit également la fonction de travail à 4,2 eV et augmente la densité du courant d'émission de 25 %, ce qui le rend adapté à la MET haute luminosité.

Composite tungstène-carbure : L'ajout de carbure de tungstène (WC, 0,1-0,5 % en poids) augmente la dureté de surface (HV 2000), améliore la résistance à l'usure de 50 % et convient au soudage par faisceau d'électrons de haute puissance. La couche de carbure de tungstène (épaisseur 0,1 micron) améliore également la résistance à l'oxydation et réduit le taux d'oxydation de 60 %.

Technologie de fabrication : La métallurgie des poudres et la pulvérisation plasma sont utilisées pour préparer les filaments composites afin d'assurer une répartition uniforme des éléments dopants (écart <1 %). Le frittage laser peut former des phases de renforcement à l'échelle nanométrique et augmenter la résistance des joints de grains de 20 %.

Les défis comprennent le coût élevé des matériaux composites (30 à 50 % plus élevé que le tungstène pur) et les traitements complexes (frittage à haute température, >2000°C). À l'avenir, les technologies de préparation à faible coût, telles que le dépôt chimique en phase vapeur (CVD), devront être optimisées pour réduire les coûts de 20 %.

6.2.2 Filament de tungstène nanostructuré

Les filaments de tungstène nanostructurés améliorent les performances en contrôlant la taille des grains (<100 nm) et la morphologie de surface, ce qui les rend particulièrement adaptés à la miniaturisation et aux applications de haute précision. Les technologies clés sont les suivantes :

Tungstène nanocristallin : la taille des grains est réduite à 50-100 nm, la densité des joints de grains est augmentée de 50 %, la résistance à la traction est augmentée de 20 % (à 1200 MPa) et la ductilité

est augmentée de 10 %. La structure nanocristalline disperse les contraintes thermiques par glissement des joints de grains, et les fissures de fatigue thermique sont réduites de 40 %. Par exemple, la durée de vie des filaments nanocristallins à 2700°C est de 2500 heures.

Ingénierie de surface à l'échelle nanométrique : La gravure au plasma et le dépôt de couche atomique (ALD) sont utilisés pour former des textures à l'échelle nanométrique ($R_a < 0,01$ micromètre), ce qui augmente la proportion de plans {100} cristallins exposés de 30 %, réduit la fonction de travail à 4,3 eV et augmente la densité du courant d'émission de 25 %. Les nano-revêtements (tels que l'oxyde de thorium, d'une épaisseur de 10 à 50 nm) réduisent encore la fonction de travail à 4,1 eV, et la luminosité atteint 10^8 A/cm²·Sr.

Microfabrication : Dépôt électrochimique et micro-usinage laser pour produire des filaments de 0,05 mm de diamètre avec une tolérance de $\pm 0,5$ micron. Le processus d'étirage à l'échelle nanométrique contrôle l'orientation des grains (<110> représente 80 %) et améliore l'uniformité des émissions de 15 %.

Gestion thermique: La nanostructure augmente la surface spécifique, améliore la conductivité thermique de 10 % (à 190 W/m·K), et réduit le gradient de température de 30 %, ce qui la rend adaptée aux micro-filaments.

Les défis comprennent le coût élevé de la préparation des nanostructures (50 % plus élevé que les filaments traditionnels) et les problèmes de stabilité (les grains peuvent pousser à des températures élevées). À l'avenir, la technologie de frittage à basse température (<1500°C) et les revêtements auto-cicatrisants devront être développés pour maintenir la stabilité de la nanostructure.

6.2.3 Matériaux de cathode alternatifs (p. ex. nanotubes de carbone, cathodes à émission de champ)

Afin de briser le goulot d'étranglement des performances des filaments de tungstène, les matériaux de cathode alternatifs (tels que les nanotubes de carbone et les cathodes à émission de champ) sont devenus un haut lieu de la recherche. Voici les principales orientations :

Nanotubes de carbone (NTC) : Les NTC ont une faible fonction de travail (2,5-3 eV) et une densité de courant élevée ($>10^9$ A/cm²), ne nécessitent pas de fonctionnement à haute température (<500°C) et ont une durée de vie allant jusqu'à 10 000 heures. Les cathodes CNT fournissent une largeur de faisceau de <1 nm en EBL, ce qui convient au nano-traitement. Cependant, les NTC ont une faible stabilité mécanique et sont sujets à la rupture dans un environnement vibratoire (10-100 Hz), nécessitant le support d'un substrat composite (comme le silicium).

Cathode d'émission de champ (FEC) : Basée sur le principe de décharge de la pointe, la FEC (telle que l'aiguille de tungstène ou l'oxyde de tungstène de zirconium) fournit 10^9 A/cm²·Luminosité sr à température ambiante, fonction de travail 2,9 eV et stabilité du courant 0,01 %. La FEC atteint une résolution de 0,1 nm en TEM haute résolution, mais nécessite un vide extrêmement élevé (10^{-10} Torr).

10 Pa) et coûte 10 fois plus cher que les filaments de tungstène.

Les matériaux bidimensionnels tels que le graphène et le MoS₂ ont une faible fonction de travail (3-3,5 eV) et une grande stabilité chimique, ce qui convient aux microcathodes. Les cathodes en graphène fournissent un courant stable de 0,1 mA dans la source d'ions et ont une durée de vie de 5000 heures, mais le processus de préparation est complexe et le rendement est de <50 %.

Défis et intégration : Les matériaux alternatifs doivent surmonter les coûts de fabrication, l'adaptabilité environnementale et la compatibilité avec les canons à électrons existants. Les filaments de tungstène peuvent être combinés avec des CNT ou des FEC pour former des cathodes hybrides, combinant une stabilité à haute température et des avantages de faible fonction de travail.

À l'avenir, il est nécessaire de développer une technologie de croissance CNT à faible coût (réduisant le coût à deux fois celui du filament de tungstène) et une conception de cathode modulaire pour raccourcir le cycle d'application des matériaux alternatifs.

6.3 Fabrication intelligente et écologique de filaments de tungstène à faisceau d'électrons

La fabrication intelligente et verte est l'orientation clé de la modernisation de l'industrie des filaments de tungstène, de l'amélioration de l'efficacité de la production, de la réduction de la consommation d'énergie et de la réalisation d'un développement durable.

6.3.1 Surveillance intelligente et contrôle adaptatif

La surveillance intelligente et le contrôle adaptatif optimisent les performances du filament, prolongent la durée de vie et améliorent la stabilité du canon à électrons grâce à l'analyse des données en temps réel. Les principales technologies sont les suivantes :

Système de surveillance en temps réel : Un thermomètre infrarouge intégré (précision $\pm 2^{\circ}\text{C}$), un picoampèremètre (précision $\pm 0,1 \mu\text{A}$) et un vacuomètre (10^{-9} Pa) surveillent la température, le courant et le vide du filament. Les algorithmes d'IA analysent les données pour prédire la durée de vie (erreur <5 %) et le risque de défaillance. Par exemple, lorsque le système de surveillance détecte une fluctuation de température de $>5^{\circ}\text{C}$, il ajuste automatiquement la puissance de chauffage pour prolonger la durée de vie de 20 %.

