

Qu'est-ce qu'une électrode en cuivre et tungstène

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

PRÉSENTATION DU GROUPE CTIA

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

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Table des matières

Chapitre 1 : Introduction

- 1.1 Définition de l'électrode en cuivre et tungstène
- 1.2 Caractéristiques de base de l'électrode en cuivre et tungstène
- 1.3 Historique du développement de l'électrode en cuivre et tungstène

Chapitre 2 : Principes de base des électrodes en cuivre et tungstène

- 2.1 Caractéristiques du tungstène
- 2.2 Caractéristiques du cuivre
- 2.3 Mécanisme composite tungstène-cuivre
 - 2.3.1 Compatibilité physique des électrodes en tungstène et cuivre
 - 2.3.1.1 Compatibilité structurelle
 - 2.3.1.2 Compatibilité thermique
 - 2.3.2 Synergie de performance des électrodes tungstène-cuivre
 - 2.3.2.1 Synergie de la conductivité électrique et thermique
 - 2.3.2.2 Synergie entre la résistance aux hautes températures et la stabilité structurelle
- 2.4 Exigences clés en matière première pour les électrodes en cuivre et tungstène
 - 2.4.1 Exigences relatives à la poudre de tungstène
 - 2.4.2 Exigences relatives à la poudre de cuivre
 - 2.4.3 Normes de prétraitement des matières premières

Chapitre 3 : Propriétés physiques et chimiques des électrodes en cuivre et tungstène

- 3.1 Propriétés physiques des électrodes en tungstène et cuivre
 - 3.1.1 Densité de l'électrode en cuivre tungstène
 - 3.1.1.1 Méthode de calcul de la densité
 - 3.1.1.2 Relation entre la densité et la composition
 - 3.1.1.3 Impact de la densité sur les applications
 - 3.1.2 Propriétés thermiques des électrodes en cuivre et tungstène
 - 3.1.2.1 Conductivité thermique
 - 3.1.2.2 Coefficient de dilatation thermique
 - 3.1.2.3 Résistance aux hautes températures
- 3.2 Performances fonctionnelles de l'électrode en cuivre et tungstène
 - 3.2.1 Propriétés conductrices des électrodes en cuivre et tungstène
 - 3.2.1.1 Conductivité
 - 3.2.1.2 Résistivité
 - 3.2.1.3 Capacité de transport de courant
 - 3.2.2 Résistance à l'érosion par arc des électrodes en cuivre et tungstène
 - 3.2.2.1 Mécanisme d'érosion par arc
 - 3.2.2.2 Évaluation de la résistance à l'ablation
 - 3.2.2.3 Facteurs affectant la résistance à l'ablation
- 3.3 Autres propriétés de l'électrode en tungstène et cuivre
 - 3.3.1 Dureté de l'électrode en cuivre et tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3.2 Résistance de l'électrode en cuivre et tungstène
- 3.3.3 Ténacité de l'électrode en cuivre et tungstène
- 3.3.4 Résistance à l'usure de l'électrode en cuivre et tungstène
- 3.3.5 Résistance à la corrosion des électrodes en cuivre et tungstène
- 3.3.6 Propriétés anti-soudure et anti-adhérence des électrodes en cuivre tungstène
- 3.4 CTIA GROUP LTD Electrode en cuivre et tungstène MSDS

Chapitre 4 : Classification des électrodes en cuivre et tungstène

- 4.1 Classification dominante du rapport de composition Electrode en cuivre et tungstène
 - 4.1.1 Électrodes à haute teneur en tungstène (80 % à 95 % de tungstène)
 - 4.1.2 Électrodes à teneur moyenne en tungstène (50 % à 80 % de tungstène)
 - 4.1.3 Électrodes à faible teneur en tungstène (20 à 50 % de tungstène)
- 4.2 Classification des électrodes en cuivre et tungstène axée sur les scénarios d'application
 - 4.2.1 Électrodes pour EDM
 - 4.2.2 Électrodes pour appareils électriques à haute tension
 - 4.2.3 Électrodes dans le domaine du soudage
 - 4.2.4 Électrodes spéciales pour applications aérospatiales et militaires
- 4.3 Classification des caractéristiques morphologiques et structurelles des électrodes en cuivre et tungstène
 - 4.3.1 Électrodes de bloc
 - 4.3.2 Electrode à tige
 - 4.3.3 Electrode en feuille
 - 4.3.4 Électrodes de forme spéciale
- 4.4 Classification des électrodes en cuivre et tungstène axée sur les performances
 - 4.4.1 Électrodes hautement conductrices
 - 4.4.2 Électrodes résistantes à l'érosion par arc
 - 4.4.3 Électrodes à haute résistance
 - 4.4.4 Électrodes à haute résistance à la chaleur
- 4.5 Classification des électrodes en cuivre et tungstène par microstructure
 - 4.5.1 Électrodes uniformément dispersées
 - 4.5.2 Électrodes remplies de squelette
 - 4.5.3 Electrode de distribution de gradient
- 4.6 Classification des électrodes en cuivre et tungstène selon leur forme physique macroscopique
 - 4.6.1 Electrode dense
 - 4.6.2 Électrodes poreuses
 - 4.6.3 Électrodes à revêtement composite

Chapitre 5 : Processus de préparation de l'électrode en tungstène et cuivre

- 5.1 Processus d'infiltration
 - 5.1.1 Préfabrication du squelette en tungstène
 - 5.1.1.1 Moulage de poudre de tungstène
 - 5.1.1.2 Frittage du squelette en tungstène
 - 5.1.1.3 Contrôle des pores du squelette en tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.1.2 Contrôle des infiltrations
 - 5.1.2.1 Préparation du matériau en cuivre
 - 5.1.2.2 Contrôle de la température d'infiltration
 - 5.1.2.3 Contrôle du temps d'infiltration
- 5.2 Technologie de post-traitement
 - 5.2.1 Découpe
 - 5.2.2 Broyage
 - 5.2.3 Traitement de surface
- Contrôle de la précision dimensionnelle

Chapitre 6 : Scénarios d'application des électrodes en cuivre et tungstène

- 6.1 Application de l'électrode en cuivre tungstène en EDM
 - 6.1.1 Application au traitement des moules
 - 6.1.2 Application au traitement de matériaux difficiles à traiter
 - 6.1.3 Avantages de l'application en EDM
- 6.2 Application des électrodes en cuivre et tungstène dans les appareils électriques à haute tension
 - 6.2.1 Application aux interrupteurs haute tension
 - 6.2.2 Application aux parafoudres
 - 6.2.3 Avantages de l'application dans les appareils électriques à haute tension
- 6.3 Application des électrodes en cuivre et tungstène au soudage et au brasage
 - 6.3.1 Applications en soudage par résistance
 - 6.3.2 Application au brasage
 - 6.3.3 Avantages de l'application dans le domaine du soudage
- 6.4 Application des électrodes en cuivre et tungstène dans les industries aérospatiales et militaires
 - 6.4.1 Application aux composants liés aux moteurs-fusées
 - 6.4.2 Application aux composants de guidage
 - 6.4.3 Avantages de l'application dans l'industrie aérospatiale et militaire

Chapitre 7 : Normes de contrôle de la qualité et de test des électrodes en cuivre et tungstène

- 7.1 Détection des indicateurs clés de l'électrode en cuivre tungstène
 - 7.1.1 Test des propriétés physiques de l'électrode en cuivre et tungstène
 - 7.1.1.1 Méthodes et normes d'essai de densité
 - 7.1.1.2 Méthodes et normes d'essai de performance thermique
 - 7.1.1.3 Méthodes et normes de test de conductivité
 - 7.1.2 Propriétés chimiques des électrodes en tungstène et cuivre
 - 7.1.2.1 Méthode d'analyse de la composition
 - 7.1.2.2 Méthode d'essai de résistance à la corrosion
 - 7.1.2.3 Normes de test de la teneur en impuretés
 - 7.1.3 Propriétés mécaniques des électrodes en cuivre et tungstène
 - 7.1.3.1 Méthodes et normes d'essai de dureté
 - 7.1.3.2 Méthodes et normes d'essai de résistance
 - 7.1.3.3 Méthodes et normes d'essai de ténacité
- 7.2 Inspection de la microstructure de l'électrode en cuivre et tungstène

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.2.1 Analyse métallographique
 - 7.2.1.1 Préparation d'échantillons métallographiques
 - 7.2.1.2 Critères d'évaluation de l'uniformité de la distribution des phases
 - 7.2.1.3 Détection de la granulométrie
- 7.2.2 Détection des défauts des électrodes en cuivre et tungstène
 - 7.2.2.1 Méthode de détection de la porosité et plage admissible
 - 7.2.2.2 Méthodes et critères de détection des fissures
 - 7.2.2.3 Méthodes de détection des inclusions et normes de contrôle
- 7.3 Normes industrielles pour les électrodes en cuivre et tungstène
 - 7.3.1 Normes nationales pertinentes
 - 7.3.1.1 Dispositions pertinentes des normes chinoises
 - 7.3.1.2 Exigences des normes industrielles
 - 7.3.2 Normes internationales pertinentes
 - 7.3.2.1 Normes internationales relatives aux électrodes en cuivre et tungstène
 - 7.3.2.2 Normes relatives aux électrodes en tungstène et cuivre en Europe, en Amérique, au Japon, en Corée du Sud et dans d'autres pays

Chapitre 8 : Tendances du marché et de la technologie des électrodes en cuivre et tungstène

- 8.1 Analyse de la chaîne industrielle des électrodes en cuivre et tungstène
 - 8.1.1 Approvisionnement en matières premières en amont
 - 8.1.2 Fabrication intermédiaire
 - 8.1.3 Marché des applications en aval
- 8.2 Direction technique de l'électrode en cuivre et tungstène
 - 8.2.1 Optimisation du processus de préparation
 - 8.2.2 Chemin d'amélioration des performances
 - 8.2.3 Exploration de l'extension des applications

Appendice:

- Glossaire des électrodes en tungstène et cuivre
- Références



Électrode en cuivre et tungstène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm ³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

Resistance Welding Electrodes: Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

Repair Welding Electrodes: Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes: Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

High-Voltage Discharge Tube Electrodes: This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 1 : Introduction

1.1 Définition de l'électrode en cuivre et tungstène

Une électrode tungstène-cuivre est une électrode composite fabriquée à partir de tungstène (W) et de cuivre (Cu) par métallurgie des poudres ou infiltration sous vide. Sa définition englobe sa composition, son mode de préparation et ses propriétés fonctionnelles dans des applications spécifiques. Les électrodes tungstène-cuivre utilisent généralement du tungstène comme matériau principal et du cuivre comme charge. Les deux métaux sont combinés en proportions variables (par exemple, WCu 70/30, WCu 80/20), ce qui donne un matériau doté d'un point de fusion élevé, d'une résistance aux températures élevées et d'une excellente conductivité électrique. Le point de fusion élevé du tungstène (3422 °C) confère à l'électrode une stabilité thermique et une résistance à l'érosion par arc électrique exceptionnelles, tandis que le cuivre, avec un point de fusion de 1083 °C, possède une conductivité électrique et thermique élevée, assurant un transfert de courant efficace et une dissipation thermique rapide. Les propriétés de ce matériau composite le rendent largement utilisé dans des applications telles que l'usinage par électroérosion (EDM), le soudage par résistance et les contacts électriques. La définition d'une électrode tungstène-cuivre englobe également sa microstructure. Les électrodes sont formées par mélange de poudres de tungstène et de cuivre par métallurgie des poudres, pressage et frittage, ou par infiltration de cuivre liquide dans le squelette poreux du tungstène par infiltration sous vide, ce qui permet d'obtenir une distribution de phase uniforme et une faible porosité.

Dans les applications pratiques, la définition des électrodes tungstène-cuivre s'élargit pour englober leurs propriétés fonctionnelles, telles que leur utilisation comme électrodes-outils en usinage par électro-étincelage (EDM) pour l'enlèvement de matière sur les pièces, ou comme électrodes en soudage par résistance, supportant des courants et des pressions élevés. Le rapport et le procédé de préparation peuvent être adaptés à des besoins spécifiques. Par exemple, les électrodes à forte teneur en tungstène sont plus adaptées à la résistance à l'usure et à l'arc, tandis que celles à forte teneur en cuivre optimisent la conductivité électrique. La définition des électrodes tungstène-cuivre englobe également leurs différences par rapport aux électrodes monométalliques traditionnelles. L'avantage des matériaux composites réside dans leurs propriétés équilibrées de tungstène et de cuivre, surmontant les limites des matériaux monométalliques, telles que le bas point de fusion du cuivre pur ou la faible conductivité électrique du tungstène pur. Ces dernières années, grâce aux progrès des technologies de fabrication, la définition des électrodes tungstène-cuivre s'est progressivement étendue aux domaines de la fabrication additive et des nanotechnologies, explorant des microstructures plus fines et de nouvelles applications.

1.2 Caractéristiques de base de l'électrode tungstène-cuivre

tungstène -cuivre se distinguent par leurs propriétés physiques, mécaniques et électriques uniques en tant que matériau composite, ce qui les rend particulièrement adaptées à de nombreuses applications. Tout d'abord, la conductivité électrique est une caractéristique essentielle des électrodes tungstène-cuivre. La conductivité électrique élevée de la phase cuivre (environ $5,8 \times 10^7$ S/m) assure un chemin de transmission de courant efficace. Bien que le tungstène ait une conductivité électrique plus faible (environ $1,8 \times 10^7$ S/m), en optimisant la répartition du cuivre, la conductivité électrique des électrodes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungstène-cuivre peut atteindre 80 à 90 % de celle des électrodes en cuivre traditionnelles, répondant ainsi aux exigences de l'électroérosion et du soudage. La conductivité thermique est une autre caractéristique clé. La combinaison de la conductivité thermique du cuivre et de la conductivité thermique modérée du tungstène (environ 174 W/ m· K) donne un alliage avec une conductivité thermique comprise entre 180 et 220 W/ m· K , permettant une dissipation rapide de la chaleur générée lors de l'usinage ou du soudage, évitant ainsi une surchauffe localisée.

La résistance aux hautes températures est un avantage majeur des électrodes tungstène-cuivre. Le point de fusion ultra-élevé du tungstène assure sa stabilité dans les arcs électriques et les environnements à haute température. Après fusion, la phase de cuivre remplit les pores, améliorant ainsi la stabilité thermique du matériau, le rendant ainsi adapté aux conditions extrêmes jusqu'à 3 000 °C. La dureté élevée du tungstène (environ 3 430 HV) et sa résistance à l'usure contribuent à sa résistance à l'érosion par arc. Cela réduit considérablement l'ablation de la surface de l'électrode lors de l'électroérosion, prolongeant ainsi sa durée de vie. La résistance mécanique et la dureté sont également des caractéristiques importantes. Les électrodes tungstène-cuivre présentent une résistance à la compression supérieure à 1 000 MPa et une dureté comprise entre 200 et 300 HV, ce qui leur permet de supporter des pressions élevées et des sollicitations mécaniques fréquentes. De plus, la phase de cuivre confère une certaine ténacité, réduisant ainsi le risque de rupture fragile.

Le faible coefficient de dilatation thermique (environ 6 à 8 ppm/°C) constitue un avantage unique des électrodes en tungstène-cuivre. Il s'adapte aux substrats en silicium ou en céramique, réduit les contraintes lors des cycles thermiques et est particulièrement adapté au packaging microélectronique. La résistance à la corrosion est obtenue grâce à la stabilité chimique du tungstène et au traitement de surface du cuivre (comme le nickelage), ce qui le rend adapté aux environnements humides ou industriels. Sur le plan microstructural, la distribution de phase uniforme et la faible porosité (généralement inférieure à 1 %) de l'électrode en tungstène-cuivre garantissent des performances constantes. Ces caractéristiques fondamentales constituent la polyvalence des électrodes en tungstène-cuivre, leur permettant d'être performantes dans l'usinage de haute précision, le contact électrique et la gestion thermique. À l'avenir, avec le développement des nanotechnologies et de la modification de surface, ces caractéristiques devraient être encore optimisées.

1.3 Historique du développement de l'électrode tungstène-cuivre

Les électrodes tungstène-cuivre reflètent l'évolution historique de la science des matériaux et des besoins industriels. Leurs origines remontent au milieu du XXe siècle, avec les progrès de la métallurgie des poudres et le développement rapide de l'industrie électrique. La recherche et le développement d'électrodes tungstène-cuivre ont débuté dans les années 1940, stimulés par les propriétés uniques du tungstène et du cuivre dans les applications militaires et industrielles. Les premières recherches se sont concentrées sur les procédés de métallurgie des poudres et, en 1945, l'American Society for Metals (ASM) a publié pour la première fois un rapport sur la préparation de composites tungstène-cuivre, explorant leur application aux contacts électriques par mélange, pressage et frittage de poudres de tungstène et de cuivre. À cette époque, les électrodes tungstène-cuivre étaient principalement utilisées dans les équipements électriques bas de gamme, avec des performances limitées, une porosité élevée et des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

marges de progression en termes de conductivité et de durabilité.

Des années 1950 aux années 1970, avec l'introduction de la technologie d'infiltration sous vide, le développement des électrodes tungstène-cuivre a connu une croissance rapide. En 1955, Siemens a développé avec succès la méthode d'infiltration sous vide, infiltrant du cuivre liquide dans le squelette de tungstène fritté, réduisant ainsi considérablement la porosité et améliorant la densité et la conductivité du matériau. Cette avancée technologique a permis l'application des électrodes tungstène-cuivre à l'usinage par électroérosion (EDM), les rendant idéales pour l'usinage de matériaux durs comme le carbure de tungstène. Dans les années 1960, des entreprises japonaises et américaines comme Toshiba et General Electric ont encore optimisé le rapport et la microstructure, faisant des WCu 70/30 et WCu 80/20 des normes industrielles, largement utilisées dans les interrupteurs haute tension et les électrodes de soudage.

Des années 1980 aux années 2000, les domaines d'application des électrodes tungstène-cuivre se sont étendus à la microélectronique et à l'aérospatiale, stimulant ainsi les innovations technologiques en matière de préparation. En 1985, la technologie de pressage isostatique à chaud (HIP) a été introduite, améliorant l'uniformité et la résistance mécanique du matériau, répondant ainsi aux besoins d'un usinage de haute précision. Dans les années 1990, l'introduction de la poudre de nano-tungstène a permis d'accroître le degré d'affinage du grain, d'améliorer la résistance à l'usure et à l'érosion par arc. Après 2000, avec l'essor de la fabrication additive et de l'impression 3D, la préparation des électrodes tungstène-cuivre a évolué vers une personnalisation, rendant possible la fabrication d'électrodes aux géométries complexes. Dans les années 2020, combinées à l'intelligence artificielle et à la simulation des matériaux, la recherche et le développement d'électrodes tungstène-cuivre se sont concentrés sur les matériaux à gradient fonctionnel et la modification de surface pour répondre aux besoins des équipements 5G et des capteurs haute température. D'ici 2025, les électrodes tungstène-cuivre sont devenues des matériaux de base dans le traitement et l'électronique haute performance, et leur historique de développement reflète l'intégration profonde de l'innovation technologique et des besoins d'application.



Électrode en cuivre et tungstène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 2 : Base matérielle de l'électrode tungstène-cuivre

2.1 Caractéristiques du tungstène

Le tungstène, composant essentiel des électrodes tungstène-cuivre, possède des propriétés qui constituent une base unique pour les applications hautes performances. Métal à point de fusion élevé, le tungstène est le plus élevé de tous les métaux connus, atteignant 3 422 °C. Cette propriété lui permet de maintenir sa stabilité structurelle dans des environnements à températures extrêmement élevées, ce qui le rend particulièrement adapté à la résistance aux chocs de l'arc et aux hautes températures rencontrés lors de l'usinage par électroérosion (EDM) ou du soudage par résistance. Sa masse volumique de 19,25 g/cm³ confère à l'électrode une grande résistance à la masse et à la déformation. Sa résistance à la compression peut dépasser 1 000 MPa et sa dureté est d'environ 3 430 HV, démontrant une excellente résistance à l'usure et une excellente résistance mécanique. Ces propriétés lui permettent de supporter des contraintes mécaniques fréquentes ou l'érosion par arc, prolongeant ainsi sa durée de vie. Bien que sa conductivité thermique d'environ 174 W/ m·K soit inférieure à celle du cuivre, son point de fusion élevé compense cet inconvénient, lui permettant de conserver sa forme à des températures élevées.

La stabilité chimique du tungstène est une autre caractéristique remarquable. Il résiste aux environnements acides, alcalins et oxydants, et est particulièrement résistant à une corrosion importante de sa surface en milieu humide ou industriel. Ceci garantit l'application d'électrodes tungstène-cuivre en extérieur ou dans des conditions difficiles. Cependant, le tungstène présente une conductivité électrique relativement faible (environ $1,8 \times 10^7$ S/m), ce qui limite son utilisation seule et nécessite un compoundage avec d'autres matériaux hautement conducteurs. Son coefficient de dilatation thermique est d'environ 4,5 ppm/°C, ce qui correspond à celui de nombreux matériaux céramiques ou semi-conducteurs, réduisant les contraintes lors des cycles thermiques et offrant un avantage pour le packaging microélectronique. Le tungstène présente une faible usinabilité et doit être préparé par métallurgie des poudres ou frittage à haute température, mais sa structure à grains fins peut améliorer les performances grâce à l'optimisation du procédé. Ces dernières années, l'introduction de la poudre de nano-tungstène a encore amélioré l'uniformité et la résistance du tungstène, lui offrant un potentiel accru pour les applications dans les électrodes de haute précision.

2.2 Caractéristiques du cuivre

Le cuivre, autre composant clé des électrodes tungstène-cuivre, possède des propriétés qui leur confèrent des performances électriques et thermiques exceptionnelles. Bien que son point de fusion de 1 083 °C soit inférieur à celui du tungstène, sa conductivité électrique et thermique élevée en fait un matériau idéal pour une transmission efficace du courant et une dissipation thermique efficace. Dans les électrodes tungstène-cuivre, la phase cuivre est incorporée au squelette de tungstène par métallurgie des poudres ou infiltration sous vide, formant un réseau conducteur continu qui assure une transmission stable du courant pendant l'électroérosion ou le soudage. Avec une masse volumique de 8,96 g/cm³, le cuivre est plus léger que le tungstène, mais sa ductilité et sa ténacité offrent une flexibilité mécanique supplémentaire, réduisant le risque de rupture fragile sous contrainte mécanique. La résistance à la corrosion du cuivre est faible à l'état pur et il est facilement affecté par l'oxydation ou la sulfuration. Cependant, dans les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

composites tungstène-cuivre, la stabilité chimique du tungstène assure une protection, et la surface du cuivre peut être recouverte d'un revêtement (tel que du nickel ou de l'or) pour améliorer sa résistance aux intempéries. Le cuivre présente un coefficient de dilatation thermique relativement élevé, d'environ 17 ppm/°C, mais en l'associant au tungstène, il s'adapte aux substrats en silicium ou en céramique, ce qui le rend idéal pour les applications microélectroniques. Son excellente usinabilité facilite la découpe et le formage de précision, et permet la fabrication d'électrodes de formes complexes. Cependant, sa tendance à se ramollir à haute température limite son utilisation seule, nécessitant un support en tungstène. Ces dernières années, le cuivre électrolytique de plus haute pureté a été largement adopté pour réduire l'impact des impuretés sur la conductivité électrique et thermique. Les propriétés du cuivre confèrent aux électrodes tungstène-cuivre une conductivité électrique et thermique élevée, leur permettant d'excellentes performances dans les applications de gestion électrique et thermique.

2.3 Mécanisme composite tungstène-cuivre

Le mécanisme composite tungstène-cuivre est essentiel à la compréhension des fondamentaux des performances des électrodes tungstène-cuivre, impliquant l'interaction entre le tungstène et le cuivre à l'échelle microscopique et l'optimisation du procédé de préparation. Les matériaux composites tungstène-cuivre sont obtenus par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide. Le principe de base consiste à utiliser le point de fusion élevé du tungstène comme squelette et le point de fusion bas du cuivre comme phase de remplissage pour former un système aux performances complémentaires. En métallurgie des poudres, les poudres de tungstène et de cuivre sont mélangées selon un ratio spécifique, pressées pour former une ébauche, puis frittées à haute température. Le cuivre mouille les particules de tungstène en phase liquide, remplissant les pores et formant une structure composite uniforme. L'infiltration sous vide prépare d'abord un squelette poreux en tungstène, qui est ensuite chauffé sous vide à une température supérieure au point de fusion du cuivre. Le cuivre liquide s'infiltre et remplit l'ébauche, augmentant ainsi la densité du matériau.

Le cœur du mécanisme composite réside dans l'incompatibilité physique et chimique du tungstène et du cuivre. Aucun composé significatif ne se forme entre les deux, et l'interface est principalement liée mécaniquement et partiellement diffusée, minimisant les transitions de phase ou la formation de phases cassantes. Le squelette de tungstène assure le support structurel et la résistance aux hautes températures, tandis que la phase de cuivre forme un réseau continu, optimisant la conductivité électrique et thermique. Dans la microstructure, les particules de tungstène sont généralement réparties sous forme de polygones irréguliers, dont la taille varie de 5 à 20 microns. Le cuivre remplit les pores et la porosité peut être contrôlée en dessous de 1 %. Les traitements thermiques et les procédés assistés par pression (tels que la compression isostatique à chaud) améliorent encore la liaison et l'uniformité de l'interface. Le mécanisme composite implique également une adaptation de la dilatation thermique. La faible dilatation thermique du tungstène est compensée par la forte dilatation thermique du cuivre par un ajustement proportionnel, ce qui donne un coefficient de dilatation thermique de 6 à 8 ppm/°C, adaptable à une variété de substrats.

2.3.1 Compatibilité physique des électrodes tungstène-cuivre

La compatibilité physique des électrodes tungstène-cuivre est un élément important de leur mécanisme

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

composite, impliquant la coordination des propriétés thermiques, mécaniques et électriques du tungstène et du cuivre. Premièrement, la compatibilité thermique se reflète dans la correspondance du coefficient de dilatation thermique (CTE). Le tungstène a un CTE de 4,5 ppm/°C, tandis que le cuivre a un CTE de 17 ppm/°C. La différence est significative lorsqu'il est utilisé seul, mais en ajustant le rapport composite (par exemple, WCu 85/15), le CTE final peut être contrôlé à 6-8 ppm/°C, proche de celui des substrats en silicium ou en céramique, réduisant ainsi la concentration de contraintes lors des cycles thermiques. Cette propriété est particulièrement importante dans les applications de conditionnement et de capteurs microélectroniques pour éviter le gauchissement ou la rupture du boîtier.

La compatibilité mécanique se reflète dans l'équilibre entre dureté et ténacité. Le tungstène présente une dureté allant jusqu'à 3 430 HV, tandis que le cuivre n'a qu'une dureté d'environ 70 HV. Grâce au compoundage, la dureté des électrodes tungstène-cuivre est généralement comprise entre 200 et 300 HV, alliant résistance à l'usure et ductilité. Le squelette en tungstène assure le support mécanique, tandis que la phase de cuivre améliore la ténacité, absorbe l'énergie d'impact et prévient les ruptures fragiles, notamment en électroérosion, où l'usure de surface des électrodes est réduite. La compatibilité électrique est essentielle. La conductivité élevée du cuivre et la conductivité plus faible du tungstène ($1,8 \times 10^7$ S/m) sont coordonnées par un réseau continu de phases de cuivre. La conductivité électrique est proche de 80 à 90 % de celle du cuivre pur, répondant aux besoins de transmission de courant élevé.

La compatibilité physique implique également la stabilité interfaciale. Il n'y a pas de réaction chimique significative entre le tungstène et le cuivre ; l'interface est principalement liée mécaniquement et diffusée, ce qui minimise la formation de phases fragiles et améliore la stabilité à long terme. Le procédé d'infiltration sous vide optimise le mouillage interfacial, réduit les pores non remplis et améliore la densité. La conductivité thermique reflète également la compatibilité, la phase de cuivre dominant la conduction thermique et la phase de tungstène assurant la stabilité thermique. À l'avenir, la nanopoudre ou la modification de surface pourrait encore améliorer la compatibilité et permettre des applications dans des environnements plus exigeants, tels que les capteurs haute température ou les dispositifs 5G.

2.3.1.1 Compatibilité structurelle

Les électrodes tungstène-cuivre sont un élément essentiel de leur compatibilité physique. Celle-ci implique la correspondance géométrique et la stabilité interfaciale des microstructures de tungstène et de cuivre, ce qui a un impact direct sur les propriétés mécaniques et la fiabilité à long terme de l'électrode. La compatibilité structurelle se reflète principalement dans la coordination entre la structure de tungstène et la phase de remplissage de cuivre, obtenue par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide. En métallurgie des poudres, de la poudre de tungstène (généralement de 5 à 20 microns) et de la poudre de cuivre sont mélangées selon un rapport spécifique (par exemple, WCu 70/30) et pressées pour former un corps cru. Lors du frittage, le cuivre, en phase liquide, mouille les particules de tungstène et remplit les pores, formant une structure composite avec le tungstène comme structure continue et le cuivre comme phase dispersée. Le processus d'infiltration sous vide crée d'abord une structure poreuse de tungstène. La structure en tungstène est ensuite chauffée sous vide jusqu'à une température supérieure au point de fusion du cuivre (1083 °C), permettant au cuivre liquide de s'infiltrer et de remplir les pores. Cela réduit considérablement la porosité (généralement inférieure à 1 %) et améliore la densité et la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

consistance du matériau. Les particules de tungstène sont réparties selon un motif polygonal irrégulier, le cuivre remplissant uniformément les espaces. L'interface est principalement imbriquée mécaniquement et diffuse, minimisant ainsi le risque de microfissures ou de délaminage. La compatibilité structurale se reflète également dans l'uniformité de la granulométrie et de la distribution des phases. La finesse des grains, obtenue grâce à l'introduction de poudre de nano-tungstène, améliore la résistance mécanique et la résistance à l'usure, atteignant une résistance à la compression supérieure à 1000 MPa et une dureté comprise entre 200 et 300 HV. Le réseau continu de phases de cuivre assure l'intégrité du chemin conducteur, réduisant ainsi la variabilité de la résistance. L'analyse microscopique montre que la distribution uniforme des phases améliore la stabilité globale de l'électrode. En usinage par électroérosion (EDM), l'uniformité structurale réduit la variabilité de la décharge, améliorant ainsi la précision d'usinage et la qualité de surface. Dans les boîtiers microélectroniques, la compatibilité structurale assure une liaison à faible contrainte avec les substrats en silicium (CTE d'environ 2,6 ppm/°C) ou en céramique, empêchant ainsi le gauchissement ou la fracture lors des cycles thermiques. Les essais mécaniques et la microscopie électronique à balayage ont démontré que la stabilité de la liaison interfaciale est essentielle à la compatibilité structurale, réduisant les défaillances dues aux contraintes thermiques ou mécaniques.