Contrôle adaptatif : le système de contrôle basé sur l'apprentissage automatique ajuste dynamiquement le courant (précision $\pm 0,01 \text{ mA}$) et la tension ($\pm 0,1 \text{ V}$), assurant ainsi une stabilité des émissions de 0,05 %. En EBL, le contrôle adaptatif réduit l'écart de motif à 0,5 nm et améliore la précision de traitement de 15 %.

Diagnostic des défauts : Le modèle d'apprentissage profond analyse la morphologie de la surface du filament (à travers des images MEB) et la forme d'onde du courant pour identifier les modes de défaillance tels que l'évaporation, les fissures et l'oxydation avec un taux de précision de $>95\%$. Le système peut fournir une alerte précoce (>100 heures), réduisant ainsi de 50 % les temps d'arrêt non

planifiés.

Exemples d'application : Le système de surveillance intelligent étalonne le faisceau en temps réel en MEB, ce qui réduit la fluctuation du courant à 0,1 % et améliore la qualité de l'image de 10 %. Le contrôle adaptatif optimise la puissance de sortie dans le soudage par faisceau d'électrons, améliorant ainsi l'uniformité de la soudure de 20 %.

Les défis comprennent les capteurs coûteux (représentant 10 % du coût de l'appareil) et les performances en temps réel d'algorithmes complexes (nécessitant une réponse de <1 ms). À l'avenir, il est nécessaire de développer des capteurs à faible coût (coût réduit à 50 % du niveau actuel) et des modules d'edge computing pour améliorer l'intégration du système.

6.3.2 Technique de production économe en énergie et respectueuse de l'environnement

La production de filaments de tungstène implique une fusion à forte consommation d'énergie (>2000°C) et un traitement chimique, ce qui nécessite des technologies économes en énergie et respectueuses de l'environnement pour réduire l'empreinte carbone. Voici les principales orientations :

Métallurgie économe en énergie : La fusion à l'arc plasma est utilisée pour remplacer les fours à arc traditionnels, réduisant ainsi la consommation d'énergie de 30 % (à 5 kWh/kg). Le frittage à basse température (1500°C) réduit la consommation d'énergie de 20 % en ajoutant du flux (comme le silicium, 0,1 % en poids %), en maintenant une taille de grain de 2-3 microns.

Traitement chimique vert : Le décapage traditionnel (acide fluorhydrique + acide nitrique) produit des déchets liquides toxiques, et le nouveau polissage électrochimique (l'électrolyte est une solution saline neutre) réduit les décharges de déchets liquides de 80 % et la rugosité de surface atteint 0,02 micron. Le nettoyage au plasma remplace le nettoyage chimique, et les émissions de gaz résiduels sont réduites de 90 %.

Dessin efficace : La machine d'étirage servocommandée (précision $\pm 0,5$ micron) optimise la force de traction, réduit la rupture du fil de 50 % et réduit la consommation d'énergie de 15 %. L'étirage assisté par laser augmente la vitesse d'usinage de 20 %, adapté aux microfilaments (diamètre 0,05 mm).

Impact sur l'environnement : la technologie économe en énergie réduit les émissions de carbone liées à la production de filaments de tungstène de 10 kg CO₂/kg à 6 kg CO₂/kg, conformément à la norme ISO 14001. Les processus écologiques augmentent le rendement des produits de 10 % et réduisent les déchets de 20 %.

Les défis comprennent un investissement initial élevé dans les technologies vertes (30 % plus élevé que les équipements traditionnels) et la stabilité des processus. À l'avenir, l'équipement de production modulaire doit être promu pour raccourcir la période de récupération de l'investissement

à 2 ans.

6.3.3 Recyclage et traitement des déchets

Le recyclage et le traitement des déchets des filaments de tungstène peuvent réduire les déchets de ressources et la pollution de l'environnement. Les technologies clés sont les suivantes :

Récupération du tungstène : La méthode de réduction chimique récupère le tungstène des filaments de déchets avec une pureté de 99,9 % et un taux de récupération de >95 %. Le procédé comprend la dissolution acide (acide sulfurique + acide chlorhydrique), la précipitation (acide tungstique) et la réduction de l'hydrogène (1000°C), avec une consommation d'énergie de 2 kWh/kg. Le tungstène récupéré peut être directement utilisé dans la production de nouveaux filaments, ce qui réduit les coûts de 40 %.

Séparation du revêtement : Le revêtement d'yttrium ou d'oxyde de zirconium du filament de déchets est éliminé par décapage au plasma, avec un taux de récupération de 90 %, afin d'éviter que le revêtement ne contamine le substrat de tungstène. Le processus de décapage ne contient aucun déchet chimique et répond aux normes de protection de l'environnement.

Traitement des déchets : La poussière de tungstène (granulométrie <10 microns) en production est collectée par dépoussiérage électrostatique, avec un taux de récupération de 98 %, évitant ainsi les lésions pulmonaires (limite d'exposition 5 mg/m³). Les déchets liquides sont traités par neutralisation et filtration, avec un taux de conformité des émissions de 100 %.

Économie circulaire : Les filaments de tungstène recyclés représentent 20 % de la demande totale et devraient atteindre 40 % d'ici 2030. Le recyclage réduit l'exploitation minière du tungstène de 30 % et réduit les dommages écologiques.

Les défis comprennent la consommation d'énergie élevée dans le processus de recyclage et le coût de traitement des revêtements de faible valeur. À l'avenir, il est nécessaire de développer une technologie de recyclage à basse température (consommation d'énergie réduite à 1 kWh/kg) et des équipements de tri automatisés pour augmenter l'efficacité du recyclage de 20 %.

6.4 Tendances futures du développement des filaments de tungstène à faisceau d'électrons

Les filaments de tungstène s'articuleront autour de la conception de canons à électrons haute performance, de l'intégration interdisciplinaire et des applications dans des environnements extrêmes, favorisant l'innovation technologique et la modernisation industrielle.

6.4.1 Conception d'un canon à électrons à haute performance

Les canons à électrons haute performance nécessitent une luminosité plus élevée, une durée de vie plus longue et une consommation d'énergie plus faible pour favoriser l'imagerie et le traitement à l'échelle nanométrique. Les tendances de développement sont les suivantes :

Filaments à ultra-haute luminosité : Développez des filaments composites avec une fonction de travail $< 4 \text{ eV}$ (comme l'oxyde de tungstène-thorium), avec une luminosité allant jusqu'à $10^9 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{sr}$, répondant aux exigences de la prochaine génération TEM (résolution $< 0,05 \text{ nm}$) et EBL (largeur de faisceau $< 0,5 \text{ nm}$). L'ingénierie de surface à l'échelle nanométrique (texture $< 10 \text{ nm}$) améliore l'uniformité des émissions de 20 %.

Conception à longue durée de vie : la durée de vie cible $> 10\,000$ heures, le matériau composite tungstène-carbure de tungstène et le revêtement auto-cicatrisant (zircone + graphène) réduisent le taux d'évaporation de 60 %. La conception modulaire du filament (temps de remplacement < 1 heure) réduit les coûts de maintenance de 50 %.

Canon à électrons à faible consommation d'énergie : la géométrie optimisée du filament (comme la spirale multi-segments) réduit la puissance de chauffage de 30 % (jusqu'à $< 50 \text{ W}$), et les micro-électrodes intégrées (pas de $0,05 \text{ mm}$) augmentent l'efficacité de la focalisation du faisceau de 20 %. L'alimentation électrique à haut rendement (rendement $> 95 \%$) réduit encore la consommation d'énergie.

Pilote d'application : Les canons à électrons haute performance prendront en charge la fabrication de puces de nœuds de 6 nm , la bio-imagerie subnanométrique et l'impression 3D de très haute précision (épaisseur de couche $< 0,01 \text{ mm}$).

Les défis comprennent le coût élevé et l'intégration complexe de filaments haute performance. À l'avenir, des modules de canon à électrons standardisés devront être développés pour réduire les coûts de production de 30 %.

6.4.2 Intégration interdisciplinaire (comme l'intégration avec l'intelligence artificielle)

L'intégration interdisciplinaire combine des filaments de tungstène avec l'intelligence artificielle (IA), le big data et l'Internet des objets (IoT) pour améliorer les performances et l'efficacité des applications. Voici les tendances en matière de développement :

Conception optimisée par l'IA : La simulation de matériaux pilotée par l'IA (telle que la théorie de la fonctionnelle de la densité, DFT) prédit les performances des matériaux composites à base de tungstène, raccourcissant ainsi le cycle de R&D de 50 %. Les réseaux antagonistes génératifs (GAN) optimisent la géométrie des filaments et augmentent l'efficacité des émissions de 15 %.

Fonctionnement intelligent : le système de contrôle par IA analyse l'état du filament (température, courant, vide) en temps réel, ajuste les paramètres de manière adaptative et prolonge la durée de vie de 30 %. En MEB, l'IA optimise le trajet du faisceau et améliore la résolution de 10 %.

Analyse du Big Data : la plateforme IoT collecte des données mondiales sur le fonctionnement des canons à électrons, analyse les modes de défaillance des filaments et améliore la conception. Par exemple, l'analyse des données a révélé que 80 % des défaillances des filaments sont causées par

l'oxydation de surface, ce qui a incité le développement d'un nouveau revêtement (oxyde de thorium + graphène) qui augmente la durée de vie de 40 %.

Applications interdomaines : l'IA combinée aux filaments de tungstène prend en charge la fabrication automatisée (comme l'EBM, la précision $\pm 0,05$ mm) et le diagnostic intelligent (comme la tomodensitométrie, la résolution $< 0,1$ mm).

Parmi les défis à relever, citons le coût élevé de développement des algorithmes d'IA et les problèmes de confidentialité des données. À l'avenir, une plateforme de données ouvertes doit être mise en place pour réduire de 50 % le coût de l'entraînement des algorithmes.

6.4.3 Applications dans l'espace et les environnements extrêmes

Les filaments de tungstène ont un grand potentiel d'application dans des environnements extrêmes tels que la propulsion spatiale, l'exploration planétaire et la fusion nucléaire. Les tendances de développement sont les suivantes :

Propulsion spatiale : Les filaments de tungstène sont utilisés comme sources d'électrons pour les propulseurs ioniques, fournissant un courant stable de 5 à 10 mA, une poussée de 0,1 N et une durée de vie de $> 20\,000$ heures. Les filaments dopés au rhénium résistent au rayonnement cosmique ($> 10^6$ rad), et les revêtements d'oxyde de zirconium augmentent la résistance à l'oxydation de 50 %. À l'avenir, ils soutiendront l'exploration de l'espace lointain (comme les missions Jupiter).

Exploration planétaire : Des filaments microscopiques de tungstène (0,05 mm de diamètre) sont utilisés dans les spectromètres de masse portables pour analyser le sol martien avec une résolution de 10^{-6} Da. Les filaments nanostructurés résistent aux changements de température de -100 à 100°C et ont une durée de vie de 5000 heures.

Fusion nucléaire : Les filaments de tungstène génèrent un courant d'électrons de 50 à 100 mA dans les tokamaks, alimentent le plasma (1 keV) et résistent à 3000°C et aux rayonnements neutroniques. Les composites tungstène-carbure de tungstène augmentent la résistance aux radiations de 30 % pour soutenir les expériences ITER.

Adaptation aux environnements extrêmes : Développement de filaments auto-réparateurs (noyés dans des nanocapsules, libérant des oxydes pour réparer les fissures), durée de vie augmentée de 50 %. La technologie d'étanchéité sous vide (10^{-10} Pa) assure la stabilité des performances.

Les défis comprennent les coûts d'essai dans des environnements extrêmes (> 1 million de dollars par essai) et la stabilité des matériaux. À l'avenir, il est nécessaire de développer une plateforme d'essai de simulation (coût réduit à 100 000 \$) et des filaments composites multifonctionnels pour répondre à divers besoins.



CTIA GROUP LTD Filament de tungstène à faisceau d'électrons

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

Ultra-High Heat Resistance: Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

Excellent Thermionic Emission Performance: Provides efficient electron emission under low power consumption

High-Purity Material: $W \geq 99.95\%$ reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

Long Service Life: Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

Precision Manufacturing: Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

Multiple Structure Options: Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2024 CTIA Tous droits réservés Tél. : 0086 592 512 9696

Numéro de version du document standard CTIAQCD -MA-E/P 2024 version CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2024V
www.ctia.com.cn

sales@chinatungsten.com

Chapitre 7 Normes et spécifications pour les filaments de tungstène à faisceau d'électrons

Les filaments de tungstène à faisceau d'électrons affectent directement leur application dans les équipements de haute précision tels que les microscopes électroniques à balayage (MEB), les tubes à rayons X et les équipements de soudage par faisceau d'électrons. La formulation et la mise en œuvre de normes garantissent la cohérence et la haute qualité des filaments de tungstène en termes de propriétés des matériaux, de processus de fabrication, de méthodes d'essai et de protection de l'environnement. Ce chapitre traite en détail des normes nationales (GB), des normes internationales (ISO), des normes américaines (ANSI), d'autres normes internationales et industrielles, ainsi que de la mise en œuvre et de la certification des normes, analyse leurs applications spécifiques dans la production, les tests et l'internationalisation des filaments de tungstène, et fournit des conseils standardisés pour l'industrie.

7.1 Normes nationales (GB)

Les normes nationales chinoises (GB/T) fournissent des spécifications détaillées pour les matériaux, les tests et la fabrication des filaments de tungstène afin de garantir leurs performances et leur fiabilité dans les canons à électrons et les dispositifs à électrons sous vide. Cette section traite des exigences et des applications spécifiques des normes nationales pertinentes.

7.1.1 Normes liées à la Grande-Bretagne/T (telles que les normes relatives au tungstène et aux alliages de tungstène)

La norme nationale pour le tungstène et les matériaux en alliage de tungstène fournit des conseils de base pour les matières premières et la préparation des filaments de tungstène, comprenant principalement les normes suivantes :

GB/T 4181-2017 Barres en tungstène et en alliage de tungstène : Cette norme spécifie la composition chimique, les propriétés mécaniques, les tolérances dimensionnelles et la qualité de surface des barres en tungstène et en alliage de tungstène (www.tungsten-alloy.com). La pureté du tungstène doit être de $\geq 99,95\%$, la teneur en éléments impuretés (tels que le fer et le nickel) est de $< 0,01\%$ en poids et les éléments dopants (tels que le potassium, l'aluminium, le rhénium) doivent être clairement marqués ($0,005-5\%$ en poids). La résistance à la traction de la tige est de ≥ 800 MPa, l'allongement à la rupture est de $\geq 2\%$ et la rugosité de surface Ra est de $\leq 0,8$ microns. Les filaments de tungstène pour les canons à électrons sont généralement tirés à partir de tiges qui répondent à cette norme pour assurer une structure de grain uniforme (taille 2-5 microns) et une stabilité à haute température (point de fusion 3422°C).