De plus, le procédé de fabrication est crucial pour la compatibilité structurale. Le procédé de pressage isostatique à chaud (CIC) utilise une pression omnidirectionnelle à haute température pour comprimer davantage les pores, améliorer la liaison interfaciale entre le tungstène et le cuivre et accroître la résistance à la fatigue du matériau. Les poudres ultrafines issues des nanotechnologies améliorent la résistance des joints de grains, les rendant ainsi adaptées aux électrodes de haute précision. L'optimisation de la compatibilité structurale implique également le contrôle de la granulométrie des poudres et l'ajustement des paramètres de frittage. Les futures innovations en matière de simulation dynamique et de procédés affineront encore la distribution des grains et réduiront la porosité à moins de 0,5 %, permettant ainsi des applications à géométries complexes ou à haute durabilité, telles que les composants aérospatiaux ou les électrodes de dispositifs 5G.

2.3.1.2 Compatibilité thermique

La compatibilité thermique des électrodes tungstène-cuivre est un élément clé de leur compatibilité physique. Cela implique la coordination de la dilatation et de la conductivité thermiques entre le tungstène et le cuivre, ce qui influence la stabilité et la fiabilité de l'électrode lors des cycles thermiques et des environnements à haute température. Le coefficient de dilatation thermique (CTE) du tungstène est de 4,5 ppm/°C, tandis que celui du cuivre est de 17 ppm/°C. Bien que la différence soit significative lorsqu'il est utilisé seul, en ajustant le rapport composite, le CTE des électrodes tungstène-cuivre peut être contrôlé à 6-8 ppm/°C. Cette valeur est similaire à celle des substrats en silicium (environ 2,6 ppm/°C) ou en céramique d'alumine (environ 7 ppm/°C). Cela réduit la concentration des contraintes pendant les cycles thermiques, empêchant ainsi le gauchissement ou la rupture du boîtier, et est particulièrement efficace dans les applications de conditionnement microélectronique et de capteurs haute température. L'obtention de la compatibilité thermique repose sur l'optimisation du rapport tungstène/ cuivre. Par exemple, un rapport WCu 85/15 offre de bonnes performances à haute température. Des simulations thermiques ont confirmé ses propriétés de faible contrainte, avec une dilatation thermique correspondant à 10 % près à celle du substrat de silicium.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La conductivité thermique est un autre élément clé de la compatibilité thermique. Le cuivre présente une conductivité thermique d'environ $400 \text{ W/ m} \cdot \text{K}$, supérieure à celle du tungstène ($174 \text{ W/ m} \cdot \text{K}$). La conductivité thermique d'une électrode composite tungstène-cuivre varie de 180 à $220 \text{ W/ m} \cdot \text{K}$. La phase cuivre domine la conduction thermique, tandis que la phase tungstène assure la stabilité thermique. En électroérosion, une conductivité thermique élevée disperse rapidement la chaleur de décharge (atteignant instantanément des températures de plusieurs milliers de $^{\circ}\text{C}$), évitant ainsi une surchauffe localisée de l'électrode susceptible d'entraîner une déformation ou des brûlures de la pièce et améliorant la qualité de surface. En soudage par résistance, une répartition uniforme de la chaleur réduit la zone affectée thermiquement (ZAT), améliorant ainsi la résistance et la durabilité du joint de soudure. La compatibilité thermique implique également des différences de points de fusion. Le point de fusion du tungstène (3422°C) et celui du cuivre (1083°C) sont harmonisés par frittage en phase liquide. Le cuivre remplit le squelette de tungstène à haute température, améliorant ainsi la stabilité thermique. Les données expérimentales montrent que la conductivité thermique du WCu 70/30 assure un fonctionnement stable à un courant de 200 A et une température de 300°C . L'introduction de grains fins grâce à la nanotechnologie optimise encore davantage la conduction thermique, réduisant la résistance thermique d'environ 15% .

La compatibilité thermique est également influencée par la microstructure. Une faible porosité et une distribution de phase uniforme réduisent la diffusion lors de la conduction thermique, tandis que la compression isostatique à chaud (CIC) améliore la conductivité thermique de l'interface. Les essais de fatigue thermique montrent que le taux de déformation des électrodes tungstène-cuivre lors de cycles thermiques de -50°C à 300°C est inférieur à $0,1\%$, démontrant ainsi leur excellente stabilité thermique. À l'avenir, grâce à la conception à gradient fonctionnel (où la teneur en tungstène diminue progressivement de l'intérieur vers la surface) ou à l'introduction de phases intermédiaires (comme le molybdène), la compatibilité thermique pourra être optimisée pour s'adapter à des différences de température encore plus importantes ou à des exigences de gestion thermique complexes, comme dans les capteurs de pression haute température ou les équipements électriques.

2.3.2 Synergie de performance des électrodes tungstène-cuivre

La performance synergétique des électrodes tungstène-cuivre est la manifestation ultime de leur mécanisme composite. Cette synergie implique les effets complémentaires du tungstène et du cuivre en termes de conductivité électrique, de conductivité thermique, de résistance mécanique et de durabilité, améliorant ainsi les performances globales de l'électrode dans diverses applications. Cette performance synergétique repose sur des procédés de fabrication optimisés, tels que la métallurgie des poudres et l'infiltration sous vide, afin d'assurer une distribution uniforme et une stabilité interfaciale entre le squelette de tungstène et la charge de cuivre. Le point de fusion élevé du tungstène (3422°C) lui confère une résistance aux températures élevées et à l'érosion par arc électrique, tandis que la conductivité électrique et thermique élevée du cuivre optimise les performances de gestion électrique et thermique. L'électrode composite tungstène-cuivre atteint un équilibre entre un coefficient de dilatation thermique de 6 à $8 \text{ ppm/}^{\circ}\text{C}$ et une conductivité thermique de 180 à $220 \text{ W/ m} \cdot \text{K}$, répondant ainsi aux exigences des boîtiers microélectroniques et des capteurs haute température. La faible porosité et la granulométrie fine de la microstructure améliorent la résistance mécanique et la résistance à l'usure, ce qui se traduit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

par une résistance à la compression supérieure à 1000 MPa et une dureté comprise entre 200 et 300 HV.

2.3.2.1 Synergie de la conductivité électrique et thermique

Les électrodes tungstène-cuivre sont une manifestation essentielle de leur synergie. Cette synergie résulte des propriétés électriques et thermiques complémentaires du tungstène et du cuivre, améliorant directement l'efficacité de l'électrode dans les applications d'électroérosion, de soudage et de microélectronique. La conductivité électrique est principalement assurée par la phase cuivre, qui présente une conductivité élevée de $5,8 \times 10^7$ S/m, formant un réseau conducteur continu assurant une transmission efficace du courant. Malgré la faible conductivité du tungstène dans les électrodes tungstène-cuivre, l'optimisation du rapport cuivre (par exemple, WCu) permet de réduire la conductivité. 70/30), la conductivité peut atteindre 80 à 90 % de celle du cuivre pur, répondant ainsi aux exigences de courant élevé de l'électroérosion et aux faibles résistances du soudage. La répartition uniforme de la phase de cuivre au sein de la microstructure réduit les irrégularités de résistance et améliore la stabilité de la décharge, notamment dans les applications d'usinage de précision telles que les micromoules. Les données expérimentales démontrent que le WCu 70/30 atteint une conductivité électrique proche de celle du cuivre pur sous courant élevé, permettant un usinage de haute précision et efficace.

La synergie entre conductivité thermique et conductivité électrique est étroitement liée. Le cuivre présente une conductivité thermique d'environ $400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, nettement supérieure à celle du tungstène ($174 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). La conductivité thermique de l'électrode composite tungstène-cuivre varie de 180 à $220 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. La phase cuivre domine le transfert thermique, tandis que la phase tungstène assure la stabilité thermique. En électroérosion, la conductivité thermique disperse rapidement la chaleur de décharge vers l'extérieur de l'électrode, évitant ainsi une surchauffe localisée susceptible d'entraîner une déformation ou des brûlures de la pièce. En soudage par résistance, la répartition uniforme de la chaleur réduit la zone affectée thermiquement (ZAT), améliorant ainsi la résistance et la durabilité du joint de soudure et maintenant la ZAT à $0,1 \text{ mm}$. Le point de fusion élevé du tungstène ($3422 \text{ }^\circ\text{C}$) garantit l'intégrité structurelle dans des conditions d'arc à haute température, tandis que le point de fusion bas du cuivre ($1083 \text{ }^\circ\text{C}$) améliore la continuité du chemin de conduction thermique grâce au remplissage en phase liquide. La conductivité thermique d'un rapport WCu de 85/15 assure un fonctionnement stable à $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cette performance synergétique se reflète également dans la combinaison d'un faible coefficient de dilatation thermique et d'une conductivité thermique élevée, ce qui réduit les contraintes thermiques et améliore la stabilité à long terme. La nanotechnologie introduit des grains fins ($< 5 \text{ microns}$), optimisant davantage le réseau de conductivité électrique et thermique, réduisant la résistance thermique et la résistance électrique d'environ 15% et 10% , respectivement, ce qui la rend adaptée à la dissipation thermique des puces haute puissance. Dans les applications pratiques, la performance synergétique des électrodes tungstène-cuivre excelle dans les contacts de commutation haute tension et les équipements 5G, notamment en maintenant la stabilité conductrice et l'efficacité de la gestion thermique à un courant de 500 A . À l'avenir, en ajustant le rapport tungstène-cuivre, en introduisant une phase intermédiaire (comme le molybdène) ou en modifiant la surface (comme le placage d'argent), l'effet synergétique pourra être amélioré pour s'adapter à des courants plus élevés ou à des exigences de gestion thermique complexes, comme dans les capteurs haute température ou les équipements de transmission de puissance.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3.2.2 Synergie entre la résistance aux hautes températures et la stabilité structurelle

Les électrodes tungstène-cuivre illustrent parfaitement leur synergie de performances. Cette synergie résulte des effets complémentaires du tungstène et du cuivre dans les environnements à haute température, garantissant la fiabilité et la longévité de l'électrode dans des conditions extrêmes. La résistance du tungstène aux hautes températures est principalement due au tungstène, dont le point de fusion est de 3 422 °C, le plus élevé de tous les métaux. Cette propriété permet aux électrodes tungstène-cuivre de résister à des chocs d'arc jusqu'à 3 000 °C lors de l'usinage par électroérosion (EDM) ou du soudage par résistance sans fusion ni déformation significatives. Dans les structures composites, le tungstène sert de matériau de squelette, formant un réseau à haute résistance et thermiquement stable, résistant aux contraintes thermiques à haute température. Dans les applications pratiques, telles que l'usinage de matériaux très durs (comme l'acier au tungstène) ou la déconnexion à courant élevé, la résistance du tungstène aux hautes températures garantit l'intégrité de la surface de l'électrode, réduisant ainsi l'ablation et les pertes de matière.

La synergie entre la stabilité structurelle et l'optimisation de la microstructure repose sur le remplissage en cuivre. Le cuivre a un point de fusion de 1083 °C. Lors du frittage ou de l'infiltration sous vide, il remplit le squelette de tungstène sous forme liquide, augmentant ainsi la densité du matériau. La porosité est généralement contrôlée à moins de 1 %. Cette structure à faible porosité réduit le risque de microfissures lors des cycles thermiques. La ductilité de la phase de cuivre absorbe les contraintes thermiques et prévient les ruptures fragiles. Dans la microstructure, la répartition uniforme des particules de tungstène et de cuivre est obtenue par métallurgie des poudres ou par pressage isostatique à chaud (CIC). La finesse des grains améliore la résistance à la fatigue et la résistance à la compression peut atteindre plus de 1000 MPa.

La synergie entre résistance aux hautes températures et stabilité structurelle se reflète également dans l'adaptation de la dilatation thermique. Le faible coefficient de dilatation thermique du tungstène est ajusté proportionnellement à celui élevé du cuivre, ce qui se traduit par un CTE composite de 6 à 8 ppm/°C, proche de celui du silicium (2,6 ppm/°C) ou des substrats céramiques, réduisant ainsi la concentration des contraintes thermiques. Dans les boîtiers microélectroniques, cette propriété empêche la déformation entre la puce et les électrodes ; dans les capteurs haute température, elle permet un fonctionnement à haute température à long terme. Les traitements de surface (comme le nickelage) améliorent encore la résistance à l'oxydation et prolongent la durée de vie en environnements humides ou industriels.

2.4 Exigences relatives aux matières premières clés pour les électrodes en cuivre et tungstène

Exigences de pureté des matières premières

Matériau clé largement utilisé dans de nombreux domaines haut de gamme, la performance des électrodes tungstène-cuivre est étroitement liée à la qualité des matières premières clés utilisées : la poudre de tungstène et la poudre de cuivre. La haute pureté des matières premières est essentielle pour garantir l'excellence des performances des électrodes tungstène-cuivre. Lors de la préparation des électrodes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungstène-cuivre, la pureté de la poudre de tungstène doit généralement dépasser 99,9 %. Même dans certaines applications exigeant des performances extrêmement élevées, comme l'usinage par électro-étincelage de haute précision, la pureté doit être supérieure. En effet, la présence d'impuretés, même à l'état de traces, peut former des défauts à l'intérieur de l'électrode et altérer l'uniformité de la structure du matériau. Par exemple, si la poudre de tungstène contient des éléments d'impureté tels que le fer et le nickel, ces impuretés peuvent réagir avec le tungstène et le cuivre lors du frittage à haute température pour former des phases cassantes, réduisant la résistance et la ténacité de l'électrode, la rendant sujette à la fissuration ou même à la rupture pendant l'utilisation.

De même, la pureté de la poudre de cuivre est cruciale. Une poudre de cuivre de haute qualité doit généralement être d'au moins 99,95 %. Une poudre de cuivre impure peut contenir des oxydes, de l'humidité ou d'autres impuretés, ce qui affecte gravement la conductivité et la ductilité du cuivre. Dans les électrodes tungstène-cuivre, le cuivre contribue principalement à une bonne conductivité électrique et thermique. Une poudre de cuivre impure réduit considérablement l'efficacité de ces conductivités. Par exemple, lorsqu'elle contient beaucoup d'oxyde de cuivre, sa résistivité est bien supérieure à celle du cuivre pur, ce qui augmente considérablement la résistance de l'électrode et diminue l'efficacité de conversion de l'énergie électrique en énergie thermique dans des applications telles que l'usinage par électro-étincelage. Cela affecte non seulement l'efficacité de l'usinage, mais peut également provoquer une surchauffe locale de l'électrode et accélérer sa perte.

Contrôle de la taille des particules et de leur distribution

Outre la pureté, la granulométrie et la distribution des poudres de tungstène et de cuivre sont des facteurs clés affectant les performances des électrodes tungstène-cuivre. La granulométrie doit être sélectionnée avec précision en fonction des différents procédés de préparation et des applications finales. Dans le procédé conventionnel de métallurgie des poudres pour la préparation des électrodes tungstène-cuivre, la granulométrie de la poudre de tungstène est généralement contrôlée entre 1 et 10 μm . Une poudre de tungstène plus fine peut augmenter la surface de contact entre le tungstène et le cuivre, favoriser la diffusion et la fusion entre les éléments lors du frittage, et faciliter la formation d'une microstructure plus uniforme et plus dense, améliorant ainsi la résistance et la dureté de l'électrode, la rendant ainsi plus adaptée au traitement des matériaux à haute dureté. Cependant, une poudre de tungstène trop fine peut également entraîner des problèmes, tels qu'une mauvaise fluidité, rendant difficile une répartition uniforme lors du mélange et du moulage de la poudre, et conduisant facilement à une densité inégale dans le corps cru. Bien que la poudre de tungstène plus grossière ait une meilleure fluidité, elle rendra les pores internes de l'électrode frittée relativement plus grands, réduisant la densité et affectant les performances globales de l'électrode.

La poudre de cuivre présente généralement des particules relativement fines. En effet, son point de fusion plus bas facilite le remplissage des espaces entre les particules de tungstène lors du frittage. Une poudre de cuivre de granulométrie appropriée assure une bonne mouillabilité tout en formant une interface stable avec le tungstène. Par exemple, dans les électrodes d'électroérosion, si la granulométrie de la poudre de cuivre est appropriée, lorsque l'électrode chauffe localement pendant la décharge, le cuivre peut rapidement évacuer la chaleur, évitant ainsi une usure excessive due à une surchauffe locale.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

De plus, l'uniformité de la distribution granulométrique est cruciale. Idéalement, les poudres de tungstène et de cuivre devraient avoir une distribution granulométrique étroite. Si la distribution granulométrique est trop large, des particules de différentes tailles peuvent facilement se séparer lors du mélange, ce qui entraîne une composition et des performances inégales du matériau d'électrode final. Par exemple, les zones où sont concentrées de grosses particules de poudre de tungstène peuvent présenter une dureté élevée mais une ténacité insuffisante, tandis que les zones où sont concentrées de petites particules peuvent manquer de densité, ce qui entraîne des performances insuffisantes à l'utilisation.

Influence globale des caractéristiques des matières premières sur les performances des électrodes

Les propriétés intrinsèques du tungstène et du cuivre jouent un rôle déterminant dans les performances des électrodes tungstène-cuivre. Le point de fusion extrêmement élevé (3 410 °C) et la dureté du tungstène confèrent aux électrodes tungstène-cuivre une excellente résistance aux températures élevées et à l'usure. Dans les environnements à haute température, comme lors du fonctionnement des électrodes à tube à décharge haute tension, où la température instantanée du matériau de contact peut atteindre des milliers de degrés Celsius, le tungstène préserve la forme et l'intégrité structurelle de l'électrode, empêchant ainsi le ramollissement et la déformation dus aux températures élevées. De plus, sa dureté élevée rend l'électrode moins sensible à l'usure lors de l'usinage de pièces très dures, comme l'électroérosion de moules en carbure, garantissant ainsi la précision de l'usinage.

Le cuivre, grâce à son excellente conductivité électrique et thermique, confère aux électrodes tungstène-cuivre les avantages d'une dissipation thermique rapide et d'une conduction électrique efficace. Lors de l'électroérosion, les décharges fréquentes entre l'électrode et la pièce génèrent une grande quantité de chaleur. Le cuivre peut rapidement évacuer cette chaleur, abaissant ainsi la température de l'électrode, réduisant la déformation et la fatigue thermiques, et prolongeant ainsi sa durée de vie. Une bonne conductivité électrique assure un processus de décharge stable et améliore l'efficacité de l'usinage. Lorsque la poudre de tungstène et la poudre de cuivre sont mélangées dans un certain rapport, les deux se complètent et agissent en synergie pour déterminer les performances de l'électrode tungstène-cuivre. Un rapport tungstène-cuivre adapté assure un équilibre optimal entre résistance, dureté, conductivité électrique et thermique, et résistance à l'ablation. Par exemple, les électrodes de soudage par résistance nécessitent généralement une dureté et une conductivité plus élevées, et la teneur en tungstène peut être augmentée en conséquence.

2.4.1 Exigences relatives à la poudre de tungstène

Les électrodes tungstène-cuivre sont essentielles pour garantir la stabilité structurelle et les performances lors du procédé composite. Ces exigences concernent la pureté, la granulométrie et la morphologie. La pureté est primordiale, exigeant une teneur en impuretés inférieure à 0,1 %, notamment en oxygène, carbone et fer. Un excès d'impuretés peut fragiliser les joints de grains et réduire la conductivité, impactant ainsi les performances de l'électrode. Les normes internationales telles que l'ASTM B702 stipulent que la poudre de tungstène de haute pureté doit être produite par réduction à l'hydrogène ou précipitation chimique, avec une teneur en oxygène inférieure à 0,05 %. La granulométrie est un autre paramètre clé. Elle varie généralement de 1 à 20 microns. Des particules fines sont introduites par

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nanotechnologie pour améliorer l'uniformité du grain et la résistance mécanique, tandis que des particules grossières (> 20 microns) sont utilisées pour le traitement grossier des électrodes. Le choix de la granulométrie dépend de l'application. La morphologie nécessite une poudre de tungstène sphérique ou quasi-sphérique pour réduire la porosité et augmenter la densité frittée. L'analyse par microscopie électronique à balayage montre que les poudres sphériques présentent une meilleure fluidité que les poudres irrégulières et améliorent l'efficacité de remplissage d'environ 15 %. La stabilité chimique exige que la poudre de tungstène résiste aux environnements acides et alcalins afin d'éviter l'oxydation pendant le processus de préparation, et que l'épaisseur de la couche d'oxyde de surface soit contrôlée en dessous de 10 nm. La fluidité, mesurée par la méthode du débit à effet Hall, est supérieure à 20 s/50 g, garantissant un mélange uniforme de la poudre. La masse volumique apparente de la poudre de tungstène affecte la compaction et doit être adaptée à celle de la poudre de cuivre pour réduire le risque de délaminage. Des procédés de préparation tels que la sphéroïdisation par plasma ou l'alliage mécanique peuvent optimiser la distribution granulométrique. À l'avenir, les poudres de nano-tungstène de haute pureté pourront améliorer la consistance microstructurale des électrodes, les rendant ainsi adaptées à des applications de haute précision telles que le packaging microélectronique et les dispositifs 5G.

2.4.2 Exigences relatives à la poudre de cuivre

Les électrodes tungstène-cuivre se concentrent sur leurs propriétés de conductivité et de remplissage, garantissant les capacités de gestion électrique et thermique du matériau composite. La pureté est une exigence fondamentale. La teneur en impuretés de la poudre de cuivre doit être inférieure à 0,05 % et la teneur en oxygène doit être maintenue inférieure à 0,03 %. Un excès d'oxygène peut entraîner la formation d'oxyde de cuivre, réduisant ainsi la conductivité et la mouillabilité. La poudre de cuivre électrolytique, ou poudre de cuivre atomisée, est préparée par atomisation d'un électrolyte de haute pureté ou d'un gaz inerte et est conforme à la norme ASTM B413. La granulométrie est généralement comprise entre 5 et 15 microns. Une granulométrie fine améliore l'efficacité du remplissage, tandis qu'une granulométrie grossière est adaptée au frittage rapide. Elle doit être adaptée à la granulométrie de la poudre de tungstène et le rapport granulométrique doit être maintenu entre 1:2 et 1:3 pour optimiser la distribution des phases.

La poudre de cuivre doit être sphérique ou quasi sphérique afin de minimiser la porosité et d'améliorer la fluidité. Le débit d'écoulement par effet Hall doit être supérieur à 15 s/50 g, la masse volumique apparente doit être d'environ 4 à 6 g/cm³ et la poudre doit être compactée de manière coordonnée avec la poudre de tungstène. La stabilité chimique nécessite une couche d'oxyde superficielle de moins de 5 nm d'épaisseur afin d'empêcher la formation de pores pendant le frittage. Un traitement de surface (tel qu'un revêtement organique) peut améliorer la résistance à l'oxydation. La conductivité électrique doit être proche de celle du cuivre pur ($5,8 \times 10^7$ S/m) et la conductivité thermique doit être d'environ 400 W/m·K pour garantir les performances de l'électrode. Les procédés de préparation, tels que l'atomisation à l'eau ou au gaz, peuvent influencer les propriétés de la poudre.

2.4.3 Normes de prétraitement des matières premières

Les électrodes tungstène-cuivre sont conçues pour assurer un mélange uniforme des poudres et des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

processus de préparation contrôlables, ce qui a un impact direct sur la qualité du matériau composite. Le séchage est une étape cruciale. Les poudres de tungstène et de cuivre doivent être séchées sous vide ou sous gaz inerte (comme l'argon) afin d'éviter la formation de pores lors du frittage. L'uniformité du mélange est obtenue à l'aide d'un broyeur à boulets ou d'un mélangeur en V. La distribution granulométrique après mélange est contrôlée à $\pm 5\%$, et la diffraction des rayons X (DRX) vérifie la cohérence des phases.

La classification granulométrique est réalisée par tamisage. La taille du tamis est ajustée aux exigences granulométriques afin d'éliminer les particules surdimensionnées ou ultrafines. L'écart type de la distribution granulométrique est inférieur à 10 %. Le traitement de surface comprend une désoxydation ou un revêtement, et la couche d'oxyde est éliminée par réduction à l'hydrogène. La fluidité de la poudre est testée selon la méthode du débit de Hall, avec une valeur supérieure à 20 s/50 g, garantissant un pressage uniforme. Le stockage et le transport nécessitent un emballage hermétique, à l'abri de la lumière et de l'humidité, pour éviter l'oxydation. Les normes de prétraitement doivent être conformes aux normes ISO 13320 et ASTM B214. À l'avenir, le calibrage automatisé et la surveillance en temps réel amélioreront la précision du prétraitement et optimiseront les performances des électrodes.



Électrode en cuivre et tungstène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm ³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

Resistance Welding Electrodes: Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

Repair Welding Electrodes: Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes: Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

High-Voltage Discharge Tube Electrodes: This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 3 : Propriétés physiques et chimiques des électrodes tungstène-cuivre

Les propriétés physiques et chimiques des électrodes tungstène-cuivre découlent de la synergie du tungstène et du cuivre, combinant les avantages fondamentaux des deux métaux. Physiquement, leur densité augmente avec la teneur en tungstène et se maintient à un niveau élevé. Le point de fusion est maintenu à un niveau élevé grâce à la haute température du tungstène, bien supérieure à celle du cuivre pur, et il résiste aux chocs thermiques instantanés dans des environnements à haute température sans se déformer facilement. Ses excellentes conductivités électrique et thermique permettent une conduction efficace du courant et une dissipation rapide de la chaleur générée pendant le travail, évitant ainsi les pertes dues à une surchauffe locale. Mécaniquement, elles présentent une dureté modérée et une résistance élevée à la compression, tout en conservant une certaine ténacité. Elles ne se rompent pas facilement sous l'effet d'un choc mécanique. De plus, leur coefficient de dilatation linéaire est faible et leur stabilité thermique est excellente. Même dans des environnements soumis à de fortes variations de température, leurs dimensions restent stables, ce qui les rend idéales pour l'usinage de précision exigeant une précision rigoureuse.

3.1 Propriétés physiques de l'électrode tungstène-cuivre

Les électrodes tungstène-cuivre, qui combinent densité, coefficient de dilatation thermique, conductivité électrique et conductivité thermique, constituent la base de leurs performances supérieures dans un large éventail d'applications. Ces propriétés ont un impact direct sur la stabilité et l'efficacité de l'électrode en électroérosion, soudage et encapsulation microélectronique. Les propriétés physiques des électrodes tungstène-cuivre découlent de la combinaison des propriétés du tungstène et du cuivre : le tungstène offre un point de fusion et une résistance mécanique élevés, tandis que le cuivre contribue à une conductivité électrique et thermique élevée. L'optimisation de la microstructure par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide permet d'obtenir une distribution de phase uniforme et une faible porosité. Cette combinaison de performances permet aux électrodes tungstène-cuivre de maintenir leur fiabilité à hautes températures, courants élevés et environnements complexes.

3.1.1 Densité de l'électrode tungstène-cuivre

Les électrodes tungstène-cuivre sont un indicateur important de leurs propriétés physiques. Elles reflètent la densité et la porosité du matériau et influencent directement sa résistance mécanique, sa conductivité électrique et sa conductivité thermique. Les caractéristiques de densité découlent du rapport composite tungstène-cuivre et de l'optimisation du procédé de préparation. La densité élevée du tungstène et la densité plus faible du cuivre sont équilibrées par un rapport spécifique pour former un matériau composite aux propriétés massiques et volumiques spécifiques. La densité détermine la résistance à l'usure et à la déformation de l'électrode pendant le traitement. Dans les applications microélectroniques, une densité appropriée permet d'adapter le substrat et de réduire la concentration de contraintes. Les procédés de préparation tels que la métallurgie des poudres et l'infiltration sous vide influencent significativement l'uniformité de la densité finale en contrôlant la température et la pression de frittage. Une faible porosité correspond généralement à des valeurs de densité plus élevées, améliorant ainsi les performances globales du matériau.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La mesure et le contrôle de la densité sont essentiels à la production d'électrodes tungstène-cuivre, car ils influencent leurs performances dans des applications pratiques, telles que le taux d'enlèvement de matière en usinage par électro-étincelage ou l'efficacité de la gestion thermique en soudage. Différents scénarios d'application peuvent nécessiter un ajustement du rapport tungstène-cuivre afin d'optimiser les caractéristiques de densité. Par exemple, les électrodes à haute densité sont plus adaptées aux scénarios exigeant une durabilité élevée, tandis que les électrodes à faible densité peuvent être utilisées pour des conceptions légères. La distribution des phases et la compacité de la microstructure sont des facteurs clés des performances de densité, et des recherches futures pourraient améliorer encore la contrôlabilité de la densité grâce à de nouveaux procédés. Cette section explorera plus en détail les méthodes de calcul de la densité et analysera leur rôle dans l'optimisation des performances.

3.1.1.1 Méthode de calcul de la densité

Le calcul de la masse volumique est une approche scientifique permettant de déterminer la masse volumique des électrodes tungstène-cuivre. Il implique des mesures expérimentales et des dérivations théoriques, visant à évaluer avec précision la compacité et la porosité internes du matériau. Une méthode couramment utilisée est la méthode d'Archimède, qui mesure la différence de masse entre l'électrode dans l'air et dans le liquide, puis la combine avec le volume pour calculer la masse volumique. Cette méthode exploite la flottabilité d'un objet dans un liquide. La masse sèche de l'électrode est d'abord pesée, puis immergée dans un liquide spécifique (comme de l'eau distillée). La différence de masse après immersion est mesurée et le volume est calculé indirectement à l'aide de la formule de flottabilité. La masse volumique est ensuite calculée comme le rapport masse/volume. Cette méthode convient aux échantillons d'électrodes de forme irrégulière. Il est important de s'assurer que le liquide ne réagit pas chimiquement avec le matériau et de contrôler la température afin de minimiser les erreurs.

Une autre approche est le calcul théorique, qui utilise des règles de mélange pour estimer la masse volumique globale du matériau composite à partir des fractions volumiques et des masses volumiques respectives du tungstène et du cuivre. Cette méthode nécessite des données précises sur le rapport des composants et suppose que le tungstène et le cuivre ne subissent pas de variations de volume significatives au cours du processus de fabrication du composite. La masse volumique est une moyenne pondérée des masses volumiques des composants. Le calcul doit tenir compte de l'uniformité de la distribution des phases. Les valeurs mesurées réelles peuvent s'écarter des valeurs théoriques en raison de la porosité ou de défauts microscopiques, nécessitant une correction par analyse microscopique. Les calculs théoriques conviennent à la conception préliminaire et à l'optimisation du procédé, mais les résultats expérimentaux doivent être vérifiés.

De plus, la tomographie à rayons X (XCT) ou l'analyse par pénétration de mercure peuvent être utilisées pour des contrôles non destructifs de la porosité et de la distribution de densité des électrodes. Ces méthodes évaluent la densité de la structure interne par reconstruction d'image ou analyse par pénétration de pression et conviennent aux électrodes à géométrie complexe. Le choix de la méthode de calcul dépend des conditions expérimentales et des exigences de précision, et plusieurs méthodes sont souvent combinées pour améliorer la fiabilité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1.1.2 Relation entre la densité et la composition

La relation entre densité et composition est essentielle à la compréhension des propriétés physiques des électrodes tungstène-cuivre, reflétant l'influence du rapport tungstène/cuivre sur la densité et la distribution massique du matériau. La densité des électrodes tungstène-cuivre est principalement déterminée par le rapport de leurs composants. Le tungstène a une densité plus élevée que le cuivre. Une augmentation de la teneur en tungstène entraîne généralement une augmentation de la densité globale, tandis que la faible densité du cuivre joue un rôle diluant dans les rapports à forte teneur en cuivre. Le rapport de composition est contrôlé avec précision par la métallurgie des poudres ou par des procédés d'infiltration sous vide. Par exemple, dans les rapports courants WCu 70/30 et WCu 80/20, les caractéristiques de densité élevée du tungstène dominent, tandis que l'effet de remplissage du cuivre optimise l'uniformité de la microstructure. Les variations de composition affectent directement la distribution des phases. Le tungstène assure le support structurel en tant que matériau squelette, et le cuivre remplit les pores sous forme de phase liquide. Le réglage du rapport modifie la porosité et la densité du matériau, affectant ainsi les performances de densité.

La dépendance de la densité à la composition est également étroitement liée au procédé de préparation. En métallurgie des poudres, le rapport granulométrique et l'uniformité du mélange de poudres de tungstène et de cuivre déterminent l'uniformité de la distribution des composants. La température et la pression de frittage influencent également l'effet de mouillage et de remplissage du cuivre, affectant ainsi la densité finale. En infiltration sous vide, la porosité du squelette de tungstène et la profondeur de pénétration du cuivre sont directement liées au rapport de composition. Une teneur élevée en tungstène peut entraîner un remplissage insuffisant des pores et réduire la densité, tandis qu'une teneur élevée en cuivre améliore l'efficacité du remplissage. L'analyse microstructurale montre que de légères variations du rapport de composition entraînent des différences dans la zone d'interface de phase, affectant la densité globale du matériau. En théorie, la relation entre densité et composition peut être déduite d'un modèle de moyenne pondérée, où la contribution de la densité de chaque composant est pondérée par la fraction volumique. Cependant, la valeur réelle est affectée par la porosité et la liaison à l'interface et doit être vérifiée expérimentalement.

De plus, la relation entre composition et densité est également affectée par les impuretés et les additifs. De faibles quantités d'impuretés peuvent altérer les propriétés interfaciales et affecter la stabilité de la densité. Les exigences en matière de composition et de densité varient selon les applications. Par exemple, les électrodes haute densité sont plus adaptées aux applications résistantes à l'usure, tandis que les électrodes basse densité sont utilisées pour les conceptions légères.

3.1.1.3 Impact de la densité sur les applications

La densité est l'un des principaux paramètres de performance des électrodes tungstène-cuivre. Son niveau et sa répartition déterminent directement l'applicabilité, la stabilité et l'efficacité de l'électrode dans différents scénarios d'application. En particulier dans les domaines haut de gamme tels que l'électroérosion, le soudage et le conditionnement microélectronique, de légères différences de densité peuvent entraîner d'importantes fluctuations de performance, affectant ainsi l'efficacité globale du

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

procédé.

1. La relation entre la densité et les propriétés mécaniques et leur impact sur l'application

Les électrodes en tungstène-cuivre présentent une corrélation positive avec leur résistance mécanique et leur résistance à l'usure. Les électrodes haute densité présentent une porosité interne extrêmement faible, et les particules de tungstène et les phases de cuivre sont étroitement liées pour former une microstructure dense. Cela permet au matériau de répartir uniformément les contraintes lorsqu'il est soumis à une force externe ou à un choc thermique, réduisant ainsi le risque de fracture ou de déformation locale. Cette caractéristique est particulièrement cruciale en électroérosion : la décharge haute fréquence entre l'électrode et la pièce génère instantanément une température élevée et un choc mécanique. Grâce à leur résistance à la compression et à la déformation supérieures, les électrodes haute densité peuvent supporter efficacement la force d'impact pendant le processus de décharge, réduire les marques d'ablation de surface et limiter le risque d'effondrement local dû à une structure lâche. Par exemple, pour l'usinage de précision de matériaux à haute résistance tels que l'acier moulé, les électrodes en tungstène-cuivre haute densité permettent de maintenir une forme stable et précise et d'assurer un espace de décharge uniforme, améliorant ainsi l'état de surface et la précision dimensionnelle de la pièce, tout en prolongeant la durée de vie d'une électrode.

En revanche, les électrodes à faible densité présentent davantage de pores, ce qui réduit la surface d'interface entre le tungstène et le cuivre et diminue la résistance globale à l'usure du matériau. Ce type d'électrode est plus adapté aux tâches d'usinage à faible charge et à cycle court, comme l'usinage par électroérosion de petites pièces en plastique, qui présente des exigences relativement faibles en termes de précision et de durabilité. L'avantage économique des électrodes à faible densité se reflète également. Cependant, dans les scénarios d'usinage à haute énergie et à long terme, les pores des électrodes à faible densité deviennent des points de concentration de contraintes. À mesure que le temps d'usinage augmente, des microfissures sont susceptibles de se former autour des pores, entraînant à terme une défaillance de l'électrode, augmentant ainsi la fréquence de remplacement et les coûts de production.

2. Impact de la densité sur la conductivité thermique et l'optimisation des procédés

La densité est le facteur clé influençant la conductivité thermique des électrodes en cuivre tungstène. Une densité élevée correspond généralement à une meilleure conductivité thermique. À l'intérieur du matériau, la phase de cuivre sert de principal conducteur thermique, et la continuité de sa distribution dépend directement de la densité du matériau : dans les électrodes haute densité, la phase de cuivre peut combler plus uniformément les espaces entre les particules de tungstène, formant ainsi un réseau de conductivité thermique continu. La chaleur générée dans la zone de traitement (comme la température instantanée élevée lors d'une décharge électrique) peut ainsi se diffuser rapidement à l'intérieur de l'électrode et être évacuée par l'équipement, réduisant ainsi le risque de surchauffe locale. Cette capacité de dissipation thermique efficace est cruciale pour la précision de l'usinage : l'accumulation de chaleur à la surface de l'électrode provoque une augmentation soudaine de la température locale, ce qui peut non seulement faire fondre ou évaporer le matériau de surface de l'électrode, entraînant une perte de taille de l'électrode, mais aussi affecter la stabilité de la décharge et provoquer des défauts tels que des brûlures

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

et des fissures à la surface de la pièce. Par exemple, dans le traitement de précision de surfaces courbes complexes telles que les pales de moteurs d'avion, les caractéristiques de dissipation thermique efficaces des électrodes en cuivre tungstène haute densité peuvent assurer la stabilité de la température pendant le traitement à long terme, maintenir la cohérence des paramètres de décharge et, en fin de compte, réaliser un formage de haute précision de la pièce.

Les électrodes à faible densité présentent une distribution discontinue de la phase de cuivre, et les pores entravent la conduction thermique, formant une « zone de résistance thermique » et réduisant l'efficacité de la dissipation thermique. Dans les applications à faible puissance, ce défaut peut ne pas être évident, mais dans l'électroérosion à haute énergie (comme l'usinage d'ébauche de grands moules), l'accumulation de chaleur augmente considérablement l'usure des électrodes, obligeant le procédé à réduire l'énergie de décharge pour éviter la surchauffe, ce qui réduit indirectement l'efficacité du procédé. Par conséquent, dans les applications exigeant une dissipation thermique rigoureuse, les électrodes à haute densité constituent un choix essentiel pour améliorer la stabilité du procédé.

3. Rôles multiples de la densité dans les applications de soudage

Dans le domaine du soudage, la densité des électrodes en cuivre tungstène détermine directement la qualité et l'efficacité du soudage en affectant la conductivité électrique et les capacités de gestion thermique. Les électrodes haute densité présentent une distribution continue des phases de cuivre et des valeurs de résistance plus faibles, ce qui permet d'assurer un chemin de transmission du courant stable pour le processus de soudage et de réduire la chaleur de résistance générée par une résistance excessive. Cette chaleur supplémentaire non seulement gaspille de l'énergie, mais peut également provoquer une surchauffe et une déformation de l'électrode, affectant ainsi la stabilité du contact entre l'électrode et la pièce. Par exemple, pour le soudage par points par résistance des carrosseries automobiles, les électrodes en cuivre tungstène haute densité permettent de maintenir un courant de sortie stable à des courants élevés, assurant ainsi la concentration de la chaleur et la formation de pépites au point de soudure, évitant ainsi les défauts tels que les soudures froides ou les pénétrations de soudure. Dans les procédés de soudage continus comme le soudage à la molette, leur excellente conductivité électrique permet également de réduire les fluctuations de courant et d'assurer l'uniformité de la soudure.

La relation entre densité et poids de l'électrode a également un impact sur l'équipement de soudage. Les électrodes haute densité sont plus lourdes et conviennent aux équipements de soudage automatisés fixes : les bras robotisés ou les fixations de ces équipements offrent une forte capacité de charge, et les contrepoids peuvent être ajustés pour assurer un contact précis entre l'électrode et la pièce. Cependant, dans les équipements de soudage portables (tels que les pistolets de soudage par points portatifs), des électrodes trop lourdes augmentent la charge de travail de l'opérateur. Dans ce cas, l'avantage de légèreté des électrodes faible densité est plus évident. Leur conception doit équilibrer poids et performances, généralement en optimisant le rapport tungstène-cuivre afin de réduire la densité tout en préservant au maximum la conductivité électrique et thermique du cœur.

De plus, les cycles thermiques pendant le soudage imposent des exigences particulières en matière de densité des électrodes. Grâce à leur structure dense et à leur dilatation thermique plus uniforme, les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

électrodes haute densité sont moins sujettes aux fissures dues à la concentration des contraintes internes lors des chauffages et refroidissements répétés, ce qui les rend adaptées aux applications de soudage haute fréquence (comme le soudage par lots sur les lignes de production d'appareils électroménagers). En revanche, les électrodes basse densité peuvent subir un décollement superficiel après un cycle thermique prolongé en raison de la concentration des contraintes autour des pores, ce qui réduit leur durée de vie.

4. La relation entre la densité et la fiabilité dans les emballages microélectroniques

Le conditionnement microélectronique impose des exigences encore plus strictes en matière de densité des électrodes tungstène-cuivre. L'exigence principale est d'obtenir une adaptation de la dilatation thermique et une stabilité mécanique entre l'électrode et le substrat. Dans le conditionnement de puces, les électrodes doivent être étroitement liées à des matériaux tels que les plaquettes de silicium et les substrats céramiques. Cependant, chaque matériau présente des coefficients de dilatation thermique différents. Une densité d'électrode trop élevée peut entraîner un écart significatif entre son coefficient de dilatation thermique global et celui du substrat. Lors des cycles de température, des contraintes importantes sont générées à l'interface entre l'électrode et le substrat. Une accumulation à long terme peut entraîner des fissures de soudure, des ruptures de circuit, voire une défaillance du conditionnement. Par conséquent, les électrodes tungstène-cuivre pour le conditionnement microélectronique doivent contrôler précisément la densité afin d'ajuster le coefficient de dilatation thermique à une plage proche de celle du substrat. Des conceptions de densité moyenne à élevée sont généralement utilisées, garantissant à la fois une densité structurelle pour la transmission du courant et une atténuation des contraintes thermiques grâce à une répartition optimisée des pores (par exemple, un petit nombre de micropores uniformément répartis) pour garantir une fiabilité à long terme. Parallèlement, la stabilité mécanique des électrodes haute densité est essentielle dans le packaging microélectronique. Lors du packaging des puces, les électrodes doivent résister aux contraintes mécaniques liées au collage, à l'encapsulation et aux autres processus. La résistance élevée à la compression des électrodes haute densité prévient toute déformation ou rupture due à des forces externes, garantissant un alignement précis entre les électrodes et les broches de la puce. Cependant, les électrodes basse densité présentant une répartition inégale des pores peuvent subir un affaissement localisé sous la pression de collage, affectant la stabilité de la connexion électrique. Par exemple, dans le packaging haute fréquence des puces 5G, même une légère déformation des électrodes peut entraîner une augmentation des pertes de transmission du signal.

5. Impact de la densité sur les coûts de fabrication et adaptation des scénarios

La densité est également directement liée au coût de fabrication et à la difficulté de mise en œuvre des électrodes en cuivre tungstène. La production d'électrodes haute densité nécessite des pressions de frittage plus élevées, des temps de maintien plus longs et même des procédés de pressurisation secondaire pour réduire la porosité interne, ce qui augmente indéniablement la consommation énergétique des équipements et les cycles de production. Parallèlement, la mise en œuvre des matériaux haute densité (comme le meulage de précision et la découpe au fil) est plus difficile et l'usure des outils est plus rapide, ce qui augmente encore les coûts de fabrication. Cependant, dans les applications haut de gamme (comme l'usinage de composants de précision pour moteurs aérospatiaux), ses avantages en termes de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

performances suffisent à compenser la hausse des coûts. Les pertes dues aux pannes d'équipement ou aux mises au rebut sont bien supérieures au coût de l'électrode, et la durabilité des électrodes haute densité devient le choix privilégié. Le procédé de production des électrodes basse densité est relativement simple. Des pressions de frittage plus faibles et des temps de mise en œuvre plus courts peuvent réduire les coûts, mais ses limitations de performances le rendent plus adapté aux scénarios sensibles aux coûts qui n'exigent pas de performances extrêmes (comme le soudage de composants bas de gamme pour l'électronique grand public). De plus, des industries spécifiques ont des exigences personnalisées en matière de densité : afin de réduire le poids global, les équipements aérospatiaux ont tendance à choisir des électrodes en tungstène-cuivre à faible densité dans les composants non centraux et à conserver la résistance nécessaire tout en réduisant le poids grâce à la conception structurelle ; tandis que les électrodes des équipements nucléaires nécessitent une conception à haute densité pour résister au vieillissement des matériaux et à la corrosion dans les environnements de rayonnement et assurer un fonctionnement stable à long terme.

3.1.2 Propriétés thermiques des électrodes en cuivre tungstène

Les propriétés thermiques des électrodes tungstène-cuivre sont un élément important de leurs propriétés physiques. Elles incluent la conductivité thermique, le coefficient de dilatation thermique et la résistance aux hautes températures, qui influencent directement les performances de l'électrode dans les environnements à haute température et les cycles thermiques. La conductivité thermique est principalement assurée par la phase de cuivre. La conductivité thermique élevée du cuivre assure un transfert rapide de la chaleur de la zone de traitement ou d'opération vers l'extérieur, réduisant ainsi les températures locales et prévenant la surchauffe, la déformation ou l'endommagement de la pièce. La conductivité thermique modérée du tungstène et l'effet synergique de la phase de cuivre constituent les capacités globales de gestion thermique du matériau composite, adapté aux scénarios de charges thermiques élevées en électroérosion et en soudage. Les propriétés thermiques incluent également le coefficient de dilatation thermique. La faible dilatation thermique du tungstène et la forte dilatation thermique du cuivre sont équilibrées par un ajustement proportionnel. Le coefficient de dilatation thermique du composite correspond à celui de divers substrats afin de réduire les contraintes thermiques.

La résistance aux hautes températures est au cœur des performances thermiques. Le point de fusion élevé du tungstène confère à l'électrode une stabilité à des températures extrêmement élevées. La phase de cuivre remplit les pores sous forme liquide à haute température, améliorant ainsi la stabilité thermique et la rendant adaptée aux environnements d'arc. La faible porosité et la distribution uniforme des phases dans la microstructure optimisent encore davantage la conduction thermique, et le procédé de pressage isostatique à chaud améliore la conductivité thermique de l'interface. Les essais de fatigue thermique montrent que les électrodes tungstène-cuivre conservent leur intégrité structurelle sur une large plage de températures, ce qui les rend idéales pour les applications de conditionnement et de capteurs microélectroniques.

3.1.2.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique est l'indicateur clé de la performance thermique des électrodes tungstène-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cuivre. Elle reflète la capacité du matériau à transférer la chaleur et influence directement ses performances dans les applications à forte charge thermique. La conductivité thermique est principalement assurée par la phase de cuivre. La conductivité thermique élevée du cuivre assure un transfert rapide de la chaleur de la zone d'usinage vers l'extérieur, évitant ainsi toute déformation ou tout endommagement de la pièce dû à une surchauffe locale. La conductivité thermique modérée du tungstène et l'effet synergique de la phase de cuivre constituent la capacité globale de gestion thermique du matériau composite, adapté aux besoins de dissipation thermique des décharges à haute énergie de l'usinage par électro-étincelage. Lors du processus de préparation, la métallurgie des poudres ou l'infiltration sous vide optimisent la conduction thermique en contrôlant le rapport tungstène/cuivre et les conditions de frittage. La faible porosité et la distribution uniforme des phases dans la microstructure réduisent la résistance thermique et améliorent la conductivité thermique.

La conductivité thermique est également étroitement liée à la microstructure et au rapport de composition de l'électrode. Une teneur élevée en cuivre (par exemple, WCu 70/30) correspond généralement à une conductivité thermique plus élevée. Le réseau continu de phases de cuivre constitue un canal de conduction thermique efficace, tandis que le squelette en tungstène maintient la stabilité structurelle à haute température. Dans les applications de soudage, une conductivité thermique plus élevée assure une répartition uniforme de la chaleur, réduit la zone affectée thermiquement et améliore la qualité des joints. Dans le packaging microélectronique, la conductivité thermique favorise la dissipation thermique des puces, réduit les températures de fonctionnement et prolonge la durée de vie. Le procédé de pressage isostatique à chaud (HIP) optimise la liaison interfaciale grâce à une pression omnidirectionnelle, améliorant ainsi encore l'efficacité de la conductivité thermique. Les performances de conductivité thermique sont également affectées par des facteurs environnementaux. Par exemple, le ramollissement de la phase de cuivre à haute température peut légèrement réduire la capacité de transfert thermique, mais le rôle de soutien du tungstène maintient la stabilité globale. Dans les applications pratiques, l'optimisation de la conductivité thermique dépend de scénarios spécifiques. Par exemple, le traitement haute puissance nécessite des électrodes à conductivité thermique plus élevée, tandis que les conceptions légères peuvent sacrifier une partie de la conductivité thermique au profit d'une densité réduite. Les tests de conductivité thermique sont généralement réalisés par flash laser ou par flux thermique stationnaire. Des améliorations futures de la conductivité thermique pourraient être obtenues grâce à l'introduction de nanotechnologies ou à la conception à gradient fonctionnel (par exemple, en augmentant la teneur en cuivre de l'intérieur vers l'extérieur) pour supporter des charges thermiques plus élevées, comme dans les dispositifs 5G ou les capteurs haute température.

3.1.2.2 Coefficient de dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique (CTE) est un élément crucial des performances thermiques des électrodes tungstène-cuivre. Il reflète la capacité du matériau à changer de volume sous l'effet des fluctuations de température et influence directement sa compatibilité avec le substrat et sa stabilité aux cycles thermiques. Le CTE est principalement déterminé par les propriétés du tungstène et du cuivre. Le faible CTE du tungstène (environ 4,5 ppm/°C) et le CTE élevé du cuivre (environ 17 ppm/°C) sont équilibrés par l'ajustement du rapport composite. Le CTE des électrodes tungstène-cuivre est généralement contrôlé entre 6 et 8 ppm/°C. Cette valeur est proche de celle des substrats en silicium

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(environ 2,6 ppm/°C) ou en céramique d'alumine (environ 7 ppm/°C). Cela réduit la concentration des contraintes pendant les cycles thermiques, empêchant ainsi le gauchissement ou la rupture du boîtier, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications de conditionnement et de capteurs microélectroniques. L'ajustement du CTE dépend du rapport E/Cu et du procédé de fabrication. Par exemple, un rapport WCu 85/15 présente d'excellentes performances à haute température. Des simulations thermiques ont confirmé ses faibles contraintes, et la compatibilité de dilatation thermique avec le substrat de silicium est inférieure à 10 %. La distribution de phase uniforme et la faible porosité de la microstructure minimisent encore davantage la dilatation thermique différentielle. Le procédé de pressage isostatique à chaud améliore la stabilité thermique de l'interface, réduisant ainsi le risque de microfissuration lors des cycles thermiques. En électroérosion, un coefficient de dilatation thermique modéré assure la capacité de l'électrode à récupérer après une décharge à haute énergie. En soudage, l'adaptation de la dilatation thermique réduit les contraintes d'assemblage et améliore la durabilité. Le coefficient de dilatation thermique est également affecté par la température ambiante et une utilisation prolongée. Le ramollissement de la phase de cuivre à haute température peut légèrement augmenter la dilatation, mais le support du squelette en tungstène maintient la stabilité globale.

3.1.2.3 Résistance aux hautes températures

La résistance aux hautes températures est une caractéristique importante des propriétés thermiques des électrodes tungstène-cuivre. Elle reflète la stabilité structurelle du matériau et sa capacité à maintenir ses performances dans des environnements à températures extrêmement élevées, et détermine directement son aptitude aux applications à fortes charges thermiques. Cette résistance aux hautes températures est principalement assurée par le tungstène, dont le point de fusion est de 3 422 °C, le plus élevé de tous les métaux. Cette propriété permet aux électrodes tungstène-cuivre de conserver leur intégrité structurelle lors des décharges à l'arc ou du soudage à haute température, résistant à la fusion et à la déformation. Dans la structure composite, le tungstène agit comme un matériau squelette, formant un réseau à haute résistance et thermiquement stable. La phase de cuivre remplit les pores sous forme liquide à haute température, améliorant ainsi la stabilité thermique globale du matériau, le rendant ainsi adapté à l'électroérosion des matériaux à haute dureté ou aux opérations de déconnexion des interrupteurs haute tension. La résistance à haute température dépend également de la microstructure et du procédé de préparation. Une faible porosité et une distribution de phase uniforme sont obtenues grâce à la métallurgie des poudres ou à l'infiltration sous vide, réduisant ainsi la concentration des contraintes thermiques à haute température. Le pressage isostatique à chaud (CIC) optimise encore la liaison interfaciale et améliore la résistance à la fatigue thermique. En électroérosion, la résistance à haute température réduit l'ablation à la surface de l'électrode sous l'effet des décharges à haute énergie, prolongeant ainsi sa durée de vie. La résistance à haute température est également affectée par la phase cuivre. Le cuivre a un point de fusion bas (1083 °C) et peut se ramollir à des températures extrêmement élevées, mais le support du squelette en tungstène préserve l'intégrité structurelle.

3.2 Performances fonctionnelles de l'électrode en cuivre tungstène

Les électrodes tungstène-cuivre constituent leur atout majeur dans les applications pratiques, englobant la conductivité électrique, la résistance à l'érosion par arc, la durabilité mécanique et les capacités de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gestion thermique. Ces propriétés découlent des propriétés composites du tungstène et du cuivre. Grâce à l'optimisation du procédé de préparation et de la microstructure, les électrodes tungstène-cuivre présentent une multifonctionnalité en électroérosion, soudage et encapsulation microélectronique. La conductivité électrique est assurée par la phase cuivre, garantissant un transfert de courant efficace ; la résistance à l'érosion par arc est assurée par le point de fusion élevé et la dureté du tungstène, réduisant les pertes de surface ; la durabilité mécanique est obtenue grâce à une distribution de phase uniforme et une faible porosité, supportant un fonctionnement à forte charge ; et la gestion thermique associe la conductivité thermique du cuivre à la stabilité du tungstène pour optimiser les performances dans les environnements à haute température.

3.2.1 Propriétés conductrices des électrodes tungstène-cuivre

Les électrodes tungstène-cuivre constituent la base de leur valeur fonctionnelle, déterminant directement leur efficacité électrique et leur fiabilité à long terme dans des domaines tels que l'électroérosion, le soudage et le conditionnement microélectronique. Cette performance unique résulte de l'effet synergique du tungstène et du cuivre : le cuivre, métal naturellement conducteur, forme un réseau de transmission de courant continu au sein de l'électrode, offrant un chemin de faible résistance au flux de charge ; tandis que le point de fusion élevé et la résistance élevée du tungstène forment une structure robuste, préservant la stabilité structurelle de l'électrode dans des conditions de fonctionnement difficiles, telles que les températures élevées et les contraintes mécaniques, et empêchant la phase cuivre de surchauffer ou de se déformer, ce qui pourrait entraîner une rupture du chemin conducteur. Cette combinaison des deux matériaux préserve les avantages conducteurs du cuivre tout en compensant les inconvénients du cuivre pur en termes de résistance mécanique et de résistance aux températures élevées, faisant des électrodes tungstène-cuivre un choix idéal pour les environnements électriques complexes.

Bases microstructurales de la conductivité électrique

Les électrodes tungstène-cuivre sont étroitement liées à leur microstructure, l'accent étant mis sur la répartition de la phase de cuivre et la qualité de la liaison à l'interface tungstène-cuivre. Des procédés tels que la métallurgie des poudres ou l'infiltration sous vide permettent de contrôler précisément la microstructure. La métallurgie des poudres consiste à mélanger de la poudre de tungstène et de la poudre de cuivre dans une certaine proportion, à les presser et à les fritter, afin que la phase de cuivre remplisse uniformément les espaces entre les particules de tungstène, formant ainsi une structure dense « squelette de tungstène-remplissage de cuivre ». L'infiltration sous vide consiste à infiltrer du cuivre liquide dans un squelette de tungstène pré-fritté à haute température, en utilisant la capillarité pour obtenir une répartition continue de la phase de cuivre. Ces deux procédés ont pour objectif commun de réduire la porosité interne et les défauts d'interface. La porosité peut bloquer le passage du courant, entraînant une augmentation soudaine de la résistance locale, tandis qu'une mauvaise liaison à l'interface peut former une « résistance de contact », augmentant la résistance au transfert de charge. Par conséquent, une faible porosité et une répartition uniforme des phases sont des conditions préalables à une conductivité élevée. Ils assurent une conduction uniforme du courant à l'intérieur de l'électrode, évitant ainsi la concentration de chaleur ou les fluctuations de courant causées par les différences de résistance locales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Le rapport tungstène/cuivre est un paramètre clé pour la régulation de la conductivité électrique. Plus la teneur en cuivre est élevée, meilleure est la conductivité électrique en théorie, car davantage de phases de cuivre peuvent former un réseau conducteur plus dense. Cependant, une teneur trop élevée en cuivre affaiblit le rôle de support du squelette de tungstène, provoquant un ramollissement et une déformation de l'électrode à haute température. En pratique, il est nécessaire d'équilibrer le rapport entre les deux en fonction des besoins du scénario : par exemple, une teneur en cuivre plus élevée sera sélectionnée pour les scénarios axés sur l'efficacité conductrice, tandis que la proportion de tungstène sera augmentée de manière appropriée pour les scénarios nécessitant une stabilité à haute température. Ce réglage du rapport vise essentiellement à trouver un équilibre entre « conductivité » et « stabilité structurelle » afin de s'adapter aux exigences fondamentales des différentes conditions de travail.