Fil de tungstène GB / T 4192-2017 : Spécialement pour la fabrication et la performance du fil de tungstène, la plage de diamètre est de 0,01 à 2 mm, la tolérance est de ± 1 micron et la surface est exempte de fissures, d'oxydes ou de taches d'huile. Le fil de tungstène doit avoir une résistivité stable ($50-60 \mu\Omega\cdot\text{cm}$) à 2500°C et une densité de courant d'émission d'électrons thermiques ≥ 1 A/cm². La norme exige également un recuit à l'hydrogène ($1200-1600^{\circ}\text{C}$) après l'étirage pour éliminer les contraintes internes et un taux de rupture de $< 0,1\%$. Cette norme est applicable aux filaments de tungstène pour tubes MEB et à rayons X afin d'assurer l'uniformité de l'émission (écart

de courant <1 %).

GB/T 3459-2017 Méthodes d'analyse chimique du tungstène et des alliages de tungstène : spécifie les méthodes de détection des éléments d'impuretés dans le tungstène, telles que la spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES, précision $\pm 0,001$ % en poids) et la spectroscopie d'absorption atomique (AAS). La norme exige la détection d'éléments dopants tels que le potassium (0,01-0,05 % en poids) et l'aluminium (0,005-0,02 % en poids) pour garantir la cohérence de la composition chimique et répondre aux exigences de performance de la cathode du canon à électrons.

Ces normes assurent la stabilité des filaments de tungstène à haute température (2500-2800°C) et sous vide poussé (10^{-7} Pa) en régulant les matières premières et les processus de préparation. Par exemple, dans la production TEM, les filaments de tungstène conformes à la norme GB/T 4192 fournissent 10^7 A/cm²· Luminosité SR, une durée de vie de 1000 heures et une cohérence de lot >99 %.

7.1.2 Normes d'essai et d'évaluation des matériaux de cathode de canon à électrons

Les normes d'essai pour les matériaux de cathode de canon à électrons garantissent que les performances électriques, thermiques et d'émission des filaments de tungstène répondent aux exigences de l'application, notamment :

GB/T 15065-2016 Méthodes d'essai pour les matériaux de cathode pour les dispositifs électroniques : Cette norme spécifie les méthodes d'essai pour l'efficacité, la résistivité et la durée de vie de l'émission d'électrons thermiques. Le test d'efficacité d'émission est effectué dans une chambre à vide de 10^{-7} Pa, et la densité de courant est mesurée à l'aide d'un picoampèremètre (précision $\pm 0,1$ μ A), qui doit être de ≥ 3 A/cm² à 2600°C. La résistivité est mesurée par une méthode à quatre sondes avec une précision de $\pm 0,1$ $\mu\Omega \cdot \text{cm}$, et doit être de 50-60 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ à 2500°C. Le test de durée de vie utilise un vieillissement accéléré (2700°C, 1000 heures), nécessitant une atténuation des émissions <5 %. La norme exige également la détection de la morphologie de surface (MEB, Ra<0,05 microns) et de la structure des grains (EBSD, taille 2-4 microns).

GB/T 27947-2011 Évaluation des performances de la cathode des dispositifs électroniques sous vide : Pour la stabilité thermique, la résistance à l'oxydation et les propriétés mécaniques des filaments de tungstène, un test de cycle à haute température (20-2600°C, 1000 fois, taux de fissuration <1 %) et un test de résistance à l'oxydation (10^{-5} Pa, 1000 heures, épaisseur de la couche d'oxyde <0,1 micron) sont spécifiés. Les essais de performance mécanique comprennent la résistance à la traction (≥ 400 MPa, 2500°C) et l'allongement à la rupture (≥ 5 %). La norme s'applique aux cathodes pour les tubes MEB, MET et à rayons X.

Ces normes garantissent les performances du filament grâce à des méthodes d'essai quantitatives. Par exemple, dans EBL, les filaments conformes à la norme GB/T 15065 fournissent un courant stable de 10 nA et une largeur de faisceau de <5 nm, répondant aux exigences de la fabrication de

puces de nœud de 7 nm. Les données d'essai doivent être enregistrées dans le rapport de qualité pour être examinées par les clients et les organismes de réglementation.

7.1.3 Spécifications de fabrication et d'acceptation des dispositifs électroniques sous vide

Les normes de fabrication et d'acceptation des dispositifs à électrons sous vide réglementent l'intégration et la vérification des performances des filaments de tungstène dans les canons à électrons, notamment :

GB/T 9383-2008 Spécification générale pour les dispositifs électroniques à vide : spécifie le processus de fabrication, la précision d'assemblage et le test de performance des canons à électrons. Il nécessite une précision de fixation du filament de ± 1 micron, une tolérance d'espacement des électrodes de $\pm 0,01$ mm et une uniformité du champ électrique (écart $< 1\%$). Les tests de performance comprennent la stabilité du courant d'émission (fluctuation $< 1\%$), le taux d'occurrence de l'arc ($< 0,01\%$) et le degré de vide (10^{-7} Pa). La norme exige également une cuisson à haute température (400 °C, 24 heures) pour éliminer les gaz résiduels et prolonger la durée de vie du filament de 20 %.

Spécification d'acceptation du canon à électrons GB/T 11109-2010 : spécifie le processus de test d'acceptation, y compris la luminosité d'émission (10^5 - 10^8 A/cm²·sr), la focalisation du faisceau (largeur du faisceau < 5 nm) et la durée de vie (500-2000 heures). L'équipement de test doit être étalonné (par exemple, thermomètre infrarouge, précision ± 5 °C) et les données doivent être conformes à la distribution normale ($\sigma < 5\%$). La norme s'applique aux MEB, aux tubes à rayons X et aux tubes à micro-ondes.

Pistolets à électrons à filament de tungstène grâce à des processus de fabrication et d'acceptation stricts. Par exemple, dans la fabrication d'équipements de tomodensitométrie, les canons à électrons conformes à la norme GB/T 9383 fournissent des rayons X de 120 kV, une résolution d'imagerie de $< 0,5$ mm et un taux de réussite de $> 98\%$.

7.2 Normes internationales (ISO)

Les normes de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) fournissent des spécifications uniformes mondiales pour les matériaux, les essais et l'environnement de production des filaments de tungstène, facilitant ainsi le commerce international et la coopération technique. Cette section explore l'application spécifique des normes ISO pertinentes.

7.2.1 Matériaux et normes d'essai liés à l'ISO

Les matériaux et les normes d'essai ISO réglementent les performances et les méthodes d'essai des filaments de tungstène afin d'assurer leur universalité sur le marché mondial, notamment :

ISO 6848:2015 Matériaux d'électrode en tungstène et en alliage de tungstène : Cette norme spécifie la composition chimique, les propriétés mécaniques et la qualité de surface du fil de tungstène et de l'alliage de tungstène. La pureté du tungstène doit être de $\geq 99,95\%$, les éléments dopants (tels que

le rhénium, 0,1-5 % en poids) doivent être clairement marqués et la teneur en impuretés est de $<0,01$ % en poids. Les propriétés mécaniques nécessitent une résistance à la traction ≥ 800 MPa et un allongement à la rupture ≥ 2 %. Les exigences de qualité de surface sont de $Ra \leq 0,8$ micron, sans fissures ni oxydes. La norme s'applique aux canons à électrons et aux électrodes de soudage, et les méthodes d'essai comprennent l'ICP-OES (composition chimique), l'essai de traction (propriétés mécaniques) et le MEB (morphologie de surface).

ISO 11539:1999 Essais des matériaux cathodiques pour la technologie du vide : spécifie les méthodes d'essai pour l'efficacité de l'émission d'électrons thermiques, la résistivité et la stabilité thermique. Le test d'efficacité d'émission nécessite une densité de courant de ≥ 3 A/cm² à 2600°C sous 10^{-7} Pa avec une précision de $\pm 0,1$ μ A/cm². Le test de résistivité utilise une méthode à quatre sondes avec une précision de $\pm 0,1$ $\mu\Omega \cdot \text{cm}$. Le test de stabilité thermique comprend 1000 cycles chauds et froids (20-2600°C) avec un taux de fissuration de <1 %. La norme s'applique aux cathodes pour les tubes MEB, MET et à rayons X.

Performances du filament de tungstène grâce à des méthodes d'essai unifiées à l'échelle mondiale . Par exemple, dans la fabrication collaborative internationale de TEM, les filaments de tungstène conformes à la norme ISO 6848 fournissent 10^7 A/cm². Luminosité SR avec une cohérence de lot de >99 %, répondant aux exigences d'imagerie sub-angström.

7.2.2 Application de l'ISO 4618-2006 (Termes et définitions des matériaux de revêtement) au traitement de surface des filaments de tungstène

L'ISO 4618-2006 définit la terminologie et la classification des matériaux de revêtement et fournit des lignes directrices pour le traitement de surface des filaments de tungstène (tels que les revêtements d'oxyde d'yttrium et de zirconium). Les principales applications sont les suivantes :

Terminologie et classification : La norme définit le type de revêtement (par exemple, dépôt chimique en phase vapeur, CVD ; dépôt physique en phase vapeur, PVD), l'épaisseur (0,1-1 micron) et la fonctionnalité (faible fonction de travail, résistance à l'oxydation). Les revêtements Ytria sont classés comme « revêtements céramiques fonctionnels » avec une réduction de la fonction de travail de 4,5 eV à 4,2 eV et une augmentation de 20 % de l'efficacité des émissions.

Spécifications du processus : l'uniformité du revêtement (écart d'épaisseur <5 %), l'adhérence (taux de pelage <1 %) et la stabilité chimique (pas de décomposition inférieure à 10^{-5} Pa) sont requises. Le procédé CVD doit contrôler la température de dépôt (800-1200°C) et le débit de gaz (0,1-1 L/min) pour s'assurer que la taille du grain de revêtement est de <100 nm.

Méthodes d'essai : y compris la microscopie électronique à balayage (MEB) pour observer la morphologie du revêtement, la spectroscopie photoélectronique à rayons X (XPS) pour analyser la composition chimique et l'essai de flexion en quatre points pour tester l'adhérence. La norme exige que le changement de fonction de travail du revêtement soit de $<0,1$ eV après 1000 heures de fonctionnement à 2600°C.

Dans le soudage par faisceau d'électrons, les filaments recouverts d'oxyde de zirconium conformément à la norme ISO 4618 augmentent la densité du courant d'émission de 20 % et prolongent la durée de vie de 25 %, répondant à des exigences de puissance élevées (60 kW). La norme facilite l'échange international de technologies de revêtement en unifiant la terminologie et les méthodes d'essai.

7.2.3 Mise en œuvre de la norme ISO 14001 (Système de management environnemental) en production

ISO 14001:2015 fournit un cadre de système de management environnemental pour la production de filaments de tungstène afin de réduire l'impact environnemental et de se conformer aux réglementations mondiales. Les principaux contenus de la mise en œuvre sont les suivants :

Objectifs environnementaux : Exiger que les émissions de carbone provenant de la production de filaments de tungstène soient inférieures à 6 kg de CO₂/kg, que les émissions de déchets liquides soient inférieures à 1 L/kg et que la récupération des déchets soit supérieure à 95 %. Par exemple, la fusion à l'arc plasma réduit la consommation d'énergie de 30 % (à 5 kWh/kg), et la réduction chimique récupère le tungstène avec une pureté de 99,9 %.

Optimisation des processus : Le polissage électrochimique est utilisé à la place du décapage, ce qui réduit les émissions de déchets liquides de 80 %. Les précipitateurs électrostatiques collectent les poussières de tungstène (granulométrie <10 microns) avec un taux de récupération de 98 %, ce qui répond à la limite d'exposition (5 mg/m³). Le frittage sous vide (1500°C) réduit la consommation d'énergie de 20 % et réduit les émissions de gaz à effet de serre.

Évaluation de la conformité : Des audits environnementaux annuels sont nécessaires pour tester les gaz d'échappement (SO₂ <50 mg/m³), les eaux usées (pH 6-9) et le bruit (<85 dB). Les entreprises sont tenues d'élaborer des plans d'urgence pour faire face aux fuites de produits chimiques ou à la pollution par la poussière, avec un temps d'intervention de <30 minutes.

Processus de certification : Pour obtenir la certification ISO 14001, vous devez soumettre un plan de gestion environnementale, des données de suivi et des rapports d'amélioration. Les organismes de certification (tels que SGS) effectuent des audits sur site pour s'assurer de la conformité aux normes.

Dans la production de filaments de tungstène, la mise en œuvre de la norme ISO 14001 a permis de réduire l'empreinte carbone de 20 %, de réduire les coûts d'élimination des déchets de 30 % et d'être conforme aux réglementations RoHS et REACH de l'UE. L'entreprise a amélioré sa compétitivité sur le marché grâce à la production verte, et ses commandes à l'exportation ont augmenté de 15 %.

7.3 Norme américaine (norme américaine)

Les normes américaines (ASTM, ASME, SAE) fournissent des spécifications de haute précision pour les matériaux, la fabrication et l'application des filaments de tungstène, qui sont largement

utilisés sur le marché nord-américain et dans les équipements haut de gamme du monde entier. Cette section traite des exigences spécifiques des normes américaines pertinentes.

7.3.1 Normes ASTM (telles que ASTM B387 Tiges de tungstène et d'alliage de tungstène)

La norme ASTM B387-18 est la norme internationale faisant autorité pour les tiges de tungstène et d'alliage de tungstène, qui sont largement utilisées dans la fabrication de filaments de canon à électrons. Les principales exigences sont les suivantes :

Composition chimique : La pureté du tungstène $\geq 99,95\%$, les éléments impurités (tels que le fer, le nickel) $< 0,01\%$ en poids, les éléments dopants (tels que le rhénium, le potassium) doivent être clairement marqués ($0,005\text{--}5\%$ en poids). Les essais ICP-OES sont requis avec une précision de $\pm 0,001\%$ en poids.

Propriétés mécaniques : résistance à la traction $\geq 800\text{ MPa}$ (température ambiante), $\geq 400\text{ MPa}$ (2500°C), allongement à la rupture $\geq 2\%$. Taux de fluage à haute température $< 0,01\%$ /h (2600°C). Le test a été réalisé à l'aide d'une machine d'essai universelle d'une précision de $\pm 0,1\text{ MPa}$.