Impact des propriétés conductrices sur les scénarios d'application

En électroérosion, la conductivité électrique affecte directement la précision de l'usinage et la durée de vie de l'électrode. Lors de l'usinage, des décharges haute fréquence sont générées entre l'électrode et la pièce, générant un matériau en fusion à haute température. Une transmission de courant stable est indispensable pour garantir une énergie de décharge uniforme. Les électrodes tungstène-cuivre à haute conductivité permettent une répartition uniforme de la densité de courant, évitant ainsi le phénomène de « décharge excessive » dû à une résistance locale excessive, c'est-à-dire des températures anormalement élevées dues à la concentration locale du courant, susceptibles d'entraîner une ablation de la surface de l'électrode ou des défauts tels que des piqûres et des fissures. Parallèlement, une excellente conductivité permet de réduire les pertes d'énergie, de convertir davantage d'énergie électrique en énergie thermique nécessaire à l'usinage et d'améliorer l'efficacité de l'usinage. Une transmission de courant stable peut également réduire la corrosion électrochimique de l'électrode, ralentir le taux de perte et prolonger la durée de vie de l'électrode.

En soudage, la qualité de la conductivité électrique détermine directement la constance de la qualité du soudage. Qu'il s'agisse de soudage par résistance par points ou de soudage à la molette, l'électrode doit transmettre efficacement le courant à la zone de soudage et faire fondre la surface de contact de la pièce grâce à la chaleur de résistance pour former un noyau en fusion. Les électrodes en cuivre tungstène à haute conductivité assurent une sortie de courant stable au point de contact entre l'électrode et la pièce, évitant ainsi les irrégularités de chaleur dues aux fluctuations de résistance : une chaleur insuffisante entraînera un soudage à froid, tandis qu'une chaleur excessive risque de pénétrer dans la pièce ou de coller l'électrode. De plus, pendant le soudage, l'électrode elle-même s'échauffe sous l'effet de la chaleur de résistance. Si la conductivité est mauvaise, la température élevée de l'électrode peut provoquer une oxydation ou une déformation de surface, dégradant davantage la conductivité et créant un cercle vicieux de « dégradation des performances - surchauffe exacerbée ». La faible résistance des électrodes à haute conductivité permet de réduire l'auto-échauffement et de maintenir des performances de soudage stables à long terme.

Les encapsulations microélectroniques ont des exigences plus pointues en matière de conductivité électrique. Lors de la connexion entre la puce et le substrat, l'électrode en cuivre tungstène, en tant qu'interconnexion conductrice, doit offrir une faible résistance et une conduction stable du circuit afin de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

garantir l'intégrité de la transmission du signal. Les signaux électroniques haute fréquence et haut débit sont extrêmement sensibles aux variations de résistance. Même de faibles fluctuations de résistance peuvent entraîner des retards ou une atténuation du signal. Par conséquent, les électrodes en cuivre tungstène utilisées dans les encapsulations microélectroniques doivent présenter une conductivité extrêmement constante et exemptes de zones de haute résistance locales, sous peine de créer un goulot d'étranglement pour la transmission du signal. Parallèlement, les variations de température dans l'environnement d'encapsulation entraînent des dilatations et des contractions du matériau. Si les performances conductrices sont atténuées par des modifications structurelles, cela peut entraîner un mauvais contact du circuit, voire une panne de l'équipement. Cela exige que les performances conductrices de l'électrode restent stables pendant une utilisation prolongée et ne soient pas affectées de manière significative par les contraintes environnementales.

Corrélation et signification des paramètres conducteurs du noyau

La conductivité, la résistivité et la capacité de transport de courant sont les paramètres clés pour mesurer la conductivité des électrodes en cuivre tungstène. Ces trois paramètres sont interdépendants et ont des objectifs différents. La conductivité reflète la capacité d'un matériau à conduire le courant. Plus sa valeur est élevée, meilleure est la conductivité ; la résistivité est l'inverse de la conductivité, qui reflète directement la résistance à la transmission du courant. En pratique, ces deux paramètres déterminent conjointement l'intensité du courant de l'électrode à une tension donnée, ce qui affecte le rendement énergétique. La capacité de transport de courant décrit le courant maximal pouvant traverser l'électrode en continu sans surchauffe ni dommage structurel. Elle est non seulement liée à la conductivité, mais aussi étroitement liée à la capacité de dissipation thermique et à la résistance à haute température du matériau : une conductivité élevée peut réduire l'effet Joule lors du passage du courant, et la résistance à haute température du squelette en tungstène assure le support structurel nécessaire au passage de courants importants.

L'équilibre entre ces trois paramètres est crucial dans la conception des électrodes tungstène-cuivre. Par exemple, dans les applications à courant élevé, il est essentiel de maintenir une conductivité élevée (pour minimiser la production de chaleur) et une capacité de transport de courant élevée (pour éviter les défaillances structurelles). En microélectronique de précision, en revanche, l'accent est davantage mis sur la stabilité et l'uniformité de la conductivité pour garantir une transmission précise du signal. La recherche et le contrôle approfondis de ces paramètres constituent à la fois la base de l'optimisation des performances des électrodes tungstène-cuivre et la garantie technique de leur adaptabilité à diverses applications haut de gamme.

3.2.1.1 Conductivité

La conductivité est un indicateur fondamental des propriétés conductrices des électrodes tungstène-cuivre. Elle reflète la capacité du matériau à transférer des charges et influence directement son efficacité dans les applications électriques. La conductivité est principalement assurée par la phase de cuivre, dont la conductivité élevée assure une transmission efficace du courant au sein de l'électrode, formant ainsi un réseau conducteur continu. La conductivité du tungstène est inférieure à celle du cuivre, mais grâce à

des procédés composites optimisés (comme un rapport WCu 70/30), sa conductivité peut se rapprocher de celle du cuivre pur, répondant ainsi aux exigences de courant élevé de l'électroérosion et aux faibles résistances du soudage. La répartition uniforme de la phase de cuivre au sein de la microstructure réduit les variations de résistance et améliore la stabilité de la décharge. Cela est particulièrement vrai dans les applications d'usinage de précision (comme les micro-moules), où la conductivité détermine directement la précision de l'usinage et la qualité de surface.

L'obtention d'une conductivité électrique élevée dépend du procédé de fabrication. La métallurgie des poudres contrôle le mouillage et le remplissage du cuivre par la température et la pression de frittage. L'infiltration sous vide optimise l'interface de phase grâce à la pénétration du cuivre liquide, réduisant ainsi la porosité et minimisant les effets de diffusion. Le pressage isostatique à chaud (HIP) améliore encore la liaison interfaciale et la constance de la conductivité. La conductivité est également affectée par le rapport de composition. Une teneur élevée en cuivre (par exemple, WCu 60/40) entraîne généralement une conductivité plus élevée et convient à un usinage à haut rendement, tandis qu'une teneur élevée en tungstène (par exemple, WCu 90/10) est performante lorsque la résistance à l'usure est prioritaire. Dans les applications pratiques, une conductivité électrique élevée favorise une décharge d'arc stable, réduit les pertes d'énergie et prolonge la durée de vie des électrodes. À l'avenir, l'introduction de poudre de nanocuisse ou de modifications de surface (par exemple, l'argenture) pourrait améliorer encore la conductivité pour s'adapter aux applications à courant plus élevé ou à haute fréquence, telles que les équipements 5G et la transmission d'énergie.

3.2.1.2 Résistivité

La résistivité est un autre indicateur important des propriétés conductrices des électrodes tungstène-cuivre. Elle reflète la résistance du matériau au passage du courant et affecte directement l'efficacité du transfert d'énergie électrique et de la génération de chaleur. La résistivité est principalement déterminée par les propriétés composites du tungstène et du cuivre. La faible résistivité du cuivre assure un chemin de courant efficace, tandis que la résistivité élevée du tungstène peut augmenter l'impédance globale à des rapports élevés. En optimisant ce rapport, la résistivité des électrodes tungstène-cuivre est réduite à un niveau proche de celui du cuivre pur, ce qui les rend adaptées aux applications nécessitant de faibles pertes d'énergie. La faible porosité et la distribution de phase uniforme de la microstructure réduisent la diffusion des électrons et améliorent la résistivité, ce qui est particulièrement important pour la transmission de courant à longue distance. Le contrôle de la résistivité dépend du procédé de fabrication.

La métallurgie des poudres optimise la continuité de la phase cuivre grâce à un mélange et un frittage précis, tandis que l'infiltration sous vide réduit encore la résistivité en remplissant les pores de cuivre liquide. Le traitement thermique et les procédés assistés par pression (comme le HIP) améliorent la densité du matériau et réduisent l'augmentation de la résistance due aux joints de grains et aux défauts. La résistivité est également affectée par la température et l'environnement. Le ramollissement de la phase cuivre à haute température peut légèrement augmenter la résistance, mais le support du squelette en tungstène maintient la stabilité globale. En usinage par électro-étincelage, une faible résistivité réduit les effets thermiques et améliore la qualité de surface. En soudage, elle réduit la résistance des joints et améliore l'efficacité.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2.1.3 Capacité de transport de courant

La capacité de transport de courant est un indicateur clé des propriétés conductrices des électrodes tungstène-cuivre. Elle reflète la stabilité et la durabilité de l'électrode sous des conditions de courant élevé et détermine directement son adéquation aux applications à forte charge. La capacité de transport de courant est principalement assurée par la conductivité élevée de la phase cuivre et le point de fusion élevé du tungstène. Le cuivre assure une transmission efficace du courant, tandis que la structure du tungstène maintient la stabilité sous les arcs à haute température, empêchant ainsi la fusion ou la déformation. Grâce à des rapports optimisés (tels que WCu 80/20), les électrodes tungstène-cuivre offrent des performances exceptionnelles sous des courants élevés. La faible porosité et la distribution uniforme des phases dans la microstructure réduisent le risque de surchauffe localisée et améliorent la capacité de transport de courant.

L'obtention de la capacité de transport de courant dépend du procédé de fabrication. La métallurgie des poudres optimise l'interface de phase en contrôlant la température et la pression de frittage. L'infiltration sous vide améliore la densité grâce à l'infiltration de cuivre liquide. Le pressage isostatique à chaud renforce encore la résistance mécanique et la stabilité conductrice du matériau. Une teneur élevée en tungstène (comme le WCu 90/10) améliore la résistance à l'érosion par arc, le rendant ainsi adapté aux applications de décharge à haute énergie, tandis qu'une teneur élevée en cuivre (comme le WCu 60/40) optimise la transmission à faible résistance. En électroérosion, une capacité de transport de courant élevée permet l'enlèvement de matière en grandes quantités ; en soudage, elle garantit la qualité et la durabilité des joints sous des courants élevés. Dans les applications pratiques, la capacité de transport de courant est également affectée par la température ambiante et les conditions de dissipation thermique. Une bonne gestion thermique (comme le refroidissement par air ou par liquide) peut améliorer la limite de transport de courant. L'amélioration de la capacité de transport de courant dépend également de la conception des électrodes. Les géométries complexes nécessitent une distribution uniforme du courant et un traitement de surface (tel que le placage) peut améliorer la résistance à la corrosion et prolonger la durée de vie.

3.2.2 Résistance à l'érosion par arc des électrodes en cuivre tungstène

Les performances d'une électrode tungstène-cuivre reflètent sa durabilité et sa stabilité dans les environnements de décharge d'arc à haute énergie. Cette caractéristique lui confère des avantages significatifs dans des domaines tels que l'usinage par électroérosion (EDM), le soudage par résistance et la commutation haute tension. La résistance à l'érosion par arc est principalement due au point de fusion et à la dureté élevés du tungstène, associés aux propriétés de conductivité et de remplissage du cuivre. L'optimisation de la microstructure par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide, ainsi qu'une faible porosité et une distribution de phase uniforme, renforcent encore la résistance à l'érosion. Sous l'action d'un arc, le matériau peut s'évaporer ou fondre à la surface de l'électrode. La résistance à l'érosion par arc a un impact direct sur la précision d'usinage, la durée de vie et la rentabilité.

3.2.2.1 Mécanisme d'érosion par arc

Le mécanisme d'érosion par arc est fondamental pour comprendre la résistance à l'érosion par arc des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

électrodes tungstène-cuivre. Il implique les effets thermiques et la perte de matière causés par la décharge d'arc à la surface du matériau. L'érosion par arc commence par une décharge sous haute tension ou courant élevé, générant un plasma à haute température (atteignant des milliers de °C). Cet échauffement instantané de la surface de l'électrode provoque une fusion ou une vaporisation localisée du matériau. Dans les électrodes tungstène-cuivre, l'action de l'arc affecte d'abord la phase cuivre. En raison de son bas point de fusion (1 083 °C), le cuivre liquide peut s'évaporer ou pulvériser à haute température, exposant ainsi le squelette du tungstène. Le point de fusion élevé du tungstène (3 422 °C) assure la stabilité structurelle sous arc électrique, mais une oxydation ou une micro-ablation de surface peuvent se produire, formant des piqûres ou des fissures. Le processus d'érosion implique également des contraintes thermiques. Un échauffement et un refroidissement rapides entraînent des concentrations de contraintes au sein du matériau, susceptibles de déclencher la propagation de microfissures.

Le mécanisme d'ablation par arc est également affecté par la microstructure. Une faible porosité réduit les points de concentration de chaleur, et une distribution de phase uniforme (comme pour le WCu 70/30) optimise la conduction thermique et réduit le risque de surchauffe locale. L'énergie de l'arc et la fréquence de décharge influencent également le degré d'ablation. Les décharges à haute énergie accentuent les pertes de matière, tandis que les décharges à basse fréquence peuvent n'endommager que légèrement la surface. Des produits d'ablation, tels que des vapeurs métalliques ou des oxydes, peuvent se déposer à la surface de la pièce, affectant ainsi la qualité de l'usinage. Les procédés de préparation, comme la compression isostatique à chaud (CIC), améliorent la résistance à l'ablation en augmentant la densité et en réduisant les points de vaporisation dans les pores. À l'avenir, l'étude de la distribution de l'énergie de l'arc et des transformations de phase des matériaux permettra de mieux comprendre le mécanisme d'ablation et d'optimiser la conception des électrodes.

3.2.2.2 Évaluation de la résistance à l'ablation

L'évaluation de la résistance à l'érosion est une méthode scientifique permettant d'évaluer la résistance à l'érosion par arc des électrodes tungstène-cuivre. Elle implique des essais expérimentaux et des analyses de performance afin de garantir la fiabilité des électrodes dans des applications pratiques. Cette évaluation est généralement réalisée par des essais d'érosion par arc, simulant des conditions de décharge à haute énergie et enregistrant la perte de masse superficielle, la variation dimensionnelle et la morphologie de surface de l'électrode. Le taux de perte de masse est un indicateur clé. Les électrodes à haute résistance à l'érosion présentent une perte de masse nettement inférieure à celle des électrodes en cuivre pur ou en graphite après des décharges prolongées. Un rapport WCu 80/20 offre des performances exceptionnelles à 200 A. La variation dimensionnelle est mesurée par numérisation 3D afin d'évaluer le degré d'usure le long du profil de l'électrode. Un faible taux d'usure indique une résistance élevée à l'érosion. L'analyse de la morphologie de surface utilise un microscope électronique à balayage (MEB) pour observer la microstructure après érosion, en évaluant la profondeur des piqûres, la densité des fissures et l'épaisseur de la couche d'oxyde. Des marques d'érosion uniformes reflètent la stabilité microstructurale. La résistance à l'érosion est également évaluée par des tests de durée de vie, qui enregistrent la dégradation des performances de l'électrode après un nombre spécifié de décharges. Les électrodes hautement durables préservent à la fois la conductivité et la résistance mécanique. Les normes internationales telles que ISO 14132 et IEC 62271-102 fournissent des directives d'essai, notamment des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tests de résistance à l'arc et des évaluations de la stabilité thermique. Les résultats expérimentaux montrent que les électrodes dont les procédés de fabrication sont optimisés (comme l'infiltration sous vide) peuvent réduire le taux d'ablation d'environ 30 %.

L'évaluation de la résistance à l'ablation prend également en compte le scénario d'application. En usinage par électro-étincelage, la résistance à l'ablation affecte directement la précision de l'usinage et la qualité de surface de la pièce ; en soudage, elle réduit la fréquence de remplacement des électrodes.

3.2.2.3 Facteurs affectant la résistance à l'ablation

Les facteurs influençant la résistance à l'ablation sont essentiels pour optimiser les performances des électrodes tungstène-cuivre. Ils englobent des aspects tels que la composition du matériau, la microstructure et les conditions de fonctionnement. Le rapport de composition est le facteur principal. Une teneur élevée en tungstène (par exemple, WCu 90/10) augmente la résistance à l'ablation. Le point de fusion élevé et la dureté du tungstène le protègent des chocs d'arc. Si une teneur élevée en cuivre (par exemple, WCu 60/40) améliore la conductivité, elle réduit également la résistance à l'ablation. Un équilibre doit être trouvé entre durabilité et efficacité. La microstructure a un impact significatif. Une faible porosité réduit les points de concentration de chaleur, tandis qu'une distribution de phase uniforme optimise le transfert thermique. Le procédé de compression isostatique à chaud (CIC) améliore la densité et réduit les taux d'ablation d'environ 15 %.

Le procédé de fabrication est crucial pour la résistance à l'ablation. En métallurgie des poudres, la température et la pression de frittage contrôlent l'effet mouillant du cuivre. En infiltration sous vide, la profondeur de pénétration affecte la stabilité de l'interface. Le traitement à haute température réduit les défauts. Les traitements de surface, tels que le nickelage ou les revêtements, améliorent la résistance à l'oxydation et réduisent les dommages superficiels induits par l'arc. Les conditions de fonctionnement incluent l'énergie de l'arc et la fréquence de décharge. Une décharge à haute énergie (par exemple, 500 A) aggrave l'ablation, tandis qu'une décharge à basse fréquence réduit les pertes. Des facteurs environnementaux tels que l'humidité ou les atmosphères oxydantes peuvent accélérer la dégradation de la surface, nécessitant des conditions de travail optimisées. La conception des électrodes affecte également la résistance à l'ablation. Les géométries complexes nécessitent une distribution uniforme du courant afin de minimiser la surchauffe locale.

3.3 Autres propriétés de l'électrode tungstène-cuivre

Les électrodes tungstène-cuivre présentent des avantages uniques dans diverses applications, notamment en termes de dureté, de résistance mécanique, de ténacité, de résistance à l'usure, de résistance à la corrosion, ainsi que de résistance au soudage et à l'adhérence. Ces propriétés découlent des caractéristiques composites du tungstène et du cuivre. La microstructure est optimisée par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide pour former un matériau à faible porosité et à haute uniformité. Le point de fusion élevé, la dureté et la stabilité chimique du tungstène constituent la base de sa résistance aux hautes températures et à l'usure, tandis que la conductivité électrique, la ductilité et la conductivité thermique élevées du cuivre améliorent les propriétés électriques et la ténacité. La combinaison de ces

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

autres propriétés influence directement la durabilité, l'efficacité et la fiabilité de l'électrode en électroérosion, soudage et encapsulation microélectronique.

3.3.1 Dureté de l'électrode en cuivre tungstène

Une électrode tungstène-cuivre est un indicateur clé de ses propriétés mécaniques, reflétant sa durabilité et sa résistance à la déformation sous fortes charges et conditions abrasives. Cette propriété est principalement assurée par le tungstène, dont la dureté élevée domine le matériau composite. Combinées à l'effet de remplissage du cuivre, les procédés de métallurgie des poudres ou d'infiltration sous vide optimisent la microstructure, ce qui se traduit par une distribution de phase uniforme et une faible porosité. La dureté a un impact direct sur la résistance à l'érosion de l'électrode lors de l'électroérosion, sa résistance à la compression lors du soudage et sa stabilité de surface dans les boîtiers microélectroniques. Les électrodes haute dureté peuvent supporter des contraintes mécaniques fréquentes ou des chocs d'arc, prolongeant ainsi leur durée de vie tout en maintenant la précision d'usinage. L'obtention de cette dureté dépend du rapport tungstène/cuivre et du procédé de préparation. Une teneur en tungstène plus élevée (par exemple, WCu 80/20 ou WCu 90/10) entraîne une dureté plus élevée. La dureté naturelle du tungstène constitue la base de la résistance à l'usure, tandis que la ductilité du cuivre remplit les pores lors du frittage, améliorant ainsi la densité globale du matériau. Les grains fins de la microstructure, optimisés par pressage isostatique à chaud (CIC), augmentent encore la dureté et réduisent l'usure de surface. Les essais de dureté utilisent généralement les méthodes Vickers ou Rockwell. Les résultats reflètent la résistance superficielle du matériau à l'indentation. Les procédés de préparation, tels que le frittage à haute température et le contrôle de la pression, influencent directement l'uniformité de la distribution de la dureté. En pratique, les électrodes de dureté élevée sont plus performantes lors de l'usinage de matériaux de dureté élevée, minimisant ainsi leur déformation.

La dureté est également affectée par les conditions environnementales et d'utilisation. Si le ramollissement de la phase cuivre à haute température peut légèrement réduire la dureté, le support fourni par le squelette en tungstène maintient la stabilité globale. Des traitements de surface tels que le polissage ou les revêtements peuvent améliorer encore la dureté et la résistance à la corrosion. Dans les boîtiers microélectroniques, la dureté assure un contact étroit entre les électrodes et les substrats, prévenant ainsi les dommages mécaniques.

3.3.2 Résistance de l'électrode en cuivre tungstène

Une électrode tungstène-cuivre est un indicateur clé de ses propriétés mécaniques, reflétant sa résistance à la rupture et à la déformation sous haute pression et contrainte mécanique. Cette caractéristique est renforcée par la résistance élevée à la compression du tungstène et la ténacité du cuivre. L'optimisation microstructurale par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide permet d'obtenir un matériau composite à faible porosité et à haute densité. La résistance mécanique influence directement la résistance aux chocs de l'électrode en électroérosion, sa résistance à la compression en soudage et sa stabilité structurelle dans le conditionnement microélectronique. Les électrodes à haute résistance peuvent supporter les contraintes des décharges à haute énergie ou du serrage mécanique, prolongeant ainsi leur durée de vie et améliorant l'efficacité de traitement.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'obtention de la résistance dépend du rapport tungstène/cuivre et du procédé de préparation. Une teneur élevée en tungstène (par exemple, WCu 85/15) améliore considérablement la résistance à la compression. Le squelette en tungstène assure un support structural à haute résistance, tandis que le remplissage en cuivre optimise l'uniformité microstructurale et réduit la concentration des contraintes. La faible porosité et la distribution uniforme des phases dans la microstructure sont améliorées par la compression isostatique à chaud (CIC). La granulométrie fine améliore la résistance à la fatigue du matériau, et les essais de résistance montrent que la résistance à la compression peut atteindre un niveau relativement élevé. Les procédés de préparation, tels que le contrôle de la température et de la pression de frittage, influencent directement l'uniformité de la distribution de la résistance. L'infiltration sous vide améliore la liaison interfaciale grâce à la pénétration du cuivre liquide.

La résistance est également affectée par les conditions de fonctionnement. Le ramollissement de la phase cuivre à haute température peut légèrement réduire la résistance, mais le support du squelette en tungstène maintient la stabilité globale. En électroérosion, les électrodes à haute résistance peuvent résister à l'impact des décharges à haute énergie et réduire la déformation. En soudage, elles favorisent la formation de joints sous haute pression. Dans le conditionnement microélectronique, la résistance garantit que les électrodes ne se fracturent pas lors des cycles thermiques, améliorant ainsi la fiabilité. Les traitements de surface tels que le placage peuvent améliorer la résistance à la corrosion, améliorant ainsi indirectement les performances de résistance.

3.3.3 Ténacité de l'électrode en cuivre tungstène

Une électrode tungstène-cuivre est un élément clé de ses propriétés mécaniques, reflétant sa résistance à la rupture et son absorption d'énergie sous impact ou contrainte. Cette propriété est principalement assurée par le cuivre, dont la ductilité et la ténacité élevées jouent un rôle essentiel dans les matériaux composites. Combinée à la dureté du tungstène, la microstructure est optimisée par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide, ce qui permet d'obtenir un matériau à faible porosité et à grande uniformité. La ténacité influence directement la résistance à la fissuration de l'électrode en électroérosion, sa résistance aux chocs en soudage et sa flexibilité structurelle dans le packaging microélectronique. Les électrodes hautement ténaces peuvent absorber les contraintes mécaniques ou thermiques, réduire la rupture fragile et prolonger la durée de vie. Cette section explore en détail les propriétés de ténacité des électrodes tungstène-cuivre et leur rôle dans les applications pratiques.

L'obtention de la ténacité dépend du rapport tungstène/cuivre et du procédé de préparation. Une teneur en cuivre plus élevée améliore la ténacité. L'allongement à la rupture du cuivre assure l'absorption d'énergie, tandis que le squelette en tungstène maintient la stabilité structurelle à haute température. La faible porosité et la distribution uniforme des phases dans la microstructure sont optimisées par pressage isostatique à chaud. La finesse des grains améliore la résistance du matériau à la propagation des fissures. Les essais de ténacité montrent que le matériau présente une certaine déformation plastique sous impact. Les procédés de préparation, tels que le contrôle de la température et de la pression de frittage, influencent directement l'uniformité de la distribution de la ténacité. L'infiltration sous vide, par pénétration de cuivre liquide, améliore la liaison interfaciale et réduit les points de concentration de contraintes. La ténacité est également affectée par les conditions de fonctionnement. Le ramollissement de la phase de cuivre à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

haute température améliore la ténacité, mais des températures excessives peuvent entraîner une diminution de la résistance. Le support fourni par le squelette en tungstène maintient l'équilibre général. En usinage par électro-étincelage, les électrodes à haute ténacité peuvent résister à l'impact des décharges à haute énergie et réduire la formation de fissures. En soudage, ils absorbent les contraintes thermiques et améliorent la durabilité des assemblages. Dans les boîtiers microélectroniques, la ténacité prévient les ruptures fragiles lors des cycles thermiques, améliorant ainsi la fiabilité. Les traitements de surface tels que le polissage peuvent réduire les défauts de surface et renforcer indirectement la ténacité.

3.3.4 Résistance à l'usure de l'électrode en cuivre tungstène

Les électrodes tungstène-cuivre jouent un rôle clé dans leurs propriétés mécaniques, reflétant leur résistance à l'usure et leur stabilité de surface en conditions de frottements répétés ou de charges élevées. Cette caractéristique est principalement due au tungstène, dont la dureté et la résistance à l'usure élevées dominent le matériau composite. Combinée à l'effet de remplissage du cuivre, la microstructure est optimisée par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide, ce qui permet d'obtenir un matériau à faible porosité et à grande uniformité. La résistance à l'usure a un impact direct sur la durée de vie de l'électrode en électroérosion, sa résistance à l'usure par contact en soudage et l'intégrité de sa surface dans les boîtiers microélectroniques. Les électrodes hautement résistantes à l'usure peuvent supporter les frottements mécaniques ou les chocs d'arc, réduisant ainsi les pertes de matière et préservant la précision d'usinage.

La résistance à l'usure dépend du rapport tungstène/cuivre et du procédé de préparation. Des teneurs plus élevées en tungstène (comme WCu 80/20 ou WCu 90/10) améliorent la résistance à l'usure. La dureté naturelle du tungstène confère au matériau une base résistante à l'usure, tandis que la ductilité du cuivre remplit les pores lors du frittage, renforçant ainsi la densité de la microstructure. La finesse des grains de la microstructure est optimisée par le procédé de compression isostatique à chaud (CIC), ce qui améliore encore la résistance à l'usure et réduit l'usure et l'érosion de surface. Les tests de résistance à l'usure utilisent généralement des essais de frottement et d'usure ou des essais d'ablation à l'arc pour mesurer les variations de rugosité de surface et les taux de perte de masse. Les procédés de préparation tels que le frittage à haute température et le contrôle de la pression influencent directement l'uniformité de la répartition de la résistance à l'usure. En pratique, les électrodes à haute résistance à l'usure sont particulièrement performantes lors de l'usinage de matériaux très durs (comme l'acier au tungstène), réduisant ainsi la déformation des électrodes et la fréquence de remplacement. La résistance à l'usure est également affectée par les conditions de fonctionnement. Le ramollissement de la phase cuivre à haute température peut légèrement réduire la résistance à l'usure, mais le support en tungstène maintient la stabilité globale. Les traitements de surface tels que le polissage ou les revêtements (par exemple, CrN) peuvent améliorer encore la résistance à l'usure et à la corrosion. Dans les boîtiers microélectroniques, la résistance à l'usure garantit la qualité de surface des électrodes lors des assemblages répétés et prévient les dommages mécaniques.

3.3.5 Résistance à la corrosion des électrodes en cuivre et tungstène

Les électrodes tungstène-cuivre se caractérisent par leur adaptabilité environnementale, reflétant leur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance aux agressions chimiques et leur stabilité à long terme en environnements humides, acides, alcalins ou industriels. Cette caractéristique est principalement due à la stabilité chimique du tungstène, combinée à la protection de surface du cuivre et à l'optimisation de la microstructure par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide, ce qui permet d'obtenir un matériau à faible porosité et très uniforme. La résistance à la corrosion influence directement la qualité de surface de l'électrode en électroérosion, sa résistance à l'oxydation en soudage et sa fiabilité dans le packaging microélectronique. Les électrodes à haute résistance à la corrosion résistent à l'érosion environnementale, réduisent la dégradation de surface et prolongent leur durée de vie. Cette section détaille les caractéristiques de résistance à la corrosion des électrodes tungstène-cuivre et leurs performances d'application.

La résistance à la corrosion dépend du rapport tungstène/cuivre et du procédé de préparation. Des teneurs plus élevées en tungstène (par exemple, WCu 85/15) améliorent la résistance à la corrosion. La stabilité chimique naturelle du tungstène assure au matériau une résistance aux acides et aux alcalis, tandis que la ductilité du cuivre comble les pores lors du frittage, réduisant ainsi les chemins de corrosion. La faible porosité de la microstructure, optimisée par compression isostatique à chaud (CIC), réduit les canaux de pénétration des agents corrosifs, et la finesse des grains améliore la résistance du matériau aux fissures. Les tests de résistance à la corrosion impliquent généralement des essais au brouillard salin ou par immersion acide, mesurant la vitesse de corrosion superficielle et la perte de masse. Les procédés de préparation, comme l'infiltration sous vide, améliorent la densité de l'interface grâce à l'infiltration de cuivre liquide, améliorant ainsi la résistance à la corrosion. Dans les applications pratiques, les électrodes à haute résistance à la corrosion excellent dans le traitement de matériaux chimiquement actifs (tels que les alliages contenant du titane), réduisant ainsi la contamination des pièces.

La résistance à la corrosion est également affectée par les conditions de fonctionnement. Les atmosphères humides ou oxydantes peuvent accélérer la corrosion de la phase cuivre, mais le support du squelette en tungstène et les traitements de surface (tels que le nickelage ou le placage à l'or) améliorent considérablement la stabilité globale. Dans les boîtiers microélectroniques, la résistance à la corrosion garantit que les électrodes ne s'oxydent pas en milieu humide, améliorant ainsi la fiabilité.

3.3.6 Propriétés anti-soudure et anti-adhérence des électrodes en cuivre tungstène

Les électrodes tungstène-cuivre sont des propriétés clés dans les applications de soudage. Elles reflètent leur capacité à résister à l'adhérence aux matériaux d'assemblage sous haute température et pression, ainsi que la propreté de la surface après soudage. Cette caractéristique est principalement due à la résistance du tungstène aux hautes températures et aux propriétés de surface du cuivre. L'optimisation de la microstructure par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide permet d'obtenir un matériau à faible porosité et très uniforme. La résistance au soudage et à l'adhérence influence l'efficacité de l'électrode en soudage par résistance, la qualité de surface en soudage par points et la fréquence de remplacement sur une longue durée. Les électrodes à haute résistance à l'adhérence peuvent réduire l'adhérence du laitier, améliorer la qualité des joints soudés et prolonger leur durée de vie.

L'obtention d'une résistance à la soudure et à l'adhérence dépend du rapport tungstène/cuivre et du procédé de préparation. Des teneurs en tungstène plus élevées (par exemple, WCu 80/20) améliorent la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance à l'adhérence. Le point de fusion et la dureté élevés du tungstène réduisent l'adhérence lors de la soudure fondue, tandis que la conductivité thermique du cuivre optimise la gestion thermique lors du frittage et réduit les résidus de surface. La faible porosité de la microstructure, optimisée par compression isostatique à chaud (CIC), réduit les canaux de pénétration du laitier, tandis que la finesse des grains améliore la résistance du matériau à la déformation. La résistance à l'adhérence est généralement testée à l'aide d'un essai de cycle de soudage, mesurant la surface d'adhérence du laitier et la propreté de la surface. Les procédés de préparation tels que l'infiltration sous vide améliorent la densité de l'interface grâce à l'infiltration de cuivre liquide, augmentant ainsi la résistance à l'adhérence. En pratique, les électrodes à forte résistance à l'adhérence excellent en soudage par points ou à la molette, réduisant ainsi la fréquence de nettoyage.

La résistance au soudage et à l'adhérence est également affectée par les conditions d'utilisation. Le ramollissement de la phase cuivre à haute température peut augmenter le risque d'adhérence, mais le support et le traitement de surface du squelette en tungstène améliorent considérablement les performances globales. En soudage par résistance, la résistance à l'adhérence assure une séparation fluide de l'électrode et de la pièce, améliorant ainsi la qualité de l'assemblage. Dans le domaine du packaging microélectronique, la résistance au soudage permet de réaliser plusieurs opérations de soudage sans laisser de résidus.

3.4 CTIA GROUP LTD Électrode en cuivre et tungstène MSDS

L'électrode tungstène-cuivre est un matériau composite métallique dont les composants principaux sont le tungstène et le cuivre. Elle est fabriquée par métallurgie des poudres, infiltration sous vide et autres procédés. Elle présente les excellentes propriétés du tungstène et du cuivre et est largement utilisée dans le secteur industriel.

D'un point de vue matériel, le point de fusion élevé du tungstène (3 410 °C) et sa grande résistance confèrent à l'électrode une excellente résistance aux hautes températures et une stabilité structurelle optimale, lui permettant de conserver sa forme et de résister à la déformation dans des environnements difficiles tels que les températures et les pressions élevées. La conductivité électrique et thermique élevée du cuivre, quant à elle, permet à l'électrode de transmettre et de dissiper efficacement la chaleur, dissipant rapidement la chaleur générée pendant le fonctionnement et évitant ainsi les surchauffes localisées et la dégradation des performances. Cette combinaison « tungstène résistant et cuivre supérieur » permet à l'électrode tungstène-cuivre de pallier les inconvénients de la faible conductivité électrique et thermique du tungstène pur, tout en compensant le manque de résistance à haute température du cuivre pur, offrant ainsi des performances exceptionnelles.

Les électrodes tungstène-cuivre peuvent être ajustées de manière flexible en fonction du scénario d'application. Les ratios courants incluent WCu70/30 et WCu80/20. Une teneur en cuivre plus élevée améliore la conductivité électrique et thermique, ce qui la rend idéale pour les applications exigeant des performances électriques élevées. Une teneur en tungstène plus élevée améliore la résistance thermique et la résistance mécanique, la rendant ainsi plus adaptée aux environnements de travail à haute température et à fortes contraintes. L'ajustement du ratio permet une adaptation précise des performances.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Du point de vue des domaines d'application, les électrodes en cuivre tungstène jouent un rôle clé dans de nombreux scénarios industriels haut de gamme : dans l'usinage par électro-étincelage, en tant qu'électrode de décharge, elle peut traiter avec précision des matériaux à haute résistance tels que l'acier moulé et le carbure cimenté avec sa conductivité stable et sa résistance à l'ablation, garantissant la précision de surface de la pièce ; dans le domaine du soudage, en particulier le soudage par résistance et le soudage à l'arc, sa conductivité électrique et thermique efficace peut assurer la transmission stable du courant de soudage, réduire les pertes de chaleur et améliorer la qualité des joints de soudure ; dans l'emballage microélectronique, en raison de sa bonne conductivité électrique et de son coefficient de dilatation thermique correspondant au substrat, elle peut être utilisée comme électrode d'interconnexion pour assurer une connexion fiable entre la puce et le substrat et améliorer la stabilité des équipements électroniques ; en outre, dans l'aérospatiale, la défense nationale et d'autres domaines, elle est également souvent utilisée dans les contacts d'arc à haute température, les commutateurs haute tension et d'autres composants pour répondre aux exigences de performance dans des conditions de travail extrêmes.

Aperçu des dangers : Ce produit est un matériau composite métallique solide, intrinsèquement non toxique. Aucune substance toxique n'est libérée lors d'un stockage et d'une utilisation normale. Comme il n'existe pas sous forme de poudre, il n'y a aucun risque d'inhalation de poussière et il n'est ni explosif ni inflammable. À des températures extrêmes (par exemple, dépassant le point de fusion du cuivre, 1 083 °C), la phase cuivre peut fondre, mais ce processus ne produit pas de gaz toxiques. Éviter les brûlures par contact à haute température.

Mesures de lutte contre l'incendie : Ce produit est ininflammable et non explosif. À haute température, il ne subit que des modifications physiques (comme la fusion du cuivre) et ne dégage pas de gaz toxiques. En cas d'incendie, aucune mesure de lutte particulière n'est requise ; les mesures de lutte standard suffisent. Lors de l'extinction d'un incendie, veillez à éviter tout contact avec des matières en fusion chaudes, qui pourraient provoquer des brûlures.

Intervention d'urgence en cas de fuite : Le produit est solide et ne présente aucun risque de fuite. En cas de rupture ou de dommage externe, il suffit de récupérer les fragments ; aucune mesure de protection particulière n'est requise. Les fragments peuvent être recyclés ou traités comme des déchets industriels classiques, garantissant ainsi la sécurité environnementale.

Manipulation et stockage : Aucun équipement de protection particulier n'est requis pendant la manipulation ; le port de gants industriels suffit pour éviter les rayures superficielles. Stocker dans un environnement sec et bien ventilé, à l'écart des substances corrosives telles que les acides et bases forts, afin d'éviter la corrosion de la surface métallique. Aucune étanchéité ni isolation particulière n'est requise ; conserver simplement au sec lors du stockage avec d'autres matériaux industriels.

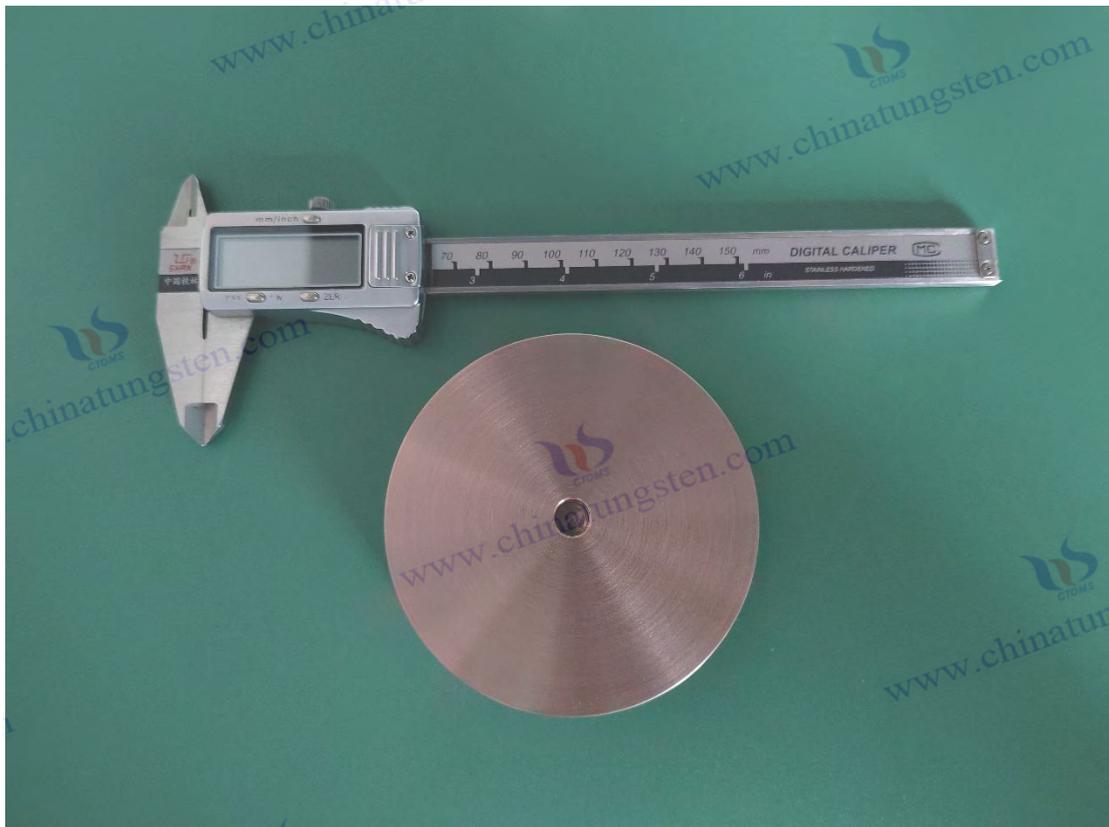
Contrôles de l'exposition et protection individuelle : Aucune protection respiratoire ni mesure de contrôle des poussières particulières n'est requise (en raison de l'absence de poudre). Il est recommandé de porter des gants industriels ordinaires pendant le travail afin d'éviter les blessures par frottement contre des surfaces dures ; des gants isolants thermiques sont nécessaires pour travailler à haute température.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Élimination : Les électrodes usagées peuvent être recyclées comme ferraille et traitées par des organismes de recyclage professionnels pour en extraire le tungstène et le cuivre en vue d'un traitement ultérieur. Les matériaux non recyclables sont traités comme des déchets industriels solides et ne polluent ni les sols ni les eaux.

Informations sur le transport : Aucune restriction particulière n'est imposée pendant le transport et aucun étiquetage des matières dangereuses n'est requis. Il suffit de conserver l'emballage intact et d'éviter toute déformation due à des chocs violents. Le produit peut être expédié dans le même lot que d'autres produits industriels non corrosifs.

Informations réglementaires : Ce produit est conforme à la Loi de la République populaire de Chine sur la prévention et le contrôle de la pollution environnementale par les déchets solides, au Règlement sur la gestion de la sécurité des produits chimiques dangereux et aux autres lois et réglementations applicables. Il ne s'agit pas d'un produit chimique dangereux ni d'une substance toxique, et sa production, sa vente et son transport sont conformes aux normes nationales relatives aux matériaux industriels.



Électrode en cuivre et tungstène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 4 : Classification des électrodes tungstène-cuivre

Les électrodes tungstène-cuivre peuvent être classées selon différentes normes. Les méthodes courantes incluent le rapport de composition, les applications et les procédés de moulage. Selon le rapport tungstène/cuivre, on distingue les électrodes à haute teneur en tungstène et les électrodes à haute teneur en cuivre. Les électrodes à haute teneur en tungstène présentent une teneur élevée en tungstène, une meilleure résistance aux températures élevées et une meilleure dureté, et sont adaptées aux conditions de travail à haute température et à fortes contraintes. Les électrodes à haute teneur en cuivre (comme WCu60/40, WCu70/30) présentent une teneur élevée en cuivre et une conductivité électrique et thermique plus élevée, et sont adaptées aux conditions de travail exigeant un rendement électrique élevé. Selon le domaine d'application, on trouve principalement les électrodes d'électroérosion, les électrodes de soudage, les électrodes de conditionnement microélectronique, etc. Les électrodes d'électroérosion doivent présenter à la fois une résistance à l'ablation et une conductivité électrique, les électrodes de soudage privilégient la stabilité du courant, et les électrodes de conditionnement microélectronique ont des exigences strictes en matière de précision dimensionnelle et d'adaptation thermique.

4.1 Classification des électrodes tungstène-cuivre dominée par le rapport de composition

La classification des électrodes tungstène-cuivre, basée sur le rapport de composition, est une méthode de regroupement des électrodes basée sur le rapport entre la teneur en tungstène et en cuivre. Cette méthode affecte directement les propriétés physiques, mécaniques et électriques des électrodes et répond aux besoins de différents scénarios d'application. Les électrodes tungstène-cuivre sont préparées par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide. Le tungstène offre un point de fusion élevé, une résistance aux températures élevées et une résistance à l'usure élevée, tandis que le cuivre contribue à une conductivité électrique et thermique élevée. L'ajustement du rapport détermine les performances globales de l'électrode. La différence de rapport de composition se reflète principalement dans la teneur en tungstène. Celle-ci est divisée en trois catégories : forte teneur en tungstène, teneur moyenne en tungstène et faible teneur en tungstène. Chaque type d'électrode est optimisé pour des applications spécifiques, telles que l'usinage par électro-étincelage, le soudage par résistance ou le packaging microélectronique. La classification prend également en compte l'influence de la microstructure et du procédé de préparation. Une faible porosité et une distribution de phase uniforme sont des caractéristiques communes à différents types d'électrodes.

4.1.1 Électrodes à haute teneur en tungstène (80 % à 95 % de tungstène)

Électrodes tungstène-cuivre principalement composées de tungstène, avec une teneur en cuivre généralement comprise entre 5 % et 20 %. Ces électrodes présentent une résistance exceptionnelle aux hautes températures et à l'érosion par arc électrique grâce à leur point de fusion élevé (3 422 °C) et à leur dureté (environ 3 430 HV). Par métallurgie des poudres, la poudre de tungstène est mélangée et pressée avec une petite quantité de poudre de cuivre. Après frittage, le cuivre remplit les pores de la phase liquide, formant une structure dense en tungstène. La faible porosité améliore la stabilité du matériau. Un procédé d'infiltration sous vide optimise la pénétration du cuivre et améliore la liaison interfaciale, permettant aux électrodes à forte teneur en tungstène de conserver leur intégrité structurelle même dans des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conditions extrêmes.

Les caractéristiques des électrodes à haute teneur en tungstène les rendent exceptionnelles en usinage par électroérosion (EDM) et sont particulièrement adaptées à l'usinage des matériaux de haute dureté. La haute résistance à l'usure du tungstène réduit les pertes de surface et prolonge la durée de vie. En soudage par résistance, une forte teneur en tungstène permet des opérations de déconnexion à courant élevé, et sa résistance à l'érosion par arc est nettement supérieure à celle des électrodes à faible teneur en tungstène, réduisant ainsi l'adhérence du laitier. La finesse des grains de la microstructure est optimisée grâce au procédé de pressage isostatique à chaud, et la résistance à la compression peut atteindre un niveau élevé, ce qui la rend adaptée aux situations de décharge à haute énergie. Cependant, les électrodes à haute teneur en tungstène présentent une faible conductivité électrique et thermique, et leur faible teneur en cuivre limite l'efficacité de la transmission du courant. Il est donc nécessaire de les utiliser en conjonction avec une conception de dissipation thermique.

Les applications incluent également les composants aérospatiaux et les commutateurs haute tension. La forte teneur en tungstène des électrodes permet une résistance à des températures supérieures à 3 000 °C, et les traitements de surface, comme le nickelage, renforcent encore la résistance à l'oxydation. Lors de la fabrication, la pureté de la poudre de tungstène doit être contrôlée à plus de 99,9 %, avec une granulométrie comprise entre 5 et 15 microns, pour garantir des performances constantes.

4.1.2 Électrodes à teneur moyenne en tungstène (50 % à 80 % de tungstène)

Les électrodes à teneur moyenne en tungstène sont un type d'électrode équilibrée tungstène-cuivre, avec une teneur en cuivre comprise entre 20 % et 50 %. Ces électrodes offrent un bon compromis entre résistance à haute température et conductivité électrique. Fabriquées par métallurgie des poudres ou infiltration sous vide, leur microstructure présente un squelette uniforme de tungstène et un réseau de phases de cuivre. Lors du frittage, le cuivre liquide remplit les pores entre les particules de tungstène. La faible porosité et la finesse des grains sont optimisées par pressage isostatique à chaud, ce qui améliore la résistance mécanique et les propriétés électriques du matériau. La teneur accrue en cuivre améliore la conductivité électrique et thermique, ce qui rend les électrodes à teneur moyenne en tungstène polyvalentes pour de nombreuses applications.

Les électrodes en tungstène moyen sont largement utilisées en usinage par électroérosion (EDM) et conviennent à l'usinage de précision des matériaux de dureté moyenne. La résistance à l'usure du tungstène, combinée à la conductivité du cuivre, réduit les pertes d'électrode et améliore l'efficacité de l'usinage. En soudage par résistance, les électrodes en tungstène moyen supportent les courants moyens et offrent une meilleure gestion thermique que les électrodes à forte teneur en tungstène, réduisant la zone affectée thermiquement et améliorant la qualité des joints. Le packaging microélectronique est une autre application importante, où leur coefficient de dilatation thermique correspond à celui des substrats en silicium ou en céramique, réduisant ainsi les contraintes dues aux cycles thermiques et améliorant la fiabilité. Les performances des électrodes en tungstène moyen dépendent également du rapport et du traitement. Par exemple, un rapport WCu 70/30 assure un équilibre entre durabilité et efficacité, tandis qu'un rapport WCu 60/40 favorise la conductivité. À haute température, le ramollissement de la phase

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cuivre peut légèrement affecter la stabilité, mais le squelette en tungstène assure un soutien. Des traitements de surface tels que le polissage ou le placage peuvent améliorer la résistance à la corrosion et prolonger la durée de vie.

4.1.3 Électrodes à faible teneur en tungstène (20 à 50 % de tungstène)

Les électrodes à faible teneur en tungstène (20 à 50 % de tungstène) sont principalement des électrodes tungstène-cuivre à base de cuivre, dont la teneur en cuivre varie de 50 à 80 %. Ces électrodes présentent d'excellentes propriétés de gestion électrique et thermique grâce à la conductivité électrique ($5,8 \times 10^7$ S/m) et thermique (environ $400 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) élevées du cuivre. Grâce à un procédé de métallurgie des poudres, la poudre de tungstène est mélangée à une forte proportion de poudre de cuivre. Après frittage, le cuivre forme un réseau continu. La faible porosité et la distribution uniforme des phases sont optimisées par pressage isostatique à chaud, améliorant ainsi les performances globales du matériau. Un procédé d'infiltration sous vide, par infiltration de cuivre liquide, améliore encore l'intégrité du chemin conducteur, permettant aux électrodes à faible teneur en tungstène d'exceller en matière de conduction à haut rendement.

Les électrodes à faible teneur en tungstène sont principalement utilisées dans les applications nécessitant une conductivité électrique et thermique élevée, comme le soudage par points ou le soudage à la molette en soudage par résistance. Les hautes performances du cuivre réduisent l'effet thermique de résistance et améliorent la qualité de l'assemblage. En usinage par électro-étincelage, les électrodes à faible teneur en tungstène conviennent à l'usinage grossier des matériaux de faible dureté. La ductilité du cuivre favorise une dispersion rapide de la chaleur et réduit la surchauffe locale. Dans les boîtiers microélectroniques, le coefficient de dilatation thermique s'adapte au substrat, et la conductivité thermique élevée du cuivre favorise la dissipation thermique des puces et prolonge leur durée de vie. Cependant, la résistance aux hautes températures et à l'érosion par arc des électrodes à faible teneur en tungstène est faible, et le faible taux de tungstène limite leur stabilité dans des conditions extrêmes. Elles doivent donc être utilisées en combinaison avec une dissipation thermique ou une décharge à faible énergie.

Lors du processus de fabrication, la pureté de la poudre de cuivre doit être contrôlée à plus de 99,9 %, avec une granulométrie comprise entre 5 et 15 microns. La granulométrie de la poudre de tungstène est légèrement plus importante pour optimiser le remplissage. Des traitements de surface, comme le placage à l'or, peuvent améliorer la résistance à la corrosion et prolonger la durée de vie en milieu humide.

4.2 Classification des électrodes tungstène-cuivre axée sur les scénarios d'application

La classification des électrodes en tungstène-cuivre, orientée vers les scénarios d'application, est une méthode de regroupement des électrodes basée sur des environnements d'utilisation spécifiques et des exigences fonctionnelles. Cette méthode de classification met l'accent sur la conception ciblée et l'optimisation des performances des électrodes dans différents secteurs industriels. Les électrodes en tungstène-cuivre sont préparées par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide. Le point de fusion et la dureté élevés du tungstène s'associent aux conductivités électrique et thermique élevées du cuivre. Le rapport et la microstructure sont ajustés en fonction du scénario d'application pour former un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

matériau à faible porosité et à haute uniformité. La classification s'applique à l'usinage par électroérosion, aux appareils électriques haute tension et aux domaines du soudage. Chaque type d'électrode est optimisé pour des exigences de procédé et de performance spécifiques, telles que la résistance à l'érosion par arc, l'efficacité de la conductivité électrique ou les capacités de gestion thermique.

4.2.1 Électrodes pour EDM

Les électrodes spécialement conçues pour l'usinage par électroérosion (EDM) sont des électrodes tungstène-cuivre, spécialement conçues pour la résistance à l'érosion par arc, la résistance mécanique et la précision d'usinage. Ces électrodes utilisent généralement une teneur élevée en tungstène (par exemple, WCu 80/20 ou WCu 90/10). La poudre de tungstène est mélangée à une petite quantité de poudre de cuivre par métallurgie des poudres. Après frittage, le cuivre remplit les pores de la phase liquide, formant une structure dense en tungstène. Cette faible porosité améliore la résistance aux chocs thermiques. Un procédé d'infiltration sous vide optimise la pénétration du cuivre et améliore la liaison interfaciale, garantissant ainsi la stabilité de l'électrode lors des décharges à haute énergie. La finesse des grains de la microstructure est optimisée par compression isostatique à chaud (CIC), ce qui améliore la résistance à la compression et à l'usure.

Le principal avantage des électrodes conçues pour l'électroérosion réside dans leur résistance à l'érosion par arc. Le point de fusion élevé du tungstène (3 422 °C) et sa dureté (environ 3 430 HV) lui permettent de supporter des températures de décharge de plusieurs milliers de °C, réduisant ainsi l'usure de surface et le rendant idéal pour l'usinage de matériaux très durs tels que le carbure de tungstène et les alliages de titane. La précision d'usinage est garantie, la rugosité de surface étant contrôlée au micron près. La structure à grains fins permet la formation de géométries complexes. En pratique, les électrodes résistent aux décharges à haute énergie, ce qui prolonge leur durée de vie et réduit la fréquence de remplacement.

Cependant, une faible teneur en cuivre peut limiter la conductivité électrique et thermique, ce qui nécessite une conception de dissipation thermique pour éviter toute surchauffe locale. Des traitements de surface tels que le polissage peuvent améliorer la qualité de surface, les rendant ainsi adaptés à la fabrication de moules de précision.

4.2.2 Électrodes pour appareils électriques à haute tension

Électrodes tungstène-cuivre spécialement conçues pour les interrupteurs et contacts électriques haute tension, privilégiant la résistance aux hautes températures, la résistance à l'érosion par arc électrique et la stabilité conductrice. Ces électrodes utilisent généralement une teneur en tungstène moyenne à élevée (par exemple, WCu 70/30 ou WCu 85/15) et sont produites par métallurgie des poudres. La poudre de tungstène est mélangée à de la poudre de cuivre puis frittée, le cuivre remplissant les pores de la phase liquide, formant ainsi un réseau de phases uniforme. La faible porosité améliore la résistance à l'arc électrique du matériau. Un procédé d'infiltration sous vide optimise la pénétration du cuivre, et la compression isostatique à chaud (CIC) améliore encore la liaison interfaciale, garantissant la fiabilité de l'électrode lors des déconnexions haute tension. La finesse des grains de la microstructure assure une résistance élevée à la compression, ce qui la rend adaptée aux sollicitations mécaniques fréquentes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les propriétés des électrodes pour appareils électriques haute tension en font d'excellentes électrodes pour les interrupteurs haute tension. Le point de fusion élevé du tungstène (3 422 °C) le protège de la chaleur de l'arc électrique, tandis que sa résistance à l'érosion par arc électrique réduit l'érosion superficielle et prolonge sa durée de vie. La conductivité élevée du cuivre assure une transmission efficace du courant, le rendant ainsi adapté aux situations de déconnexion à courant élevé. Son coefficient de dilatation thermique s'adapte à celui du substrat, réduisant ainsi les contraintes dues aux cycles thermiques. Sa microstructure optimisée réduit la variabilité de la résistance et assure des performances électriques stables. Dans la pratique, ces électrodes supportent des commutations fréquentes, réduisant ainsi les taux de défaillance. Elles sont largement utilisées dans les équipements électriques et les systèmes de contrôle industriel.

Lors du processus de fabrication, le rapport granulométrique de la poudre de tungstène par rapport à la poudre de cuivre doit être maintenu entre 1:2 et 1:3 afin d'assurer une répartition uniforme des phases. Des traitements de surface tels que le nickelage peuvent améliorer la résistance à l'oxydation et l'adaptabilité aux environnements humides ou industriels. À l'avenir, l'ajustement du rapport de composition ou l'introduction d'interphases (comme le molybdène) permettront d'améliorer encore la résistance à l'arc et la conductivité électrique pour répondre aux tensions plus élevées ou aux exigences électriques complexes, comme dans les équipements de réseaux intelligents.

4.2.3 Électrodes dans le champ de soudage

Électrodes tungstène-cuivre spécialement conçues pour le soudage par résistance, privilégiant la conductivité électrique, la conductivité thermique et les propriétés anti-adhérentes. Ces électrodes utilisent généralement une teneur en tungstène faible à moyenne (par exemple, WCu 60/40 ou WCu 70/30). La poudre de tungstène est mélangée à un pourcentage élevé de poudre de cuivre par métallurgie des poudres. Après frittage, le cuivre forme un réseau continu. La faible porosité est optimisée par pressage isostatique à chaud, améliorant ainsi la gestion thermique et les performances électriques. Le procédé d'infiltration sous vide améliore l'intégrité du chemin conducteur grâce à la pénétration du cuivre liquide. La finesse des grains de la microstructure renforce la résistance à la compression et la ténacité, ce qui les rend idéales pour le soudage haute pression.

Les principaux avantages des électrodes en soudage résident dans leur conductivité électrique et thermique. La conductivité électrique ($5,8 \times 10^7$ S/m) et thermique (environ 400 W/ m · K) élevées du cuivre réduisent les effets de chauffage résistif, améliorent la qualité des joints et répartissent uniformément la chaleur, réduisant ainsi la zone affectée thermiquement (ZAT), ce qui le rend idéal pour le soudage par points ou à la molette. La résistance à haute température du tungstène (3 422 °C) assure un soutien structurel, et ses propriétés anti-adhérentes sont optimisées par des traitements de surface (comme le polissage), qui réduisent l'adhérence du laitier et prolongent la durée de vie des électrodes. Dans la pratique, les électrodes peuvent supporter des courants modérés, garantissant un soudage efficace, et sont largement utilisées dans la construction automobile et l'assemblage électronique.