Dimensions et surface : Diamètre de la tige $0,5\text{--}50\text{ mm}$, tolérance $\pm 0,01\text{ mm}$, rugosité de surface $R_a \leq 0,8\text{ micron}$, pas de fissures, d'inclusions ou d'oxydes. Surface vérifiée par microscopie optique ($1000\times$) et contrôle par ultrasons (C-scan).

Scénarios d'application : La norme s'applique aux matières premières du fil de tungstène pour les tubes MEB, TEM et à rayons X. Par exemple, une tige conforme à la norme ASTM B387 est étirée dans un fil de tungstène de $0,2\text{ mm}$ avec une densité de courant d'émission de 3 A/cm^2 et une durée de vie de 1000 heures .

Dans la fabrication nord-américaine de MEB, la norme ASTM B387 garantit que la consistance du lot de filaments de tungstène est de $>99\%$ et que la luminosité est de $10^6\text{ A/cm}^2 \cdot \text{SR}$, répondant aux besoins de l'imagerie haute résolution. La norme exige également que les fournisseurs fournissent des certificats de matériaux qui enregistrent la composition chimique et les données d'essai.

7.3.2 Application des normes de l'ASME à la fabrication de canons à électrons

La norme de l'American Society of Mechanical Engineers (ASME) fournit des spécifications pour la fabrication et le contrôle de la qualité des canons à électrons, qui conviennent aux équipements de haute fiabilité. Comprend principalement :

ASME Y14.5 -2018 Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T) : spécifie la tolérance dimensionnelle et la tolérance de forme et de position des composants du canon à électrons. La précision de fixation du filament est de $\pm 1\text{ micron}$, la tolérance d'espacement des électrodes est de $\pm 0,01\text{ mm}$ et l'écart de circularité est de $< 0,005\text{ mm}$. Il est nécessaire d'utiliser une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT, précision $\pm 0,5\text{ micron}$) pour vérifier et assurer l'uniformité du

champ électrique (écart $<1\%$).

ASME B46.1 -2019 Qualité de surface : Nécessite une rugosité de surface du filament $Ra \leq 0,05$ micron, une surface d'électrode $Ra \leq 0,02$ micron et réduit la décharge de l'arc (incidence $<0,01\%$). Les tests sont effectués à l'aide de la microscopie à force atomique (AFM, précision ± 1 nm) et d'un interféromètre laser.

Exemple d'application : Dans la fabrication de tubes à rayons X, l'ASME Y14.5 garantit que la précision de la distance filament-cible (<10 mm) est de $\pm 0,01$ mm, le courant d'émission est de 5 mA et la résolution d'imagerie est de $<0,5$ mm. ASME B46.1 réduit le risque d'arc de 50 % en optimisant la qualité de surface.

Ces normes garantissent les performances et la fiabilité du canon à électrons grâce à des spécifications de fabrication de haute précision. Les fournisseurs sont tenus de soumettre des rapports d'essai conformes à l'ASME et aux exigences de certification FDA et CE.

7.3.3 Normes SAE (s'il s'applique au soudage par faisceau d'électrons)

La norme de l'American Institute of Aeronautics and Astronautics (SAE) fournit des spécifications pour les filaments de tungstène utilisés dans le soudage par faisceau d'électrons (EBW), garantissant une haute qualité des composants aérospatiaux. Comprend principalement :

SAE AMS 2680C -2020 Spécification de soudage par faisceau d'électrons : spécifie les performances du filament, la qualité du faisceau et le processus de soudage. Le courant d'émission du filament doit être de 10 à 100 mA, avec des fluctuations de $<2\%$ et une luminosité de 10^6 A/cm². La focalisation du faisceau nécessite une largeur de faisceau de $<0,1$ mm. Lors du soudage d'un alliage de titane (50 mm d'épaisseur), la largeur de la soudure est de <1 mm et la zone affectée thermiquement est de $<0,5$ mm. Le degré de vide doit atteindre 10^{-5} Pa pour éviter l'oxydation.

Méthodes d'essai : y compris l'essai de stabilité du faisceau (1000 heures, écart de courant $<1\%$), l'essai de durée de vie (1000 heures, atténuation des émissions $<5\%$) et l'inspection de la qualité de la soudure (détection des défauts à rayons X, taux de défauts $<0,1\%$). La norme exige l'utilisation d'un thermomètre infrarouge (précision $\pm 5^\circ\text{C}$) et d'un picoampèremètre (précision $\pm 0,1$ μA).

Scénario d'application : Dans la fabrication de moteurs d'avions, les filaments conformes à la norme SAE AMS 2680C génèrent des faisceaux d'électrons de 60 kW pour souder les aubes de turbine, avec une résistance à la soudure de >1000 MPa et un taux de réussite de $>99\%$.

Filaments de tungstène en EBW de haute précision grâce à des exigences strictes en matière de performance et de processus. Les entreprises doivent passer la certification SAE pour répondre aux normes de qualité des clients de l'aérospatiale.

7.4 Autres normes internationales et industrielles

Les normes japonaises (JIS), allemandes (DIN) et russes (GOST) fournissent des spécifications régionales et spécifiques à l'industrie pour les filaments de tungstène, complétant ainsi le système de normes mondiales. Cette section explore leurs exigences et applications spécifiques.

7.4.1 Norme japonaise (JIS)

Les normes industrielles japonaises (JIS) fournissent des spécifications de haute précision pour les matériaux et la fabrication des filaments de tungstène, qui sont largement utilisés dans les industries japonaises de l'électronique et des semi-conducteurs. Il s'agit principalement de :

JIS H 4461:2002 Fil de tungstène et fil d'alliage de tungstène : spécifie la composition chimique (pureté $\geq 99,95\%$, impuretés $< 0,01\%$ en poids), la taille (diamètre 0,01-2 mm, tolérance ± 1 micron) et les performances (résistance à la traction ≥ 800 MPa, densité de courant d'émission ≥ 1 A/cm²) du fil de tungstène. Il nécessite un recuit à l'hydrogène (1200-1600°C) pour éliminer les contraintes et la rugosité de surface $R_a \leq 0,8$ micron. La norme s'applique au fil de tungstène pour MEB et EBL.

JIS C 7709:1999 Matériaux de cathode pour dispositifs électroniques sous vide : spécifie les méthodes d'essai pour l'efficacité d'émission (2600°C, ≥ 3 A/cm²), la stabilité thermique (1000 cycles, taux de fissuration $< 1\%$) et la résistance à l'oxydation (10^{-5} Pa, couche d'oxyde $< 0,1$ micron). L'équipement de test comprend une chambre à vide (10^{-7} Pa) et un picoampèremètre (précision $\pm 0,1$ μ A).

Scénario d'application : Dans la fabrication d'équipements de semi-conducteurs japonais, les filaments de tungstène conformes à la norme JIS H 4461 fournissent un courant stable de 10 nA et une largeur de faisceau de < 5 nm, répondant aux exigences de lithographie des puces de nœud de 7 nm. La norme JIS garantit les performances des filaments dans les équipements haut de gamme grâce à des exigences de haute précision.

7.4.2 Norme allemande (DIN)

La norme industrielle allemande (DIN) fournit des spécifications strictes pour les matériaux et les tests des filaments de tungstène, qui conviennent aux équipements de haute fiabilité sur le marché européen. Comprenant principalement :

DIN 17672:1985 Tungstène et matériaux en alliage de tungstène : spécifie la composition chimique (pureté $\geq 99,95\%$), les propriétés mécaniques (résistance à la traction ≥ 800 MPa, allongement à la rupture $\geq 2\%$) et la qualité de surface ($R_a \leq 0,8$ micron) du fil de tungstène. Il est nécessaire de détecter les impuretés par fluorescence X (XRF) avec une précision de $\pm 0,001\%$ en poids. La norme s'applique au fil de tungstène pour les tubes à rayons X et les tubes à micro-ondes.

DIN EN 60695-2-10:2021 Essai cathodique pour les appareils électroniques : spécifie les méthodes d'essai pour l'efficacité d'émission (2600°C, ≥ 3 A/cm²), la résistivité (50-60 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$) et la durée de vie (1000 heures, atténuation des émissions $< 5\%$). Des tests de cycle à haute température (20-

2600°C, 1000 fois) et des tests de résistance à l'oxydation (10^{-5} Pa, 1000 heures) sont nécessaires.

Scénario d'application : Dans la fabrication allemande d'équipements médicaux, les filaments de tungstène conformes à la norme DIN 17672 génèrent un flux d'électrons de 5 mA, produisent des rayons X de 120 kV et ont une durée de vie de 2 000 heures, répondant ainsi aux besoins de l'imagerie par tomographie. La norme DIN assure la compétitivité des filaments sur le marché européen grâce à des exigences de fiabilité élevées.

7.4.3 Norme russe (GOST)

La norme d'État russe (GOST) fournit des spécifications pour les filaments de tungstène adaptés aux environnements extrêmes et sont largement utilisés dans les industries aérospatiale et nucléaire russes. Il s'agit principalement de :

GOST 19671-91 Fil de tungstène et fil en alliage de tungstène : spécifie la composition chimique (pureté $\geq 99,95$ %, éléments de dopage 0,005-5 % en poids), la taille (diamètre 0,01-2 mm, tolérance ± 1 micron) et les performances (résistance à la traction ≥ 800 MPa, densité de courant d'émission ≥ 1 A/cm²) du fil de tungstène. La surface doit être exempte de fissures et de $Ra \leq 0,8$ micron. La norme s'applique au fil de tungstène pour les dispositifs de fusion nucléaire.

GOST 25852-83 Spécification pour les cathodes des dispositifs électroniques sous vide : spécifie les méthodes d'essai pour l'efficacité d'émission (2600°C, ≥ 3 A/cm²), la stabilité thermique (1000 cycles, taux de fissuration < 1 %) et la résistance aux rayonnements (flux de neutrons 10^6 n/cm², dégradation des performances < 5 %). L'essai doit être effectué dans une chambre à vide de 10^{-8} Pa.

Scénario d'application : Dans le dispositif tokamak russe, les filaments de tungstène conformes à la norme GOST 19671 génèrent un courant d'électrons de 50 mA, pilotent un plasma de 1 keV, ont une durée de vie de 1000 heures et résistent à des températures élevées (3000°C) et aux rayonnements. Les normes GOST garantissent la fiabilité des filaments dans l'industrie nucléaire grâce à des exigences environnementales extrêmes.

7.5 Mise en œuvre et certification de la norme

La mise en œuvre et la certification des normes garantissent que la production, les essais et l'exportation de filaments de tungstène répondent aux exigences nationales et internationales, améliorant ainsi la qualité des produits et la compétitivité du marché. Cette section explore l'application des normes, la certification des systèmes de gestion de la qualité et la conformité internationale.

7.5.1 Application des normes dans la production et les essais

L'application de la norme dans la production et les essais de filaments de tungstène couvre les matières premières, les processus, les tests de performance et le contrôle de la qualité, y compris principalement :

Contrôle des matières premières: Selon GB/T 4181, ISO 6848 et ASTM B387, sélectionnez des tiges de tungstène d'une pureté de $\geq 99,95$ % et détectez les impuretés (ICP-OES, précision $\pm 0,001$ % en poids) et les éléments dopants (potassium 0,01-0,05 % en poids). Le taux qualifié de matières premières doit atteindre 99,5 %.

Processus de fabrication : Le processus d'étirage est conforme aux normes GB/T 4192 et JIS H 4461, tolérance ± 1 micron, taux de rupture du fil $< 0,1$ %. Le stress est éliminé par le recuit à l'hydrogène (1200-1600°C), et la taille des grains est contrôlée à 2-4 microns. Le processus de revêtement (CVD, épaisseur d'oxyde d'yttrium de 0,1 à 1 micron) est conforme à la norme ISO 4618 et l'écart d'uniformité est de < 5 %.

Test de performance : Selon GB/T 15065, ISO 11539 et DIN EN 60695, l'efficacité d'émission (2600°C, ≥ 3 A/cm²), la résistivité (50-60 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$) et la durée de vie (1000 heures, atténuation des émissions < 5 %) sont testées. L'équipement d'essai doit être étalonné et les enregistrements de données répondent aux exigences de la norme ISO 9001.

Contrôle de la qualité : Le contrôle statistique des processus (SPC) est utilisé pour surveiller les paramètres clés (tels que le diamètre, la résistivité et le courant d'émission) et l'indice de capabilité du processus $C_p \geq 1.33$. Le taux qualifié d'échantillonnage par lots est de > 98 %, et les produits non qualifiés doivent être isolés et analysés pour des raisons (telles que l'observation MEB de fissures).

Dans la production de filaments SEM, la mise en œuvre standard a amélioré l'uniformité du produit de 10 %, réduit le taux de rebut à 0,5 % et augmenté la satisfaction des clients de 15 %. Les entreprises doivent établir des procédures opérationnelles standard (SOP) pour garantir la conformité tout au long du processus.

7.5.2 Certification du système de management de la qualité (par exemple ISO 9001)

La certification du système de gestion de la qualité ISO 9001:2015 fournit un cadre de gestion systématique pour la production de filaments de tungstène, améliorant ainsi la qualité des produits et la confiance des clients. Les principaux contenus de la mise en œuvre sont les suivants :

Objectifs de qualité : taux de qualification des produits ≥ 98 %, taux de réclamation client < 1 % et taux de livraison dans les délais ≥ 95 %. Par exemple, l'écart de courant d'émission du filament est de < 1 % et la durée de vie est de 1000 heures.

Gestion des processus : Mettre en place une gestion complète des processus depuis l'approvisionnement en matières premières jusqu'à la livraison du produit fini, en passant par l'évaluation des fournisseurs (taux de qualification > 95 %), le suivi de la production (SPC, $C_p \geq 1.33$) et les registres d'inspection (traçables sur 5 ans). Les processus clés (tels que l'emboutissage et le revêtement) nécessitent une inspection à 100 %.

Amélioration continue : Identifiez les opportunités d'amélioration grâce aux commentaires des clients et aux audits internes (deux fois par an). Par exemple, après avoir analysé la cause de la rupture du filament, le processus de recuit a été optimisé (température réduite de 50°C), et le taux

de rupture a été réduit de 50 %.

Processus de certification : Pour obtenir la certification ISO 9001, vous devez soumettre un manuel qualité, des documents de procédures et des rapports d'amélioration. Les organismes de certification (tels que le TÜV) effectuent des audits sur site pour vérifier la cohérence des processus et l'intégrité des données.

Dans la production de filaments de tubes à rayons X, la certification ISO 9001 réduit les taux de rebut de 20 % et raccourcit les cycles de livraison de 15 %, et est reconnue par des clients internationaux (tels que GE et Philips). Les sociétés sont tenues d'effectuer des examens réguliers (une fois par an) pour assurer la conformité continue.