Lors du processus de fabrication, la pureté de la poudre de cuivre doit être supérieure à 99,9 %, avec une granulométrie comprise entre 5 et 15 microns. Les particules de poudre de tungstène doivent être

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

légèrement plus grosses pour optimiser le remplissage. Les températures de fonctionnement élevées, notamment les températures élevées, peuvent ramollir la phase cuivre, ce qui nécessite une conception intégrée de la dissipation thermique. À l'avenir, l'introduction de nanopoudres de cuivre ou de conceptions multiphasées pourrait améliorer encore la conductivité et les propriétés anti-adhérence, permettant ainsi des applications nécessitant une efficacité accrue ou un soudage complexe, comme les pièces structurelles légères.

4.2.4 Électrodes spéciales pour applications aérospatiales et militaires

Électrodes tungstène-cuivre conçues spécifiquement pour les secteurs aérospatial et militaire, privilégiant la résistance aux hautes températures, la robustesse mécanique et la fiabilité en environnements extrêmes. Ces électrodes utilisent généralement une forte teneur en tungstène et sont fabriquées par métallurgie des poudres ou infiltration sous vide. La poudre de tungstène est mélangée à une petite quantité de poudre de cuivre, puis frittée. Le cuivre remplit les pores sous forme liquide, formant une structure squelette de tungstène robuste. Lors du processus de fabrication, la microstructure est optimisée par compression isostatique à chaud (CIC), ce qui permet d'obtenir une faible porosité et une distribution de phase uniforme, garantissant la stabilité de l'électrode sous fortes contraintes ou températures élevées. L'ajout de cuivre optimise la conductivité électrique et la gestion thermique, permettant ainsi son adaptation à des environnements d'exploitation complexes.

Les principales applications des électrodes spéciales dans les industries aérospatiale et militaire comprennent les systèmes de protection thermique pour engins spatiaux et les contacts électriques pour équipements militaires. Le point de fusion élevé du tungstène lui confère une excellente résistance aux hautes températures, ce qui le rend idéal pour supporter des chocs à haute énergie ou des charges thermiques extrêmes. La résistance mécanique de l'électrode permet un usinage de haute précision et une utilisation à long terme. L'uniformité de la microstructure réduit la concentration de contraintes et améliore la résistance à la fatigue. Dans le domaine militaire, les électrodes sont souvent utilisées dans les composants clés des radars ou des systèmes d'armes hautes performances, qui doivent résister à de fortes vibrations et à des environnements corrosifs. Les traitements de surface, tels que le placage, améliorent encore la résistance aux intempéries. Le processus de préparation met l'accent sur la pureté de la matière première et le contrôle de la granulométrie afin de garantir des performances constantes. Le scénario d'utilisation exige également une excellente résistance à l'érosion par arc et une excellente stabilité thermique. La conductivité thermique du cuivre permet une dissipation rapide de la chaleur et réduit le risque de surchauffe locale.

4.3 Classification des électrodes tungstène-cuivre selon leurs caractéristiques morphologiques et structurelles

Les électrodes tungstène-cuivre sont essentielles à leur adaptabilité à différents scénarios d'application, englobant de multiples dimensions telles que la géométrie, la microstructure et la macromorphologie. Ces caractéristiques ont un impact direct sur l'adaptabilité de l'électrode à son installation, son efficacité et sa compatibilité de traitement. Par conséquent, la classification selon les caractéristiques morphologiques et structurelles est l'une des méthodes les plus intuitives pour la sélection industrielle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.3.1 Électrode de bloc

Les électrodes blocs sont des électrodes tungstène-cuivre conçues sous forme de bloc, adaptées aux applications nécessitant un contact de grande surface ou un support à haute résistance. Ces électrodes sont fabriquées par métallurgie des poudres, où des poudres de tungstène et de cuivre sont mélangées selon un ratio spécifique, puis pressées pour obtenir leur forme. Lors du frittage, le cuivre remplit les pores de la phase liquide, formant une microstructure dense. Le pressage isostatique à chaud optimise l'uniformité et la faible porosité des électrodes blocs, garantissant ainsi la stabilité du matériau sous charge mécanique. La conception du bloc facilite l'usinage et permet la découpe ou le formage en différentes tailles selon les besoins, s'adaptant ainsi aux exigences des diverses applications.

Les caractéristiques de l'électrode bloc la rendent exceptionnelle en électroérosion, adaptée à l'usinage de grandes pièces ou de géométries complexes. Sa grande surface de contact assure des conditions de décharge stables. La répartition uniforme des phases dans la microstructure améliore la résistance à l'érosion par arc, la dureté du tungstène garantit une utilisation à long terme et la conductivité du cuivre optimise la transmission du courant. Lors de la préparation, l'uniformité du mélange des matières premières et le contrôle des paramètres de frittage influencent directement les performances de l'électrode bloc. Un traitement de surface tel que le polissage peut améliorer la précision d'usinage. En soudage, l'électrode bloc peut servir de moule ou de support pour résister aux hautes pressions et aux cycles thermiques. À l'avenir, les propriétés mécaniques et le champ d'application de l'électrode bloc pourront être encore améliorés en ajustant le procédé de pressage ou en adoptant une conception multiphasée.

4.3.2 Électrode à tige

Les électrodes tiges sont des électrodes tungstène-cuivre conçues en forme de tige, adaptées aux applications nécessitant un positionnement précis ou un usinage délicat. Ces électrodes sont fabriquées par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide. Des poudres de tungstène et de cuivre sont mélangées et pressées pour former une tige. Lors du frittage, le cuivre remplit les pores, créant une structure fine et dense. Le pressage isostatique à chaud optimise la microstructure de l'électrode tige, ce qui se traduit par une faible porosité et une distribution de phase uniforme, garantissant ainsi la stabilité du matériau lors des opérations de haute précision. La conception de la tige facilite son installation et son guidage, ce qui la rend particulièrement adaptée aux applications nécessitant l'usinage de trous profonds ou le travail en espaces confinés.

Les électrodes tiges excellent en EDM (usinage par électroérosion) et conviennent à l'usinage de précision ou à la fabrication de microcomposants. Leur forme élancée permet une décharge de haute précision, tandis que la résistance à l'usure du tungstène réduit l'usure des électrodes. La phase de cuivre dans la microstructure assure la conductivité électrique et thermique, favorisant un transfert de courant stable et une gestion thermique optimale. Dans les boîtiers microélectroniques, la forme des électrodes tiges facilite l'alignement avec le substrat, compensant ainsi la dilatation thermique et réduisant la concentration des contraintes. Lors de la fabrication, le rapport longueur/diamètre des électrodes tiges doit être contrôlé pour garantir la résistance mécanique et l'usinabilité. Des traitements de surface tels que le meulage peuvent améliorer la qualité de surface.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.3.3 Électrode en feuille

Les électrodes en feuille sont des électrodes tungstène-cuivre conçues sous forme de feuilles minces, adaptées aux applications nécessitant un contact de grande surface ou une décharge uniforme. Ces électrodes sont fabriquées par métallurgie des poudres, où des poudres de tungstène et de cuivre sont mélangées selon un ratio spécifique et pressées pour former une feuille mince. Lors du frittage, le cuivre remplit les pores sous forme liquide, formant une microstructure dense. Le pressage isostatique à chaud optimise l'uniformité et la faible porosité des électrodes en feuille, garantissant ainsi la stabilité du matériau sous charge mécanique et cycles thermiques. La conception de la feuille offre une grande surface, facilitant un contact étroit avec la pièce ou le substrat, et convient aux exigences d'usinage exigeant une distribution uniforme de la chaleur ou une transmission de courant élevée.

Les électrodes en tôle offrent d'excellentes performances en électroérosion et conviennent à l'usinage de pièces plates ou aux applications nécessitant des décharges de grande surface. La structure fine de la tôle permet une distribution efficace de l'arc, tandis que la résistance à l'usure et à l'érosion par arc du tungstène réduit les pertes de surface et prolonge la durée de vie. La phase de cuivre présente dans la microstructure assure la conductivité électrique et thermique, assurant une transmission stable du courant et une bonne dispersion de la chaleur, réduisant ainsi le risque de surchauffe locale. En soudage, les électrodes en tôle peuvent servir de plaques d'électrodes ou de dissipateurs thermiques, supportant ainsi les hautes pressions et les cycles thermiques, améliorant ainsi la qualité des assemblages. Lors de la préparation, le pressage doit contrôler l'uniformité de l'épaisseur. L'uniformité du mélange des matières premières et les paramètres de frittage influencent directement les performances de l'électrode en tôle. Un traitement de surface tel que le meulage ou le polissage peut améliorer la précision du contact. Les applications incluent également le conditionnement microélectronique et la gestion thermique. La conception fine de l'électrode en feuille facilite le collage à la puce ou au substrat, et la compensation de la dilatation thermique réduit la concentration des contraintes et améliore la fiabilité. La flexibilité de l'électrode en feuille lui permet de s'adapter à des géométries complexes, mais il convient de veiller à éviter toute déformation de la feuille lors de la fabrication.

4.3.4 Électrodes de forme spéciale

Les électrodes de forme spéciale sont les plus complexes des électrodes tungstène-cuivre. Leur forme est entièrement personnalisable selon les exigences fonctionnelles de scénarios d'application spécifiques, dépassant les limites des formes classiques telles que les blocs et les tiges, et englobant une variété de structures non standard telles que des surfaces de forme spéciale, des formes étagées, des formes poreuses, des grilles creuses et des surfaces composites. La conception de ce type d'électrode doit être étroitement intégrée aux paramètres de fonctionnement, à l'espace d'assemblage et aux objectifs de performance du produit final. De la modélisation initiale à la formation finale, de multiples simulations sont nécessaires, et une précision d'usinage extrêmement élevée est requise. Le moindre écart peut affecter directement la stabilité des procédés en aval ou les indicateurs de performance du produit final.

En termes de conception morphologique, le cœur des électrodes de forme spéciale réside dans l'orientation fonctionnelle. Par exemple, pour l'usinage complexe des cavités des moules de capots

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

automobiles, les électrodes en tungstène-cuivre de forme spéciale doivent reproduire intégralement les contours courbes de la cavité, y compris les détails tels que les congés, les rainures profondes et les pentes, et même simuler l'angle de dépouille lors du formage de la pièce. Cette conception morphologique « à l'image miroir » permet d'assurer l'uniformité de l'espace de décharge lors de l'usinage par électro-étagage, et donc la finition de surface et la précision d'assemblage des capots automobiles. Pour l'usinage du tube à flamme des chambres de combustion des moteurs d'avion, les électrodes de forme spéciale sont souvent conçues comme des structures courbes présentant des micro-rainures denses. Ces micro-rainures correspondent exactement aux canaux de refroidissement du tube à flamme. Les canaux formés par usinage par électro-étagage doivent respecter une stricte cohérence dimensionnelle, sous peine de provoquer un refroidissement local irrégulier et une défaillance par fatigue thermique pendant le fonctionnement du moteur.

Les électrodes étagées de forme spéciale sont largement utilisées dans les usinages multipostes. Leurs différentes sections correspondent à différentes profondeurs d'usinage ou exigences de précision. Par exemple, pour l'usinage intégré du cadre central d'un téléphone portable, la première section de l'électrode étagée sert à l'ébauche afin d'enlever une grande quantité de matière, la deuxième section réalise une découpe fine en réduisant le diamètre, et la troisième section complète l'arrondi par la transition en arc de cercle à l'extrémité. Cette conception « serrage unique, formage multi-étapes » permet de réduire le nombre de changements d'outils, d'améliorer l'efficacité de l'usinage et d'éviter les erreurs de positionnement dues aux serrages multiples. La différence de hauteur et de diamètre des échelons doit être calculée avec précision en fonction de la dureté du matériau et des tolérances d'usinage. Un écart de taille d'un échelon donné peut entraîner un dépassement de la norme pour l'erreur cumulée lors de l'usinage ultérieur.

La conception d'électrodes poreuses profilées vise à concilier efficacité de dissipation thermique et légèreté. Dans la fabrication des stators des moteurs de véhicules à énergies nouvelles, les électrodes nécessitent des trous traversants en nid d'abeille. Ces trous réduisent non seulement le poids des électrodes, mais permettent également à l'air interne de dissiper rapidement la chaleur générée par la décharge, évitant ainsi toute déformation thermique susceptible d'altérer la précision de l'usinage. Lors de l'usinage des composants d'échangeurs de chaleur destinés aux équipements nucléaires, les trous traversants des électrodes poreuses profilées doivent correspondre parfaitement aux trous du faisceau tubulaire de l'échangeur. À défaut, des jeux irréguliers se produiront lors de l'assemblage ultérieur des tubes, ce qui affectera l'efficacité du transfert thermique.

Le procédé de formage des électrodes de forme spéciale joue un rôle déterminant dans la précision morphologique. Le procédé de découpe au fil permet la découpe bidimensionnelle de contours complexes et est adapté aux structures planes de forme spéciale ; le procédé de formage par électro-étagage permet de traiter des surfaces courbes tridimensionnelles, de reproduire des formes complexes grâce au mouvement synchrone de l'électrode et de la pièce, et d'assurer la finition de surface. Pour les électrodes poreuses de forme spéciale à canaux internes, il est également nécessaire de combiner le perçage profond, le perçage laser et d'autres procédés afin de garantir la verticalité et la pénétration des trous. Pendant l'usinage, les erreurs morphologiques doivent être détectées en temps réel par des équipements de mesure de précision. Dès qu'une dimension d'élément est hors tolérance, les paramètres d'usinage doivent être

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ajustés immédiatement, sous peine de mise au rebut de l'électrode entière. Cette recherche extrême de précision rend le coût de fabrication des électrodes de forme spéciale bien plus élevé que celui des électrodes de forme standard, mais elle en fait également un composant essentiel dans le secteur de la fabrication haut de gamme.

4.4 Classification des électrodes en cuivre et tungstène basée sur des indicateurs de performance

La classification des électrodes tungstène-cuivre, axée sur les performances, regroupe les électrodes selon des exigences de performance spécifiques, en mettant l'accent sur l'optimisation d'indicateurs clés tels que la conductivité, la résistance aux hautes températures ou la résistance mécanique. Cette méthode de classification permet de concevoir des électrodes spécialisées répondant à différentes exigences de performance en ajustant les ratios tungstène-cuivre et le procédé de préparation. La microstructure des électrodes tungstène-cuivre est optimisée par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide, ce qui permet d'obtenir une faible porosité et une distribution de phase uniforme. Le pressage isostatique à chaud améliore encore la constance des performances. Les critères de classification incluent une conductivité élevée, une résistance aux hautes températures ou une résistance mécanique élevée, chaque type d'électrode excellant dans des applications spécifiques.

4.4.1 Électrodes hautement conductrices

Les électrodes à haute conductivité sont des électrodes tungstène-cuivre conçues pour une transmission efficace du courant, privilégiant une conductivité et une résistivité optimales. Ces électrodes utilisent généralement une faible teneur en tungstène. La poudre de tungstène est mélangée à une forte proportion de poudre de cuivre par un procédé de métallurgie des poudres, et le cuivre forme un réseau conducteur continu lors du frittage. La microstructure est optimisée par compression isostatique à chaud (CIC) pour obtenir une faible porosité et une distribution de phase uniforme. La conductivité élevée du cuivre (taux proche de celui du cuivre pur) assure une transmission efficace du courant. Un procédé d'infiltration sous vide améliore encore l'intégrité du chemin conducteur grâce à l'infiltration de cuivre liquide, permettant aux électrodes à haute conductivité d'exceller dans les applications électriques. Les principales applications des électrodes hautement conductrices comprennent le soudage par résistance et le conditionnement microélectronique. La conductivité élevée du cuivre assure une transmission stable du courant, réduit les effets de l'échauffement par résistance et améliore la qualité des joints et l'efficacité des connexions des circuits. En soudage par résistance, les électrodes supportent des courants modérés, répartissent uniformément la chaleur et réduisent la zone affectée thermiquement, ce qui les rend idéales pour le soudage par points ou à la molette. Dans le conditionnement microélectronique, la faible résistivité des électrodes hautement conductrices assure une transmission efficace du signal, tandis que la conductivité thermique du cuivre favorise la dissipation thermique des puces et améliore la fiabilité. Le réseau de phases de cuivre uniforme dans la microstructure réduit la diffusion des électrons. La pureté de la poudre de cuivre lors du processus de préparation doit être élevée et la granulométrie doit être contrôlée dans une certaine plage pour garantir des performances constantes.

Des conditions de fonctionnement telles que des températures élevées peuvent ramollir la phase cuivre, affectant ainsi la stabilité conductrice. Une conception de la dissipation thermique ou un traitement de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

surface (comme le placage à l'or) sont nécessaires pour maintenir les performances. Ce traitement de surface peut également améliorer la résistance à la corrosion et prolonger la durée de vie en milieu humide. Les électrodes hautement conductrices affichent des performances supérieures en haute fréquence ou à fort courant et sont largement utilisées dans les équipements électroniques et la construction automobile.

4.4.2 Électrodes résistantes à l'érosion par arc

Électrodes tungstène-cuivre spécialement conçues pour les environnements d'arc à haute énergie, privilégiant la résistance à l'érosion par arc et la stabilité de surface. Ces électrodes utilisent généralement une forte teneur en tungstène. La poudre de tungstène est mélangée à une petite quantité de poudre de cuivre par un procédé de métallurgie des poudres. Après frittage, le cuivre remplit les pores de la phase liquide, formant une structure squelette en tungstène robuste. La microstructure est optimisée par compression isostatique à chaud (CIC) pour présenter une faible porosité et une distribution de phase uniforme. Le point de fusion élevé et la dureté du tungstène lui confèrent une excellente résistance à l'arc. Un procédé d'infiltration sous vide, par infiltration de cuivre liquide, améliore encore la liaison interfaciale, garantissant ainsi la durabilité de l'électrode lors de décharges répétées.

Les principales applications des électrodes résistantes à l'érosion par arc électrique comprennent l'usinage par électro-étincelage et les commutateurs haute tension. Le point de fusion élevé du tungstène résiste aux arcs électriques à haute température (des milliers de degrés), réduit la fusion ou l'évaporation en surface et prolonge la durée de vie. En usinage par électro-étincelage, l'électrode permet de traiter des matériaux très durs, de réduire les pertes par érosion et de maintenir la précision d'usinage. Dans les commutateurs haute tension, la résistance à l'arc électrique de l'électrode permet des coupures de courant fréquentes et limite les dommages de surface. Le réseau de phases de tungstène uniforme dans la microstructure réduit la concentration des contraintes thermiques, et les traitements de surface tels que le polissage ou le placage peuvent améliorer la résistance à l'oxydation et s'adapter aux environnements industriels. Lors de la préparation, la pureté de la poudre de tungstène doit être élevée et la granulométrie doit être contrôlée dans une certaine plage pour garantir des performances constantes. Les scénarios d'utilisation incluent également des applications spécifiques nécessitant une décharge à haute énergie. La conductivité thermique du cuivre favorise la dispersion de la chaleur et réduit le risque de surchauffe locale.

4.4.3 Électrodes à haute résistance

Électrodes tungstène-cuivre conçues spécifiquement pour les environnements à fortes contraintes mécaniques, privilégiant la résistance à la compression et à la déformation. Ces électrodes utilisent généralement une teneur en tungstène moyenne à élevée (par exemple, WCu 85/15 ou WCu 70/30) et sont produites par métallurgie des poudres. Les poudres de tungstène et de cuivre sont mélangées et compactées, et le cuivre remplit les pores lors du frittage, créant une microstructure dense. Le pressage isostatique à chaud optimise la liaison interfaciale, ce qui produit une microstructure à faible porosité et à distribution de phase uniforme. Le squelette en tungstène offre une résistance élevée à la compression. Un procédé d'infiltration sous vide, par infiltration de cuivre liquide, renforce encore la résistance globale

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

du matériau, le rendant ainsi adapté aux opérations sous fortes charges.

Les principales applications des électrodes à haute résistance comprennent l'enlèvement de matière en masse dans l'usinage par électro-étincelage (EDM) et le soudage haute pression. La dureté élevée du tungstène offre une résistance aux chocs mécaniques, tandis que la ductilité du cuivre optimise la répartition des contraintes et réduit la formation de fissures. Dans les boîtiers microélectroniques, les électrodes à haute résistance supportent les contraintes des cycles thermiques et du serrage mécanique, améliorant ainsi leur fiabilité. La finesse de leur microstructure améliore la résistance à la fatigue. Le rapport granulométrique des poudres de tungstène et de cuivre doit être adapté pendant le processus de fabrication pour assurer une répartition uniforme des phases. Les traitements de surface, comme le meulage, peuvent améliorer la résistance à l'usure et prolonger la durée de vie.

Les conditions de fonctionnement, telles que les températures élevées, peuvent affecter la stabilité de la phase cuivre, ce qui nécessite une conception de dissipation thermique pour maintenir les performances. Les électrodes à haute résistance excellent dans les environnements à fortes contraintes et sont largement utilisées dans les composants aérospatiaux et les moules industriels.

4.4.4 Électrodes à haute résistance à la chaleur

Électrodes tungstène-cuivre conçues spécifiquement pour les environnements à températures extrêmement élevées, privilégiant la stabilité à haute température et les capacités de gestion thermique. Ces électrodes utilisent généralement une teneur élevée en tungstène (par exemple, WCu 90/10 ou WCu 85/15) et sont produites par métallurgie des poudres. La poudre de tungstène est mélangée à une petite quantité de poudre de cuivre. Après frittage, le cuivre remplit les pores de la phase liquide, formant une structure squelette de tungstène robuste. La microstructure est optimisée par compression isostatique à chaud (CIC) pour obtenir une faible porosité et une distribution de phase uniforme. Le point de fusion élevé du tungstène assure une excellente stabilité thermique. Un procédé d'infiltration sous vide, infiltrant du cuivre liquide, améliore l'intégrité du chemin de conduction thermique, garantissant ainsi la performance de l'électrode à haute température.

Les principales applications des électrodes résistantes aux hautes températures comprennent les capteurs haute température et les systèmes de protection thermique aérospatiaux. Le point de fusion élevé du tungstène supporte des environnements à haute température (plus de milliers de degrés), et la conductivité thermique du cuivre favorise la dispersion de la chaleur, réduisant ainsi le risque de surchauffe locale. Dans les boîtiers microélectroniques, la stabilité thermique de l'électrode garantit la fiabilité de la puce en fonctionnement à haute température, et la compatibilité avec la dilatation thermique réduit la concentration de contraintes. Le réseau uniforme de phases de tungstène dans la microstructure réduit la fatigue thermique, et les traitements de surface tels que le nickelage peuvent améliorer la résistance à l'oxydation et s'adapter aux environnements humides ou industriels. Lors du processus de préparation, la pureté de la poudre de tungstène doit atteindre un niveau élevé et la granulométrie doit être contrôlée dans une certaine plage pour garantir des performances thermiques constantes. Les scénarios d'utilisation incluent également des applications spécifiques nécessitant des charges thermiques élevées. La phase de cuivre peut se ramollir à haute température, mais le squelette de tungstène assure son soutien.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4,5 Classification des électrodes tungstène-cuivre par microstructure

La microstructure est déterminée par le procédé de préparation et reflète l'état de distribution et le mode de liaison des deux phases tungstène-cuivre. Elle se divise principalement en dispersion uniforme, remplissage squelettique et distribution à gradient. Différentes structures ont un impact significatif sur la conductivité électrique, la conductivité thermique et les propriétés mécaniques de l'électrode.

4.5.1 Électrodes uniformément dispersées

Les électrodes uniformément dispersées sont les électrodes tungstène-cuivre les plus équilibrées microstructurellement. Leur principale caractéristique réside dans la répartition très uniforme des particules de tungstène et des phases de cuivre. Dans cette structure, de minuscules particules de tungstène sont uniformément intégrées dans la matrice de cuivre sous une forme discrète. Il n'y a ni agglomération localisée de particules de tungstène, ni ségrégation ni agrégation de phases de cuivre. L'interface entre les deux phases est étroitement liée par frittage à haute température par métallurgie des poudres, présentant une morphologie microscopique « toi en moi, moi en toi ». Cette structure brise les limites des propriétés d'un seul métal, permettant à la résistance à haute température du tungstène de s'harmoniser avec la conductivité électrique et thermique du cuivre, tout en évitant les défauts de performance causés par une répartition inégale des composants.

La clé pour obtenir cette structure de dispersion uniforme réside dans le contrôle précis du processus de préparation. Tout d'abord, les poudres de tungstène et de cuivre doivent être traitées en profondeur par un procédé de mélange par broyage à boulets, afin que les deux poudres soient parfaitement en contact et raffinées sous l'action de la force mécanique pour former une poudre mixte de composition uniforme. Ensuite, cette poudre est pressée dans une ébauche par un procédé de pressage uniforme afin de garantir une transmission uniforme de la pression à toutes les parties de l'ébauche et d'éviter les différences de densité locales. Enfin, lors de l'étape de frittage, la température et le temps de maintien sont contrôlés avec précision afin de favoriser la diffusion et la fusion du tungstène et du cuivre à l'interface pour former une liaison stable. L'ensemble du processus doit absolument éviter le mélange d'impuretés ou les fluctuations des paramètres de procédé, sous peine de compromettre l'uniformité. Par exemple, un temps de broyage à boulets insuffisant entraînera un mélange irrégulier des poudres, et une température de frittage trop basse affectera la force de liaison de l'interface, ce qui entraînera des défauts dans la microstructure.

Le principal avantage de l'électrode à structure de dispersion uniforme réside dans la constance de ses performances. À l'échelle macro, la conductivité, la conductivité thermique, la dureté et d'autres indicateurs de l'électrode restent stables dans différentes zones et ne fluctuent pas significativement en cas de changement de position. Cette caractéristique la rend exceptionnelle dans les applications exigeant une constance de performances stricte, comme l'électroérosion de précision : lorsque l'électrode et la pièce subissent une décharge haute fréquence, la microstructure uniforme assure une répartition uniforme de la densité de courant à la surface de l'électrode, évitant ainsi la concentration de l'énergie de décharge due aux différences de résistance locales. Cela réduit les irrégularités ou les marques de brûlure à la surface de la pièce et garantit la constance de la finition usinée. Même lors d'un usinage continu de longue

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durée, cette uniformité permet de maintenir la stabilité des paramètres de décharge et de réduire les écarts de processus dus aux fluctuations de performances de l'électrode.

Dans les applications de soudage haute fréquence, les avantages des électrodes uniformément dispersées sont également significatifs. Pendant le soudage, l'électrode doit transmettre de manière stable le courant haute fréquence à la zone de soudure et assurer la fusion du matériau par résistance. Si la microstructure de l'électrode est irrégulière, les zones locales à haute résistance généreront une chaleur excessive, provoquant une surchauffe, voire un collage de la soudure ; tandis que les zones à faible résistance pourraient ne pas être suffisamment chauffées, produisant une soudure froide. La structure uniformément dispersée assure une répartition uniforme du courant pendant la transmission grâce à un réseau conducteur de phase cuivre continu et uniforme, garantissant ainsi la stabilité de la chaleur au niveau de la soudure, garantissant ainsi la formation complète du noyau en fusion et évitant les dommages dus à la surchauffe. Parallèlement, les particules de tungstène uniformément réparties assurent un support mécanique constant à l'électrode, empêchant toute déformation locale lors des contacts répétés et prolongeant ainsi sa durée de vie. Les avantages de cette structure en termes de gestion thermique sont incontournables. Dans les dispositifs électroniques de forte puissance, les électrodes tungstène-cuivre servent souvent de dissipateurs thermiques. Le réseau de conductivité thermique uniforme diffuse rapidement et uniformément la chaleur des points chauds à travers l'électrode, la dissipant par le dissipateur thermique, évitant ainsi toute accumulation localisée de chaleur et toute dégradation des performances du dispositif. Même dans des environnements soumis à de fortes variations de température, la microstructure uniforme réduit les contraintes internes dues aux dilatations thermiques différentielles, diminuant ainsi le risque de fissuration de l'électrode.

4.5.2 Électrodes remplies de squelette

L'électrode à squelette rempli est un matériau composite tungstène-cuivre qui offre des performances synergétiques grâce à une conception structurelle unique. Sa principale caractéristique est la formation d'un réseau interpénétrant « squelette tungstène-cuivre rempli ». Dans cette structure, le tungstène forme le corps porteur de l'électrode sous la forme d'un squelette continu, à l'image de la charpente métallique d'un bâtiment, offrant une base structurelle solide à l'ensemble de la structure ; tandis que la phase cuivre remplit entièrement les pores du squelette tungstène, formant un chemin conducteur continu. Les deux composants conservent non seulement leurs avantages respectifs en termes de performances, mais créent également une synergie fonctionnelle grâce à leur complémentarité structurelle. Cette conception s'affranchit des limites de performance d'un seul matériau métallique, permettant à l'électrode de posséder simultanément des propriétés composites de haute résistance mécanique, de résistance aux températures élevées et de conductivité électrique et thermique élevée.

La clé de la préparation d'électrodes à squelette rempli réside dans le contrôle précis du processus d'infiltration sous vide, divisé en deux étapes principales. La première est la préfabrication du squelette en tungstène : après mélange de la poudre de tungstène selon une formule spécifique, elle est pressée dans un moule, puis frittée à haute température pour former un squelette poreux présentant une certaine porosité. Lors du frittage, les particules de tungstène sont solidement liées par soudage par diffusion, formant un réseau tridimensionnel continu, et les pores du squelette réservent de l'espace pour le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

remplissage ultérieur de la phase de cuivre. À ce stade, le squelette en tungstène présente déjà une résistance mécanique et une résistance aux températures élevées, mais sa faible conductivité doit être compensée par des étapes ultérieures.