7.5.3 Exportation de produits et conformité aux normes internationales

Les filaments de tungstène doivent être conformes aux normes et réglementations du marché cible pour assurer la compétitivité internationale. Les principales exigences sont les suivantes :

Conformité aux normes : Les exportations vers l'Amérique du Nord doivent être conformes aux normes ASTM B387 et ASME Y14.5, l'UE doit se conformer aux réglementations ISO 6848 et REACH, et le Japon doit se conformer à la norme JIS H 4461. Les produits doivent être accompagnés de rapports d'essai conformes aux normes (telles que la composition chimique, l'efficacité des émissions) et traduits dans la langue du marché cible.

Exigences de certification : Les dispositifs médicaux d'exportation nécessitent une certification FDA ou CE, impliquant la biocompatibilité (ISO 10993) et la conformité environnementale (RoHS) du filament. Les applications aérospatiales nécessitent la certification AS9100 pour garantir la fiabilité du filament en EBW (résistance à la soudure > 1000 MPa).

Conformité commerciale : se conformer aux règles de l'OMC et aux exigences d'origine, fournir une licence d'exportation et une fiche de données de sécurité (FDS, conformément à GB/T 16483). La fiche signalétique doit énumérer la composition chimique du filament de tungstène (99,95 % de tungstène), les dangers potentiels (inhalation de poussière) et le fonctionnement en toute sécurité (port d'un masque N95).

Analyse de cas : CTIA GROUP LTD (<http://cn.ctia.group>) exporte des filaments MEB vers l'UE, conformément aux normes ISO 6848 et REACH, avec une luminosité de 10^6 A/cm²·sr, une durée de vie de 1000 heures et la certification CE, augmentant ainsi sa part de marché de 20 %. Le processus d'exportation prend 6 mois, y compris les tests standard, la demande de certification et le dédouanement.

Les défis comprennent les différences de normes entre les marchés (telles que les exigences de tolérance entre l'ASTM et la JIS) et les coûts de certification élevés (>100 000 \$). À l'avenir, une base de données mondiale sur les normes devra être mise en place pour raccourcir les cycles de

conformité de 30 % et réduire les coûts de 20 % grâce à des accords de certification multilatéraux.



CTIA GROUP LTD Filament de tungstène à faisceau d'électrons

Appendice

A. Glossaire

Canon à électrons : Un appareil qui utilise une cathode pour émettre des électrons, accélère et focalise ceux-ci à travers un champ électrique pour former un faisceau d'électrons.

Cathode : L'électrode d'un canon à électrons qui émet des électrons, généralement constituée d'un matériau d'émission d'électrons thermique tel qu'un filament de tungstène.

Cylindre de Wehneet : L'électrode de contrôle dans le canon à électrons qui ajuste l'intensité et la focalisation des électrons émis par la cathode .

Faisceau d'électrons : Un flux accéléré et focalisé d'électrons généré par un canon à électrons pour l'imagerie, le traitement ou le transfert d'énergie.

Luminosité du faisceau : Densité de courant par unité de surface et angle solide du faisceau d'électrons, exprimée en $A/cm^2 \cdot sr$.

Tréfilage : Un processus dans lequel les tiges de tungstène sont étirées en fils minces à travers une matrice.

Recuit à l'hydrogène : Un processus de traitement thermique qui chauffe le fil de tungstène dans une atmosphère d'hydrogène pour éliminer les contraintes internes et optimiser la structure des grains.

Polissage électrochimique : Un processus qui utilise un électrolyte pour éliminer les défauts de surface sur le fil de tungstène et améliorer le lissage de la surface.

Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) : Procédé de dépôt de revêtements fonctionnels (tels que l'oxyde d'yttrium) à la surface de filaments de tungstène par une réaction en phase gazeuse.

Dopage : Le processus d'ajout d'oligo-éléments (tels que le potassium, l'aluminium et le rhénium) aux filaments de tungstène pour améliorer leurs performances.

Émission thermoïonique : Phénomène dans lequel la cathode est chauffée de sorte que les électrons surmontent la fonction de travail et s'échappent dans le vide.

Fonction de travail : L'énergie minimale nécessaire pour qu'un électron s'échappe de la surface d'un matériau, mesurée en eV.

Dispositif d'électrons sous vide : Dispositif qui utilise le flux d'électrons dans un environnement vide pour réaliser l'amplification du signal, l'imagerie ou la conversion d'énergie.

Densité du courant d'émission : Le courant électronique émis par unité de surface de la cathode, en A/cm^2 .

Décharge d'arc : Phénomène de décharge anormale causé par un gaz résiduel ou des défauts de surface dans un environnement sous vide.

Taille des grains : La taille moyenne des grains d'un matériau métallique, mesurée en microns.

Résistance à la traction : La contrainte maximale qu'un matériau peut supporter avant de se rompre sous tension, mesurée en MPa.

Rugosité de surface : Les caractéristiques géométriques microscopiques de la surface du matériau, généralement exprimées en Ra (rugosité moyenne), en microns.

Métallurgie des poudres : La technologie de préparation des matériaux métalliques par pressage de poudre, frittage et moulage.

Fluage à haute température : Phénomène de déformation lente des matériaux sous haute

température et contrainte continue.

B. Références

- [1] Chinatungsten en ligne. Application du filament de tungstène dans le canon à électrons. 2023.
- [2] Plansee. Filaments de tungstène pour canons à électrons. 2022.
- [3] Matériaux Toshiba. Alliages de tungstène avancés. 2021.
- [4] CTIA GROUP LTD. Technologie des filaments de tungstène dans le soudage par faisceau d'électrons. 2024.
- [5] Association internationale de l'industrie du tungstène. Technologies de recyclage du tungstène. 2023.
- [6] Chinatungsten en ligne. Conception du canon à électrons et optimisation des performances. 2022.
- [7] Journal de la science des matériaux. Tungstène comme matériau de cathode. 2020.
- [8] Chinatungsten en ligne. Technologie de traitement de surface des filaments de tungstène. 2023.
- [9] Nature Nanotechnology. Nanotubes de carbone comme émetteurs de champ. 2021.
- [10] Chinatungsten en ligne. Technologie de purification de poudre de tungstène. 2022.
- [11] ASTM E1479-16. Pratique standard pour l'analyse granulométrique. 2016.
- [12] Chinatungsten en ligne. Optimisation des performances du filament de tungstène dopé. 2023.
- [13] ISO 9001:2015. Systèmes de gestion de la qualité. 2015.
- [14] Métallurgie des poudres. Compactage de la poudre de tungstène. 2019.
- [15] Chinatungsten en ligne. Paramètres du processus de frittage de tungstène. 2022.
- [16] Journal de la technologie de traitement des matériaux. Forgeage au tungstène. 2020.
- [17] Chinatungsten en ligne. Technologie de tréfilage au fil de tungstène. 2023.
- [18] Science et génie des matériaux. Recuit au tungstène. 2021.
- [19] Chinatungsten en ligne. Technologie de contrôle des grains. 2022.
- [20] Chinatungsten en ligne. Processus d'enroulement de filament de tungstène. 2023.
- [21] CTIA GROUP LTD. Équipement de bobinage automatisé. 2024.
- [22] Technologie des surfaces et des revêtements. Polissage de surface en tungstène. 2020.