La deuxième étape est l'infiltration de la phase de cuivre : le squelette de tungstène préfabriqué est placé sous vide, entouré de cuivre et chauffé au-dessus de son point de fusion. Sous l'action combinée de la température élevée et du vide, le cuivre solide se liquéfie et, grâce à la capillarité et à la pénétration par gravité, il se répartit uniformément le long des pores du squelette de tungstène jusqu'à combler tous les vides. Le rôle du vide est crucial. Il empêche l'air de se mélanger et de former des bulles et assure la formation d'un réseau conducteur continu et ininterrompu dans les pores. Après refroidissement, le squelette de tungstène et la phase de cuivre forment une structure interpénétrante étroitement intégrée : le squelette de tungstène assure la résistance à la déformation et le support à haute température, tandis que la phase de cuivre assure la transmission du courant et la dissipation thermique. Ces deux éléments se complètent et confèrent à l'électrode d'excellentes performances globales.

Les avantages de performance des électrodes à squelette sont particulièrement évidents dans les applications haute température et haute pression. La structure continue de son squelette en tungstène lui confère une résistance mécanique et thermique bien supérieure à celle du cuivre pur. Même dans des environnements à températures extrêmes, elle conserve sa stabilité structurelle et ne se ramollit ni ne se déforme facilement. Le remplissage en phase cuivre assure une excellente conductivité électrique et thermique, dissipant rapidement la chaleur des zones à haute température et évitant toute dégradation des performances due à une surchauffe locale. Cette caractéristique en fait un choix idéal pour les conditions de travail extrêmes dans l'aérospatiale, l'énergie nucléaire et d'autres secteurs.

Dans les applications d'électrodes de tuyère de moteur-fusée, les électrodes à squelette présentent des avantages uniques. Composant essentiel du système de propulsion de la fusée, la tuyère doit résister à l'érosion continue du gaz à haute température pendant son fonctionnement, tout en nécessitant un allumage et un contrôle de la flamme par des électrodes. À ce stade, le squelette en tungstène, grâce à son point de fusion extrêmement élevé et à sa résistance structurelle, résiste à l'érosion du gaz à haute température, empêchant ainsi la fusion ou la déformation de l'électrode. La phase de cuivre contenue dans le squelette dissipe rapidement la grande quantité de chaleur générée par l'érosion du gaz par un chemin continu, évitant ainsi toute défaillance structurelle due à une surchauffe localisée. Ce mécanisme synergique, « le tungstène résiste à l'ablation et le cuivre conduit la chaleur », assure le fonctionnement stable à long terme de l'électrode de tuyère dans des environnements extrêmes.

Les électrodes à squelette jouent également un rôle important dans les composants d'électrodes haute température des équipements nucléaires. Lorsqu'un réacteur nucléaire est en fonctionnement, l'environnement interne est non seulement extrêmement chaud, mais aussi soumis à une pression et à des radiations élevées, ce qui impose des exigences strictes en matière de stabilité du matériau. Dans ce cas, le squelette en tungstène constitue la structure principale, capable de résister au fluage et à la corrosion à des températures élevées prolongées et de maintenir la stabilité dimensionnelle de l'électrode. La phase de cuivre, quant à elle, assure la conductivité de l'électrode sous courant élevé, tout en conduisant rapidement la chaleur du réacteur vers le système de refroidissement afin de prévenir les risques de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sécurité liés à l'accumulation de chaleur. De plus, le tungstène et le cuivre présentant une bonne stabilité aux radiations, les électrodes dotées de cette structure peuvent également maintenir des performances stables en environnement radioactif, évitant ainsi la dégradation fonctionnelle due au vieillissement du matériau.

Dans l'application des électrodes aux fours à arc électriques industriels, les avantages des électrodes à squelette sont également évidents. En fonctionnement, l'arc électrique à haute température généré entre l'électrode et la charge est extrêmement chaud, et l'électrode doit résister à des chocs mécaniques et thermiques fréquents. La haute résistance du squelette en tungstène empêche la rupture de l'électrode sous l'impact et sa résistance aux hautes températures permet de résister à la combustion directe de l'arc. La conductivité élevée de la phase de cuivre assure la stabilité de l'arc, tout en dissipant rapidement la chaleur de l'arc, évitant ainsi la perte de l'extrémité de l'électrode due à une surchauffe. Comparées aux autres types d'électrodes, les électrodes à squelette présentent une durée de vie plus longue et des performances de travail plus stables dans des conditions de travail à haute fréquence et à haute intensité.

En résumé, l'électrode à squelette remplit un équilibre parfait entre propriétés mécaniques et fonctionnelles grâce à sa conception structurelle « support squelette tungstène-fonction phase cuivre ». Ses performances sont particulièrement remarquables dans des environnements extrêmes tels que les températures et les pressions élevées, ce qui en fait un matériau incontournable dans l'industrie haut de gamme.

4.5.3 Électrode de distribution de gradient

L'électrode à gradient de distribution est une conception structurale hautement ciblée pour les composites tungstène-cuivre. Sa principale caractéristique est une distribution variable continue du rapport tungstène/cuivre sur la section transversale de l'électrode. D'une extrémité à l'autre de l'électrode, la teneur en tungstène peut augmenter progressivement tandis que la teneur en cuivre diminue, ou inversement, ce qui produit une microstructure offrant une transition de performance en douceur. Cette conception rompt avec la distribution uniforme des composants des matériaux composites traditionnels. Grâce à un contrôle précis du gradient de composition, différentes zones de l'électrode privilégient les avantages de performance du tungstène ou du cuivre, tandis que l'effet tampon de la zone de transition prévient les problèmes de contraintes interfaciales causés par des variations brutales de performance.

En termes de performances, l'électrode à distribution de gradient présente d'importantes caractéristiques de « fonctionnalisation régionale ». La zone à forte teneur en tungstène présente une excellente résistance aux hautes températures et à l'usure grâce à son point de fusion élevé et à sa grande résistance mécanique, et permet de maintenir une stabilité structurelle dans des environnements à très hautes températures. La zone à forte teneur en cuivre, quant à elle, s'appuie sur sa conductivité électrique et thermique élevée pour assurer une transmission efficace du courant et une dissipation thermique efficace. Plus important encore, la composition de la zone de transition intermédiaire évolue lentement, assurant une connexion fluide des deux propriétés à la jonction. Il n'y a ni chute brutale de la conductivité électrique due à une augmentation soudaine de la teneur en tungstène, ni diminution brutale de la résistance à haute température due à une augmentation soudaine de la teneur en cuivre. Cette évolution progressive des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

performances résout efficacement le problème courant de concentration de contraintes lors de la connexion de matériaux hétérogènes et améliore considérablement la fiabilité de l'électrode dans des conditions de travail complexes.

La préparation d'électrodes à gradient distribué est un processus technique extrêmement complexe et nécessite un contrôle précis de la distribution de la composition. Les méthodes de préparation courantes incluent la métallurgie des poudres en couches et le frittage à gradient. La méthode de métallurgie des poudres en couches consiste à déposer des poudres mélangées présentant différents rapports tungstène-cuivre en couches selon l'ordre de gradient défini, et à obtenir une transition continue de la composition par pressage et frittage uniques. La différence de composition de chaque couche de poudre doit être contrôlée avec précision pour garantir la fluidité de la zone de transition. La méthode de frittage à gradient consiste à guider la diffusion directionnelle du tungstène ou du cuivre à l'intérieur du matériau en régulant le champ thermique ou atmosphérique pendant le frittage, formant ainsi un gradient de composition naturel. Quelle que soit la méthode utilisée, il est nécessaire d'utiliser une technologie de simulation avancée pour pré-concevoir la courbe de distribution de la composition et garantir la cohérence de la distribution réelle avec la conception grâce à un contrôle précis des paramètres du procédé. Le moindre écart peut entraîner une modification des performances dans la zone de transition.

Composants structuraux thermiques dans l'industrie aérospatiale. Par exemple, lorsqu'un vaisseau spatial rentre dans l'atmosphère depuis l'espace, la surface de la capsule de rentrée subit une friction intense avec l'atmosphère, générant des températures extrêmement élevées. Le matériau de surface de la capsule doit donc présenter une excellente résistance aux hautes températures et à l'oxydation. De plus, les instruments de précision à l'intérieur de la capsule sont extrêmement sensibles à la température et nécessitent un système de dissipation thermique efficace pour maintenir une température de fonctionnement adéquate. Dans ce cas, des électrodes à gradient de distribution jouent un rôle clé reliant la surface de la capsule au système de dissipation thermique interne. L'extrémité extérieure, face à la capsule, est conçue avec une forte teneur en tungstène, offrant une résistance aux hautes températures pour supporter la chaleur intense de rentrée, empêchant ainsi la fusion ou l'oxydation de la surface. L'extrémité intérieure, face à la capsule, est construite avec une forte teneur en cuivre, dont l'excellente conductivité thermique permet de transférer rapidement la chaleur absorbée par la surface vers le dissipateur thermique interne, empêchant ainsi la dissipation thermique vers les instruments. La zone de transition assure une transition en douceur des performances, dissipant les contraintes importantes causées par les différences de température internes et externes et les différences de propriétés des matériaux, empêchant la fissuration ou le détachement de l'électrode lors de cycles thermiques répétés.

Les électrodes à gradient distribué jouent également un rôle essentiel dans les composants de la chambre de combustion des moteurs d'avion à grande vitesse. L'intérieur de la chambre de combustion est exposé à des températures et des pressions élevées pendant le fonctionnement. Le flux d'air à haute température généré par la combustion du carburant crée un fort effet de décapage sur les parois de la chambre, ce qui exige une résistance thermique et une résistance à l'abrasion extrêmement élevées de la face exposée. Parallèlement, l'extérieur de la chambre de combustion doit être relié au système de refroidissement pour dissiper rapidement la chaleur et éviter toute surchauffe globale, ce qui exige une bonne conductivité thermique du matériau extérieur. Grâce à la conception rationnelle du gradient tungstène/cuivre,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

l'électrode à gradient distribué présente des propriétés élevées en tungstène à l'intérieur de la chambre de combustion pour résister à l'abrasion à haute température, tandis que les propriétés élevées en cuivre à l'extérieur garantissent une dissipation thermique efficace. La zone de transition intermédiaire résout les conflits de performances et les contradictions de contraintes entre l'intérieur et l'extérieur, garantissant ainsi l'intégrité structurelle et la stabilité des performances de la chambre de combustion pendant un fonctionnement à haute fréquence et à long terme.

De plus, les électrodes à gradient distribué présentent des avantages uniques pour la dissipation thermique des semi-conducteurs haute puissance. Lorsqu'un semi-conducteur fonctionne, une grande quantité de chaleur est générée au cœur de la puce, ce qui nécessite une conductivité thermique efficace pour dissiper la chaleur. La partie de l'électrode connectée au circuit externe nécessite une bonne conductivité électrique afin de réduire les pertes de transmission du signal. Grâce à une répartition progressive du cuivre entre les contacts de la puce et les connexions du circuit, l'électrode répond simultanément aux exigences de dissipation thermique efficace et de faible conductivité électrique, tout en évitant les problèmes de dissipation thermique insuffisante ou de mauvaise conductivité électrique causés par les limitations de performance d'un seul matériau.

4.6 Classification des électrodes tungstène-cuivre selon leur forme physique macroscopique

La morphologie physique macroscopique se concentre principalement sur l'état de surface, la densité et le mode composite de l'électrode, qui est divisé en type dense, type poreux et type de revêtement composite pour répondre à différentes exigences fonctionnelles.

4.6.1 Électrode dense

électrodes tungstène-cuivre la plus répandue . Leur principale caractéristique est leur porosité interne extrêmement faible. Les particules de tungstène et les phases de cuivre sont étroitement liées pour former une microstructure continue et dense, produisant une surface lisse et plane. Cette structure confère à l'électrode non seulement d'excellentes performances globales, mais lui permet également de fonctionner de manière stable et fiable dans divers scénarios industriels, ce qui en fait un matériau de choix pour la fabrication de précision.

La clé pour obtenir cette structure dense réside dans des procédés de préparation avancés, le frittage haute pression et le pressage isostatique à chaud étant les approches techniques les plus couramment utilisées. Le frittage haute pression applique une pression élevée continue sur la poudre mixte tungstène-cuivre à haute température, forçant les particules à entrer en contact, à diffuser et à fusionner, éliminant ainsi les pores formés entre elles. Le pressage isostatique à chaud va plus loin en appliquant une pression uniforme dans toutes les directions sur l'ébauche à travers un milieu fluide à haute température, compactant ainsi complètement les minuscules pores du matériau et formant ainsi une structure dense quasiment exempte de défauts. L'objectif principal des deux procédés est le même : grâce à l'effet synergique de la pression et de la température, les barrières physiques entre les particules sont brisées, ce qui permet d'obtenir une liaison étroite entre les deux phases tungstène-cuivre et de poser les bases structurelles des hautes performances de l'électrode.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

L'avantage des électrodes denses en termes de performances réside dans leur intégrité structurelle. Premièrement, leur faible porosité garantit que la phase de cuivre forme un réseau conducteur continu et ininterrompu. Le courant ne produit pas de variations de résistance locales dues à l'obstruction des pores pendant la transmission, et les performances conductrices sont stables et efficaces. Parallèlement, la microstructure étroitement intégrée assure une conduction thermique fluide, permettant une diffusion rapide de la chaleur générée lors du traitement ou de l'usinage, évitant ainsi toute dégradation des performances due à une surchauffe locale. Deuxièmement, la structure dense confère à l'électrode une résistance mécanique et une résistance à la déformation supérieures. Sous pression mécanique ou contrainte thermique, elle est difficile à fissurer ou à casser et conserve une forme stable pendant longtemps, prolongeant ainsi sa durée de vie. De plus, sa surface lisse et plane réduit les fluctuations de résistance au contact de la pièce et limite le risque d'adhérence d'impuretés pendant le traitement, ce qui améliore la stabilité du procédé.

Dans le domaine de l'électroérosion, les avantages des électrodes denses sont particulièrement évidents. L'électroérosion repose sur une décharge haute fréquence entre l'électrode et la pièce pour l'enlèvement de matière. La densité structurelle de l'électrode influence directement l'uniformité de la distribution de l'énergie de décharge. La présence de pores à l'intérieur de l'électrode peut entraîner une concentration locale d'énergie pendant la décharge, entraînant des marques d'ablation irrégulières à la surface de la pièce, affectant ainsi la précision de l'usinage. La structure uniforme de l'électrode dense assure une libération stable de l'énergie de décharge et maintient la rugosité de surface de la pièce. Elle est particulièrement adaptée aux applications exigeant une précision élevée, comme la fabrication de moules. Par exemple, pour l'usinage de moules d'engrenages de précision, les électrodes denses permettent de reproduire fidèlement le profil des dents de l'engrenage grâce à une décharge stable, de garantir la précision dimensionnelle et la qualité de surface du moule, et de garantir la fiabilité de la production en série des engrenages.

Dans les applications de soudage par résistance, les électrodes denses jouent également un rôle irremplaçable. Lors du soudage, l'électrode doit transmettre le courant par contact étroit avec la pièce tout en résistant à une certaine pression. La faible porosité de l'électrode dense évite l'effet de vide lors de la transmission du courant, c'est-à-dire l'interruption du trajet du courant ou l'augmentation soudaine de la résistance due aux pores. Elle assure une circulation uniforme du courant dans la zone de soudage, assurant ainsi une production de chaleur stable au point de soudure et une formation homogène du noyau de soudure. Pour le soudage des engrenages de transmission automobile, cette stabilité est cruciale : la résistance de la soudure affecte directement les performances globales de la transmission. L'électrode dense assure une résistance uniforme de chaque point de soudure grâce à une transmission du courant stable et une tolérance à la pression optimale, évitant ainsi le risque de défaillance des engrenages due à des défauts de soudure localisés.

Dans le domaine du packaging microélectronique, les électrodes denses sont également largement utilisées. Les dispositifs microélectroniques ont des exigences extrêmement élevées en matière de précision dimensionnelle et de stabilité des performances des électrodes. La surface lisse et la structure uniforme des électrodes denses assurent un bon contact avec la puce ou le substrat, réduisent la résistance de contact et améliorent l'efficacité de la transmission du signal. Parallèlement, leur excellente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conductivité thermique permet de dissiper rapidement la chaleur générée par la puce pendant son fonctionnement, évitant ainsi la dégradation des performances de l'appareil due à une température excessive. Par exemple, dans le packaging des puces de smartphones, les électrodes denses en tungstène-cuivre servent de double support pour la conduction électrique et la dissipation thermique, assurant une transmission stable des signaux électriques tout en contrôlant efficacement la température de la puce, contribuant ainsi à un fonctionnement performant de l'appareil.

4.6.2 Électrodes poreuses

Les électrodes poreuses sont un type d'électrode tungstène-cuivre présentant des caractéristiques structurelles particulières. Elles sont réparties en un grand nombre de pores, réguliers ou irréguliers. Ces pores ne sont pas des défauts du matériau, mais des caractéristiques structurelles formées activement lors de la conception du procédé. Contrairement aux électrodes denses qui recherchent une faible porosité, la distribution et la proportion des pores des électrodes poreuses sont des paramètres de conception essentiels. En régulant des paramètres tels que la pression, la température et le temps de maintien pendant le frittage, la morphologie et la densité des pores peuvent être contrôlées avec précision, formant ainsi un matériau spécial doté de propriétés fonctionnelles et structurelles. Cette conception permet à l'électrode de conserver les propriétés fondamentales des matériaux composites tungstène-cuivre tout en offrant des avantages uniques tels que la légèreté et une surface spécifique élevée, s'adaptant ainsi aux besoins de scénarios spécifiques.

La clé du processus de préparation des électrodes poreuses réside dans la régulation inverse du frittage. Les procédés de densification conventionnels favorisent la fusion des particules grâce à une pression élevée et une conservation thermique longue durée. La formation de structures poreuses nécessite quant à elle une réduction appropriée de la pression de frittage et du temps de conservation thermique. Ainsi, les poudres de tungstène et de cuivre forment une structure squelettique incomplètement densifiée, les espaces entre les particules étant conservés sous forme de pores. De plus, la formation de pores réguliers peut être favorisée par l'ajout d'agents porogènes : des substances volatiles ou solubles sont ajoutées à la poudre mélangée. Lors du frittage, ces substances s'évaporent ou sont ensuite dissoutes et éliminées, laissant des pores de forme prédéfinie. Quelle que soit la méthode, un contrôle précis des paramètres du procédé est nécessaire pour garantir une distribution des pores uniforme et conforme aux attentes de conception, évitant ainsi les baisses de performance dues à une concentration locale de pores.

Le principal avantage de la structure poreuse de l'électrode réside dans l'équilibre entre légèreté et efficacité de dissipation thermique. La présence d'un grand nombre de pores réduit considérablement la densité globale du matériau, et son poids est considérablement réduit par rapport à des électrodes denses de même volume, ce qui est crucial pour les applications où la charge du dispositif doit être contrôlée. Parallèlement, le réseau complexe de canaux formé par les pores augmente considérablement la surface spécifique de l'électrode. Lorsque la chaleur traverse le matériau, cette surface plus importante accélère les échanges thermiques avec le milieu ambiant et, combinée à la circulation d'air qui peut se former dans les pores, améliore l'efficacité de dissipation thermique. Cette combinaison de légèreté et de forte dissipation thermique rend les électrodes poreuses irremplaçables dans des applications telles que les appareils mobiles et les composants aérospatiaux, sensibles au poids et exigeant une dissipation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

thermique élevée.

Dans l'application des électrodes de commutation aux moteurs de drones, les avantages des électrodes poreuses sont pleinement démontrés. L'endurance des drones est directement liée au poids de l'équipement. Une conception légère est essentielle pour améliorer cette endurance. Le moteur étant un composant essentiel, l'optimisation du poids de ses électrodes est particulièrement importante. L'électrode poreuse en cuivre tungstène réduit le poids grâce à sa structure poreuse interne, tout en assurant une transmission stable du courant pendant la commutation grâce à la conductivité élevée de la phase de cuivre. Plus important encore, les moteurs de drones génèrent beaucoup de chaleur lorsqu'ils fonctionnent à grande vitesse. Si cette chaleur n'est pas dissipée à temps, elle peut entraîner une surchauffe et une panne du moteur. La surface spécifique élevée de la structure poreuse permet une dissipation rapide de la chaleur dans l'air. Associée à la conception du carter du moteur, elle forme un système de dissipation thermique efficace garantissant des performances stables du moteur pendant les vols de longue durée. Dans le domaine de l'usinage électrolytique, la structure poreuse des électrodes poreuses joue un rôle unique dans le stockage et la transmission du fluide. L'usinage électrolytique permet la dissolution électrochimique des matériaux grâce à l'électrolyte entre l'électrode et la pièce. Les électrodes traditionnelles nécessitent des canalisations externes pour le transport continu de l'électrolyte, tandis que les pores internes des électrodes poreuses peuvent servir directement de réservoirs et de canaux d'électrolyte, libérant lentement l'électrolyte pendant l'usinage afin de garantir une humidité constante de la zone d'usinage et d'assurer un refroidissement et une lubrification continus. Cette conception simplifie le système de tuyauterie de l'équipement d'usinage et est particulièrement adaptée à l'usinage électrolytique de surfaces complexes ou de cavités profondes. Lorsque l'électrode pénètre dans un espace étroit, l'électrolyte libéré par les pores peut agir avec précision sur la zone d'usinage, évitant ainsi le problème de répartition inégale de l'électrolyte dû au transport externe et améliorant la précision d'usinage et la qualité de surface.

Parmi les composants des électrodes des piles à combustible, les électrodes poreuses en tungstène-cuivre présentent également un intérêt particulier. Les piles à combustible doivent utiliser des électrodes pour réaliser des réactions catalytiques entre le combustible et l'oxydant tout en conduisant le courant généré. Cela nécessite que les électrodes présentent à la fois une bonne conductivité électrique et une surface de contact suffisante pour la réaction. La structure poreuse de l'électrode poreuse offre un espace pour la diffusion et la réaction des gaz, et la conductivité élevée du matériau composite tungstène-cuivre assure une transmission rapide des électrons. L'optimisation de la taille et de la distribution des pores permet d'équilibrer l'efficacité de la réaction et la conductivité, permettant à la pile à combustible de maintenir un fonctionnement stable tout en fournissant une puissance élevée. De plus, la structure poreuse présente une bonne ténacité, ce qui permet d'amortir les variations de volume pendant le fonctionnement de la batterie et de prolonger la durée de vie de l'électrode.

Il est important de noter que la conception d'électrodes poreuses nécessite d'ajuster les paramètres des pores en fonction des applications spécifiques. Des pores trop grands peuvent réduire la résistance structurelle, tandis que des pores trop petits peuvent affecter la dissipation thermique ou l'efficacité de la transmission diélectrique. Par conséquent, la morphologie, l'uniformité de la distribution et la proportion des pores doivent être vérifiées à plusieurs reprises par simulation et expérimentation. Bien que cette

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conception structurelle personnalisée augmente la difficulté de préparation, elle permet également aux électrodes poreuses de répondre à des besoins spécifiques que les électrodes conventionnelles ne peuvent pas satisfaire, ce qui en fait l'une des catégories les plus polyvalentes de la famille des électrodes tungstène-cuivre.

4.6.3 Électrodes à revêtement composite

Les électrodes à revêtement composite constituent une catégorie particulière d'électrodes tungstène-cuivre qui offrent des performances exceptionnelles grâce à la superposition fonctionnelle. Leur concept principal consiste à appliquer un ou plusieurs revêtements fonctionnels à la surface d'un substrat tungstène-cuivre, exploitant ainsi les performances synergétiques du revêtement et du substrat pour compenser les défauts d'un seul matériau. Le choix du matériau de revêtement est extrêmement flexible : différents matériaux, tels que l'argent, le nickel, le diamant et la céramique, peuvent être sélectionnés en fonction des exigences de l'application. Grâce à la galvanoplastie, au dépôt en phase vapeur, à la projection thermique et à d'autres procédés, une liaison étroite avec le substrat est obtenue, formant ainsi une structure composite « substrat tungstène-cuivre assurant le support structurel et revêtement de surface optimisant des fonctions spécifiques ». Cette conception conserve non seulement les principaux avantages des matériaux tungstène-cuivre, tels qu'une résistance élevée et une conductivité électrique et thermique élevée, mais confère également à l'électrode de nouvelles performances grâce au revêtement, élargissant considérablement ses possibilités d'application.

La clé de la préparation d'électrodes à revêtement composite réside dans la qualité de la liaison entre le revêtement et le substrat. Les différents procédés ont des objectifs différents. Le procédé de galvanoplastie est adapté à la préparation de revêtements métalliques. Par électrolyse, des ions métalliques sont déposés uniformément à la surface du substrat tungstène-cuivre pour former un revêtement dense. Ses avantages sont une épaisseur de revêtement contrôlable et une forte liaison au substrat. Il est particulièrement adapté à la préparation de revêtements métalliques conducteurs tels que l'argent et le nickel. Le dépôt en phase vapeur vaporise le matériau de revêtement sous vide et le dépose en film à la surface du substrat. Il permet de préparer des couches minces avec une précision nanométrique. Il convient aux revêtements non métalliques tels que le diamant et la céramique, et permet de contrôler précisément la composition et la structure du revêtement. La projection thermique chauffe le matériau de revêtement jusqu'à l'état fondu ou semi-fondu et le pulvérise sur la surface du substrat grâce à un flux d'air à grande vitesse pour former un revêtement. Il convient à la préparation de revêtements épais ou couvrant de grandes surfaces et est largement utilisé pour les revêtements résistants à l'usure et aux hautes températures. Quel que soit le procédé utilisé, la surface du substrat doit être prétraitée (par exemple, polissage, nettoyage et activation) afin de garantir l'absence d'impuretés ou de couches d'oxyde entre le revêtement et le substrat. Dans le cas contraire, le revêtement risque de se détacher ou de subir une dégradation de ses performances.

L'avantage des électrodes à revêtement composite réside dans leurs améliorations fonctionnelles ciblées. La matrice tungstène-cuivre, support, assure une résistance mécanique stable, une conductivité électrique et thermique ainsi qu'une stabilité structurelle, garantissant ainsi le maintien de la forme et des performances de base de l'électrode pendant son utilisation. Le revêtement de surface optimise les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

performances pour des besoins spécifiques, tels que la réduction de la résistance de contact, l'amélioration de la résistance à l'usure et à l'oxydation, permettant à l'électrode de surpasser les performances des matériaux tungstène-cuivre purs dans des situations spécifiques. Ce modèle « garantie de base + amélioration fonctionnelle » permet à l'électrode de s'adapter aux exigences globales de conditions de travail complexes, tout en atteignant le niveau ultime des indicateurs de performance clés.

Dans les applications de connecteurs pour équipements de communication haute fréquence, les électrodes à revêtement composite plaqué argent offrent d'excellentes performances. La transmission des signaux haute fréquence est extrêmement sensible à la résistance de contact, et même d'infimes fluctuations de résistance peuvent provoquer une atténuation ou une distorsion du signal. Le substrat tungstène-cuivre présente une bonne conductivité, et le revêtement argenté de surface peut réduire encore davantage la résistance de contact. L'argent est l'un des métaux les plus conducteurs, sa surface ne s'oxyde pas facilement et conserve durablement une faible résistance. Lorsque l'électrode est utilisée comme connecteur, la couche d'argent assure une transmission efficace du signal à l'interface de contact, réduit la réflexion et les pertes, et est particulièrement adaptée aux applications exigeant une qualité de signal élevée, comme les communications par satellite et les stations de base 5G. De plus, la haute résistance du substrat tungstène-cuivre garantit que le connecteur ne se déforme pas lors du branchement et du débranchement, évitant ainsi les mauvais contacts dus à une structure lâche.

Les électrodes composites revêtues de diamant en surface présentent un intérêt unique pour l'usinage des matériaux de haute dureté. Dans l'usinage par électroérosion de matériaux tels que l'acier moulé et le carbure cémenté, Les électrodes doivent fréquemment résister aux chocs de décharge à haute température et aux frottements mécaniques. Après une utilisation prolongée, la surface des électrodes en tungstène-cuivre pur est sujette à l'usure ou à l'ablation, ce qui diminue la précision d'usinage. Grâce à sa dureté et sa résistance à l'usure extrêmement élevées, le revêtement diamanté forme une barrière protectrice à la surface de l'électrode pour résister à l'usure mécanique et à l'érosion à haute température pendant l'usinage, prolongeant ainsi considérablement sa durée de vie. Parallèlement, l'excellente conductivité thermique du diamant permet à l'électrode de dissiper rapidement la chaleur et d'éviter les défaillances du revêtement dues à une surchauffe locale. Ce double avantage, « résistance à l'usure et dissipation thermique », rend ce type d'électrode très populaire dans des domaines tels que l'usinage de précision des moules et la fabrication d'aubes de moteurs d'avion.

Dans les scénarios d'antioxydation à haute température, les électrodes composites avec revêtements en nickel ou en céramique jouent un rôle essentiel. Par exemple, les électrodes des fours à arc de l'industrie métallurgique doivent fonctionner en continu dans un environnement oxydant à haute température. Une couche d'oxyde se forme facilement à la surface des matériaux tungstène-cuivre purs, entraînant une diminution de la conductivité électrique. Les revêtements en nickel peuvent former un film d'oxyde dense à haute température, empêchant l'oxygène de corroder davantage le substrat et protégeant le réseau conducteur de l'électrode de la destruction. Les revêtements en céramique (tels que l'alumine et la zircone) offrent une meilleure résistance à haute température et à l'oxydation, et sont adaptés aux conditions de travail à haute température. Ils empêchent le substrat d'entrer en contact avec des milieux corrosifs grâce à une isolation physique. Ce type d'électrode composite maintient non seulement la conductivité électrique et thermique élevée du cuivre tungstène, mais présente également la résistance à haute

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

température et la résistance à l'oxydation du revêtement, élargissant considérablement les limites d'application des matériaux tungstène-cuivre dans les industries à haute température.

De plus, la technologie des revêtements composites permet une intégration multifonctionnelle. Par exemple, dans les électrodes de précision des dispositifs médicaux, des revêtements composites biocompatibles (tels que les revêtements en alliage de titane) peuvent être utilisés pour garantir une excellente conductivité électrique des électrodes en tungstène-cuivre tout en évitant les effets indésirables au contact des tissus humains, répondant ainsi aux exigences spécifiques des instruments chirurgicaux mini-invasifs. Cette personnalisation fonctionnelle, obtenue grâce aux revêtements, permet aux électrodes à revêtement composite de répondre à divers besoins non conventionnels, ce qui en fait la catégorie présentant le plus grand potentiel d'innovation dans la famille des électrodes en tungstène-cuivre.

Il est important de noter que l'épaisseur et l'uniformité du revêtement ont un impact significatif sur les performances des électrodes. Un revêtement trop épais peut engendrer des contraintes internes excessives, entraînant des fissures ou des décollements ; un revêtement trop fin n'offrira ni protection efficace ni amélioration fonctionnelle. Par conséquent, les paramètres du procédé de revêtement doivent être contrôlés avec précision en fonction des caractéristiques du matériau et du substrat. Une simulation précoce et des tests ultérieurs sont nécessaires pour garantir que les performances du revêtement sont conformes aux normes. Bien que cette exigence de fabrication sophistiquée augmente les coûts de production, elle permet également aux électrodes à revêtement composite de créer une valeur irremplaçable dans le secteur de la fabrication haut de gamme.



Électrode en cuivre et tungstène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 5 : Technologie de préparation de l'électrode tungstène-cuivre

5.1 Processus d'infiltration

Le procédé d'infiltration est la technologie clé de la préparation des électrodes tungstène-cuivre. L'infiltration de cuivre liquide dans un squelette poreux en tungstène permet d'obtenir un matériau composite aux excellentes performances. Ce procédé comprend deux étapes principales : la préfabrication du squelette en tungstène et l'infiltration du cuivre, visant à obtenir une faible porosité et une distribution de phase uniforme. Ce procédé d'infiltration repose sur la métallurgie des poudres, combinée à un environnement sous vide ou sous atmosphère inerte pour garantir une densité et une stabilité élevées du matériau. Lors de la préparation, le formage, le frittage et le contrôle des pores de la poudre de tungstène sont des étapes clés qui influencent directement la résistance mécanique, la conductivité et la durabilité de l'électrode finale. L'optimisation des paramètres du procédé, tels que la température, la pression et le temps, détermine considérablement la microstructure et les performances de l'électrode.

5.1.1 Préfabrication du squelette en tungstène

La préfabrication du squelette en tungstène est la première étape du processus d'infiltration. Elle vise à créer une structure poreuse en tungstène servant de base à l'infiltration ultérieure de cuivre. Au cours de cette étape, une structure squelette d'une certaine résistance est construite grâce au moulage, au frittage et au contrôle de la porosité de la poudre de tungstène. La qualité du squelette en tungstène influence directement l'effet de remplissage en cuivre et les performances de l'électrode finale. Le processus de préparation exige un contrôle précis de la pureté de la matière première, de la granulométrie et des paramètres du procédé. La porosité et l'uniformité de la microstructure sont essentielles à la réussite de la préfabrication. Le pressage isostatique à chaud est souvent utilisé pour optimiser la densité et la stabilité du squelette. La préfabrication du squelette en tungstène pose les bases du processus d'infiltration, garantissant à l'électrode de bonnes propriétés mécaniques lors du traitement ultérieur.

5.1.1.1 Moulage de poudre de tungstène

Le moulage de poudre de tungstène est une étape fondamentale de la préfabrication des squelettes en tungstène. En pressant la poudre de tungstène selon une forme spécifique, le corps est préparé pour le frittage et l'infiltration ultérieurs. Ce procédé utilise généralement des techniques de pressage à froid ou de pressage isostatique, plaçant de la poudre de tungstène de haute pureté dans un moule et formant mécaniquement un corps cru préliminaire. Pendant le moulage, la granulométrie et la morphologie de la poudre de tungstène doivent être constantes. Les poudres sphériques ou quasi sphériques améliorent l'efficacité du remplissage et l'uniformité du corps cru. L'uniformité du mélange est obtenue grâce à un broyeur à boulets ou à des mélangeurs en V, garantissant une répartition de la poudre sans stratification significative. La pression de moulage et la conception du moule influencent directement la densité et la distribution de la porosité du corps cru. Une pression appropriée peut réduire les défauts internes.

Le corps vert formé doit posséder une certaine résistance mécanique pour supporter le frittage ultérieur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

à haute température. Des traitements de surface, tels que le prépressage, peuvent améliorer encore la stabilité du corps vert. L'humidité doit être contrôlée pendant le processus afin d'éviter toute absorption d'humidité par la poudre, susceptible d'entraîner une baisse de la qualité du formage. Le formage de la poudre de tungstène constitue le point de départ de tout le processus de préparation, et sa qualité détermine le bon déroulement des étapes suivantes.

5.1.1.2 Frittage du squelette de tungstène

Le frittage du squelette de tungstène est une étape clé pour transformer un corps cru en poudre de tungstène en un squelette poreux. Le traitement à haute température améliore la résistance et la stabilité du corps cru. Ce procédé est généralement réalisé sous vide ou sous atmosphère d'hydrogène. La température de frittage est adaptée aux caractéristiques de la poudre de tungstène, favorisant la croissance du col et la liaison entre les particules. Initialement, les particules de poudre de tungstène forment des connexions initiales par diffusion et recristallisation. À mesure que la température augmente, la microstructure se densifie progressivement et une structure poreuse commence à se former. Le temps de frittage et la vitesse de chauffe doivent être contrôlés avec précision afin d'éviter un échauffement excessif susceptible de provoquer des fissures ou une surchauffe. Le frittage implique également un contrôle de l'atmosphère. Un environnement d'hydrogène réducteur élimine la couche d'oxyde superficielle et améliore la liaison interparticulaire. Le pressage isostatique à chaud (CIC) permet d'optimiser davantage le frittage, améliorant l'uniformité et la résistance du squelette grâce à une pression omnidirectionnelle. Le squelette en tungstène fritté doit posséder une résistance mécanique suffisante et une porosité appropriée pour permettre l'infiltration du cuivre. L'ajustement des paramètres du procédé influence la microstructure du squelette. Les travaux futurs, notamment la simulation dynamique et les techniques de frittage multi-étapes, amélioreront l'efficacité du frittage et la qualité du squelette afin de répondre aux exigences des électrodes de haute précision.

5.1.1.3 Contrôle des pores du squelette en tungstène

La porosité du squelette en tungstène est une étape cruciale pour une infiltration réussie. L'objectif est d'ajuster la porosité et la distribution de la taille des pores du squelette afin de créer des conditions optimales pour l'infiltration du cuivre. Ce processus est réalisé grâce à la pression de moulage, aux conditions de frittage et à l'utilisation d'additifs. La porosité a un impact direct sur l'efficacité du remplissage en cuivre et sur les performances de l'électrode finale. Lors du moulage, l'ajustement de la pression peut modifier la densité initiale du corps vert. Des pressions plus faibles conservent davantage de pores, tandis que des pressions plus élevées en réduisent le nombre. Pendant le frittage, le contrôle de la température et du temps influence la fermeture et la connexion des pores. Des paramètres de frittage appropriés maintiennent une structure à pores ouverts. Des additifs tels que des liants organiques ou des agents porogènes peuvent contribuer au contrôle des pores. Après frittage, les additifs sont éliminés par pyrolyse pour former un réseau poreux uniforme. L'analyse microstructurale montre qu'une distribution uniforme de la taille des pores est essentielle au contrôle des pores. Des pores trop grands ou irréguliers peuvent entraîner une pénétration insuffisante du cuivre. Le procédé de pressage isostatique à chaud optimise la structure des pores grâce à une pression omnidirectionnelle, réduisant ainsi la proportion de pores fermés et améliorant l'efficacité de la pénétration. Le contrôle des pores doit également tenir

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

compte de la mouillabilité ultérieure du cuivre. Le traitement de surface peut améliorer la liaison interfaciale entre le squelette de tungstène et le cuivre liquide.

5.1.2 Contrôle des infiltrations

Le contrôle de l'infiltration est l'étape décisive du processus d'infiltration. Il vise à produire des électrodes tungstène-cuivre hautes performances grâce à une gestion précise du processus d'infiltration du cuivre. Cette étape comprend trois étapes clés : la préparation du cuivre, le contrôle de la température et du temps d'infiltration, garantissant que le cuivre liquide remplit entièrement les pores du squelette de tungstène pour former une structure composite uniforme. Le contrôle de l'infiltration influence directement le taux de remplissage des pores, la résistance de la liaison interfaciale et la densité de l'électrode finale. Une faible porosité et une distribution de phase uniforme dans la microstructure sont essentielles à l'assurance qualité. Un environnement sous vide ou sous atmosphère inerte optimise encore l'effet d'infiltration, et la compression isostatique à chaud peut contribuer à améliorer la stabilité du matériau. L'optimisation du contrôle de l'infiltration assure des performances fiables pour les applications d'électrodes en usinage par électro-étincelage, soudage et encapsulation microélectronique.

5.1.2.1 Préparation du matériau en cuivre

La préparation du cuivre est une étape fondamentale du contrôle de l'infiltration. Elle vise à fournir des matières premières de haute qualité et à créer les conditions propices à l'infiltration du cuivre liquide. Ce processus implique généralement la sélection, la purification et le prétraitement de poudre ou de blocs de cuivre afin de garantir une bonne fluidité et une bonne mouillabilité à haute température. La pureté du cuivre est un facteur clé. Le cuivre électrolytique de haute pureté ou le cuivre atomisé sont sélectionnés pour réduire la teneur en impuretés telles que l'oxygène et le soufre et éviter ainsi la formation de pores ou de défauts lors de l'infiltration. Le cuivre peut se présenter sous forme de poudre ou de morceaux, selon les exigences du procédé. La poudre facilite une distribution uniforme, tandis que la forme de morceaux est adaptée à une infiltration à grande échelle. La granulométrie ou la taille des blocs doit correspondre à la porosité du squelette du tungstène.

Le prétraitement comprend le séchage et le nettoyage de surface. Le cuivre est séché sous vide ou sous gaz inerte afin d'éliminer l'humidité et les couches d'oxyde en surface, améliorant ainsi la liaison interfaciale avec la structure en tungstène. Un mélange mécanique ou un broyeur à boulets est utilisé pour obtenir un mélange uniforme et assurer une répartition homogène du cuivre lors de l'infiltration. La préparation du cuivre nécessite également de tenir compte de son point de fusion. Un préchauffage approprié peut améliorer l'efficacité de l'infiltration. Pendant le processus de préparation, un contrôle environnemental est mis en œuvre pour prévenir l'oxydation et garantir la qualité du cuivre.

5.1.2.2 Contrôle de la température d'infiltration

Le contrôle de la température d'infiltration est une étape clé du contrôle de l'infiltration. Il garantit une pénétration efficace du cuivre dans le squelette du tungstène à l'état liquide, tout en évitant les dommages matériels causés par une chaleur excessive. Ce processus est généralement réalisé dans un four sous vide

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ou en atmosphère inerte. La température est réglée au-dessus du point de fusion du cuivre pour obtenir une phase liquide, permettant au cuivre de mouiller complètement et de remplir les pores. Un contrôle précis de la température est crucial. Une température trop basse peut empêcher le cuivre de fondre complètement, tandis qu'une température trop élevée peut provoquer une fusion localisée du squelette du tungstène ou une croissance des grains, affectant ainsi la microstructure. La vitesse de chauffe doit être ajustée progressivement pour éviter les fissures causées par une contrainte thermique concentrée.

Le contrôle de la température implique également la gestion de l'atmosphère. Un environnement sous vide réduit les réactions d'oxydation et des gaz inertes comme l'argon protègent davantage le matériau. Le pressage isostatique à chaud peut contribuer au contrôle de la température, améliorant la pénétration du cuivre et l'efficacité du remplissage grâce à une pression omnidirectionnelle. La stabilité de la température d'infiltration affecte directement la qualité du collage interfacial. Des fluctuations de température excessives peuvent provoquer un débordement du cuivre ou une répartition inégale. La répartition de la température dans le four doit être surveillée pendant le processus afin de garantir une homogénéité sur toutes les pièces. À l'avenir, l'introduction de systèmes intelligents de contrôle de la température ou de technologies de chauffage multi-étages optimisera encore davantage le contrôle de la température d'infiltration, améliorant ainsi la densité des électrodes et la constance des performances.

5.1.2.3 Contrôle du temps d'infiltration

Le temps d'infiltration est un paramètre clé du contrôle de l'infiltration. Il garantit que le cuivre liquide pénètre complètement le squelette de tungstène et forme une structure composite stable. Ce processus est déterminé par la porosité du squelette de tungstène, la quantité de cuivre et la température. Un temps trop court peut entraîner un remplissage incomplet, tandis qu'un temps trop long peut provoquer un écoulement excessif du cuivre ou une déformation du squelette. Durant la phase initiale d'infiltration, le cuivre a besoin de suffisamment de temps pour mouiller la surface du tungstène et pénétrer les pores profonds. Ensuite, le contrôle du temps se concentre sur le processus de solidification afin d'éviter le débordement du cuivre et la formation de pores.

Le contrôle du temps doit également être coordonné avec la température et la pression. Le pressage isostatique à chaud (CIC) peut raccourcir le temps d'infiltration et accélérer l'écoulement du cuivre grâce à une pression omnidirectionnelle. Au cours du processus, le temps d'infiltration est généralement défini par étapes : une phase initiale pour assurer l'infiltration, une phase de stabilisation pour favoriser l'adhésion et une phase de refroidissement pour solidifier la structure. L'analyse microstructurale montre qu'un temps d'infiltration approprié peut réduire les pores non remplis et améliorer l'adhésion interfaciale. La stabilité environnementale et les performances de l'équipement ont un impact direct sur l'efficacité du contrôle du temps. À l'avenir, des technologies de surveillance en temps réel ou d'ajustement dynamique seront utilisées pour optimiser le temps d'infiltration et améliorer l'uniformité et la durabilité des électrodes.

5.2 Technologie de post-traitement

Le post-traitement est l'étape finale de la préparation des électrodes tungstène-cuivre. Il vise à optimiser

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la géométrie, la qualité de surface et les performances fonctionnelles de l'électrode par la découpe, le meulage, le traitement de surface et le contrôle de la précision dimensionnelle. Cette étape est réalisée après l'infiltration afin de garantir que l'électrode répond aux exigences de l'application spécifique. Le post-traitement des électrodes tungstène-cuivre exploite la dureté élevée du tungstène et la ductilité du cuivre pour ajuster la microstructure et améliorer la durabilité grâce à des techniques d'usinage et de modification de surface. Un contrôle précis des paramètres du procédé est essentiel, impliquant le choix de l'outil, l'environnement de traitement et le contrôle qualité, ce qui affecte directement les performances de l'électrode en électroérosion, soudage ou encapsulation microélectronique.

5.2.1 Découpe

La découpe est la première étape du post-usinage. Elle consiste à éliminer l'excédent de matière pour façonner l'électrode tungstène-cuivre. Ce procédé implique généralement un tournage ou un fraisage, utilisant des outils en carbure ou en diamant pour éliminer l'ébauche infiltrée. La dureté élevée du tungstène exige des outils très résistants à l'usure, tandis que la ductilité du cuivre exige des vitesses et des avances de coupe contrôlées pour éviter le collage ou la déchirure. La découpe est adaptée aux électrodes de formes complexes, telles que les tiges ou les blocs. L'utilisation d'un liquide de refroidissement est essentielle pendant le procédé afin de minimiser l'accumulation de chaleur et les dommages de surface. Le procédé de découpe comporte plusieurs étapes : l'ébauche pour éliminer l'excédent de matière et la finition pour obtenir la précision du contour, en se rapprochant progressivement des dimensions de conception. La faible porosité de la microstructure permet une découpe uniforme du matériau, et les électrodes optimisées par le procédé de pressage isostatique à chaud présentent une bonne stabilité mécanique. La rugosité de surface doit être inspectée après la découpe pour garantir un traitement fluide lors des étapes suivantes. Un contrôle environnemental, comme le contrôle des poussières, peut prévenir la contamination par ces dernières. Les progrès futurs des machines-outils CNC ou de la découpe assistée par laser pourraient améliorer l'efficacité du traitement et la précision des formes complexes, répondant ainsi aux exigences des électrodes de haute précision.

5.2.2 Broyage

La rectification est une étape de post-traitement délicate qui utilise des outils abrasifs pour éliminer les résidus de copeaux et améliorer l'état de surface et la précision géométrique des électrodes tungstène-cuivre. Ce procédé utilise généralement des meules diamantées ou des outils en carbure de silicium pour rectifier avec précision la dureté élevée du tungstène. La ductilité du cuivre nécessite une lubrification pour éviter une usure excessive. La rectification est adaptée à l'amélioration de la qualité de la surface de contact de l'électrode, notamment dans des applications telles que l'usinage par électro-étincelage (EDM) ou le conditionnement de composants microélectroniques, où une planéité élevée est requise. La distribution uniforme des phases dans la microstructure assure des résultats de rectification stables. Le procédé de rectification se compose de deux étapes : une rectification grossière pour éliminer les traces de copeaux et une rectification fine pour obtenir un fini miroir. La pression et la vitesse de rectification doivent être ajustées pendant le processus afin d'éviter les fissures thermiques ou les brûlures de surface. Un liquide de refroidissement est utilisé pour réduire les températures et protéger les propriétés du matériau. Les électrodes optimisées pour la compression isostatique à chaud présentent une excellente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

résistance à l'usure. Les défauts de surface, tels que les microfissures ou les piqûres, sont inspectés après la rectification afin de garantir la conformité de la qualité.

5.2.3 Traitement de surface

Le traitement de surface est une étape d'optimisation post-traitement qui améliore les propriétés de surface des électrodes tungstène-cuivre, telles que la résistance à la corrosion, à l'oxydation et à l'adhérence, par des méthodes chimiques ou physiques. Ce procédé comprend des techniques de polissage, de placage ou de revêtement pour modifier la dureté élevée du tungstène et l'activité chimique du cuivre. Le polissage élimine les défauts microscopiques de surface, le nickelage ou le placage à l'or améliore la résistance aux intempéries, et les revêtements tels que le nitrure de titane améliorent la résistance à l'usure. La faible porosité de la microstructure assure un traitement de surface uniforme.

Le procédé de traitement de surface doit être adapté au scénario d'application. Pour les électrodes d'électroérosion, le polissage peut être privilégié afin d'améliorer la stabilité de la décharge, tandis que pour les électrodes de soudage, un revêtement peut être nécessaire pour réduire l'adhérence du laitier. La température et la durée doivent être contrôlées afin de ne pas altérer la structure interne. Les procédés optimisés de compression isostatique à chaud (CIC) améliorent l'adhérence de la surface de l'électrode. Des contrôles environnementaux, comme une atmosphère inerte, peuvent réduire l'oxydation. L'adhérence et la durabilité de la surface doivent être testées après traitement.

5.2.4 Contrôle de la précision dimensionnelle

Le contrôle de la précision dimensionnelle est l'étape finale du post-traitement. Il garantit, par des mesures et des ajustements, que l'électrode tungstène-cuivre répond aux spécifications de conception. Ce processus utilise des machines à mesurer tridimensionnelles ou des équipements d'inspection optique pour vérifier la longueur, la largeur et les tolérances géométriques de l'électrode, et l'ajuster précisément pour tenir compte de la dureté élevée du tungstène et de la ductilité du cuivre. Après la découpe et le meulage, l'électrode subit une finition qui contrôle les écarts dimensionnels au micron près et assure l'uniformité de la microstructure pour un usinage de haute précision.

Le contrôle de la précision dimensionnelle implique de multiples inspections et corrections. Une fois les essais initiaux détectés, les écarts sont corrigés par meulage fin ou découpe locale. Les électrodes optimisées pour le pressage isostatique à chaud présentent une excellente stabilité dimensionnelle. Les facteurs environnementaux, tels que les fluctuations de température, doivent être pris en compte, car ils affectent la dilatation thermique du matériau et nécessitent un fonctionnement à température constante. Les données d'inspection sont enregistrées pour garantir la cohérence des lots. À l'avenir, les systèmes d'inspection intelligents ou la technologie de numérisation 3D permettront un contrôle de précision en temps réel pour répondre aux exigences des électrodes de haute précision ou des composants structurels complexes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 6 : Scénarios d'application des électrodes tungstène-cuivre

Les électrodes tungstène-cuivre sont largement utilisées en usinage par électroérosion (EDM) en raison de leur excellente conductivité électrique, de leur résistance aux hautes températures, de leur résistance à l'érosion par arc et de leur bonne usinabilité. Dans la fabrication de moules de précision, elles sont utilisées pour former des cavités complexes et des structures fines grâce à leurs faibles pertes et à leur grande précision d'usinage, ce qui les rend particulièrement adaptées à l'usinage de moules en carbure. Pour les matériaux difficiles à usiner, tels que les alliages de titane et les alliages haute température dans l'industrie aéronautique, elles résistent aux températures élevées générées par les décharges haute fréquence, garantissant ainsi la qualité de surface et la précision dimensionnelle des pièces de précision.

Les électrodes tungstène-cuivre jouent également un rôle essentiel dans le soudage, le coupage et la commutation électrique. En soudage par résistance, elles réduisent l'usure des électrodes et assurent une résistance stable de la soudure, ce qui les rend idéales pour des secteurs tels que l'automobile et l'électroménager. En coupage plasma, elles résistent à l'érosion à haute température, améliorant ainsi l'efficacité et la qualité de la coupe. De plus, en tant que composants de contact dans les disjoncteurs haute tension, les relais et autres équipements, leur résistance à l'érosion à l'arc et au soudage par fusion garantit le fonctionnement sûr et stable des systèmes d'alimentation et des équipements de contrôle électrique. Les électrodes tungstène-cuivre ont également d'importantes applications dans la défense, l'aérospatiale et les domaines spécialisés. Dans les systèmes de guidage de missiles, leur stabilité assure un bon fonctionnement dans des environnements extrêmes. Dans les systèmes d'alimentation des engins spatiaux, elles résistent aux conditions difficiles de l'espace, garantissant une transmission d'énergie efficace et sûre. Dans les équipements d'essais nucléaires et les dispositifs médicaux, leur résistance aux radiations, leur conductivité électrique et leur biocompatibilité contribuent respectivement à améliorer la précision des données d'essai et la sécurité des procédés de traitement. Grâce aux progrès technologiques, leurs applications potentielles continueront de s'élargir.

6.1 Application des électrodes en cuivre tungstène en EDM

Les électrodes tungstène-cuivre utilisées dans l'usinage par électroérosion (EDM) constituent l'une de ses principales applications. Grâce à ses propriétés matérielles uniques, cette technologie est largement utilisée dans la fabrication de précision. L'usinage par électroérosion (EDM) consiste à retirer de la matière par décharge d'arc. Les électrodes tungstène-cuivre sont des outils idéaux grâce à leur point de fusion et leur dureté élevés, associés à la conductivité élevée du cuivre. Des procédés de fabrication tels que la métallurgie des poudres ou l'infiltration sous vide garantissent une faible porosité et une distribution de phase uniforme dans les électrodes, tandis que le pressage isostatique à chaud optimise leur microstructure, améliorant ainsi leur durabilité et leur stabilité. Les avantages des électrodes tungstène-cuivre pour l'usinage de moules et de matrices, l'usinage de matériaux difficiles à usiner et l'EDM démontrent leur rôle essentiel dans la fabrication de pièces complexes et de haute précision.

6.1.1 Application au traitement des moules

L'utilisation d'électrodes tungstène-cuivre dans le traitement des moules démontre leur importance pour

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la fabrication de haute précision, notamment pour l'usinage par électroérosion de moules complexes. La fabrication de moules exige une géométrie précise et des surfaces lisses, et les électrodes tungstène-cuivre répondent à ces exigences grâce à leur dureté élevée et à leur résistance à l'érosion par arc. Lors de la fabrication, les électrodes utilisent généralement une teneur en tungstène moyenne à élevée (par exemple, WCu 70/30 ou WCu 80/20). La métallurgie des poudres crée une microstructure dense, et le pressage isostatique à chaud optimise leur résistance à la compression et leur stabilité de surface. La faible porosité de l'électrode assure une décharge stable, tandis que la conductivité élevée du cuivre assure un transfert de courant efficace, réduisant ainsi le temps de traitement.

Dans le traitement des moules, les électrodes en tungstène-cuivre sont particulièrement adaptées à l'usinage de précision des moules d'emboutissage, des moules plastiques et des moules de forge. Leur résistance à l'usure leur permet de conserver leur forme intacte lors de décharges répétées et de réduire les pertes. La répartition uniforme des phases dans la microstructure permet la formation de contours complexes, tels que des nervures profondes ou de petits trous, et la précision d'usinage peut atteindre le micron. Un traitement de surface, tel que le polissage, améliore encore la qualité du contact de l'électrode et la finition du moule. En production, l'électrode peut traiter des aciers haute dureté ou des aciers alliés pour répondre aux besoins de fabrication de pièces automobiles et de moules pour composants électroniques. Les scénarios d'utilisation incluent également le traitement collaboratif multi-électrodes, et la robustesse de l'électrode en tungstène-cuivre permet de multiples réglages et installations.

Le contrôle environnemental, comme l'utilisation de liquide de refroidissement, réduit les effets thermiques et prolonge la durée de vie des électrodes, tandis que les procédés de post-traitement comme le meulage garantissent la précision dimensionnelle. À l'avenir, l'introduction de la conception à gradient fonctionnel ou des nanotechnologies permettra d'améliorer encore la durabilité et l'efficacité de traitement des électrodes en cuivre-tungstène dans le traitement des moules, répondant ainsi aux besoins de fabrication de moules plus complexes ou exigeants, comme ceux des composants aérospatiaux.

6.1.2 Application au traitement de matériaux difficiles à traiter

Les électrodes tungstène-cuivre utilisées pour l'usinage de matériaux difficiles à usiner ont démontré leur supériorité dans des conditions extrêmes, ce qui les rend particulièrement adaptées au traitement de matériaux à dureté élevée ou à point de fusion élevé. L'usinage par électro-étincelage (EDM) est particulièrement difficile avec les méthodes traditionnelles en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques. Les électrodes tungstène-cuivre, grâce à leur résistance aux hautes températures et à l'érosion par arc, sont devenues un outil essentiel. Lors de leur fabrication, les électrodes sont constituées d'une forte teneur en tungstène (par exemple, WCu 90/10), avec un procédé d'infiltration sous vide formant un squelette de tungstène robuste. Le pressage isostatique à chaud (HIP) optimise la microstructure, ce qui se traduit par une faible porosité et une distribution de phase uniforme. La conductivité électrique élevée du cuivre permet une décharge efficace.

Lors de l'usinage de matériaux difficiles à usiner, les électrodes tungstène-cuivre résistent aux décharges à haute énergie. Le point de fusion élevé du tungstène (supérieur à 3 000 °C) le protège des températures d'arc et réduit l'usure de surface, ce qui le rend idéal pour l'usinage de matériaux tels que le carbure de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungstène et les alliages de titane. La finesse des grains de sa microstructure permet un usinage de haute précision, tandis que la résistance à l'usure des électrodes assure une stabilité de forme à long terme, ce qui les rend idéales pour la formation de géométries complexes telles que les aubes de turbine ou les implants médicaux. Les traitements de surface, tels que les revêtements, améliorent la résistance à l'oxydation et les performances en environnements humides, tandis que les procédés post-usinage, tels que la découpe et la rectification, optimisent la précision géométrique.

Les scénarios d'utilisation incluent également les secteurs de l'aérospatiale et de la défense. La résistance mécanique des électrodes tungstène-cuivre permet un traitement sous forte charge, et l'utilisation d'un liquide de refroidissement réduit le risque de fissuration thermique et prolonge la durée de vie de l'électrode.

6.1.3 Avantages de l'application en EDM

Les électrodes tungstène-cuivre utilisées en électroérosion (EDM) bénéficient des propriétés composites de leur matériau et d'un procédé de fabrication optimisé, ce qui leur permet d'exceller dans une production de haute précision et efficace. L'EDM s'appuie sur la résistance à l'érosion par arc, la conductivité électrique et les capacités de gestion thermique de l'électrode. Grâce à leur forte teneur en tungstène (comme le WCu 80/20), les électrodes tungstène-cuivre offrent une résistance aux températures élevées. La dureté du tungstène protège des chocs de décharge, tandis que la conductivité électrique élevée du cuivre (proche de celle du cuivre pur) assure une transmission de courant stable. La métallurgie des poudres crée une microstructure à faible porosité, tandis que le pressage isostatique à chaud améliore la liaison interfaciale. Les traitements de surface, comme le polissage, améliorent la régularité de la décharge.

Les avantages applicatifs se reflètent principalement dans la durabilité. La résistance à l'érosion par arc des électrodes tungstène-cuivre réduit les pertes de surface, prolonge la durée de vie et diminue les coûts de production, notamment en cas de décharge à haute énergie. Deuxièmement, la combinaison de conductivité électrique et thermique optimise l'efficacité de l'usinage. La dispersion de chaleur dans la phase cuivre réduit la surchauffe locale, améliorant ainsi la qualité de surface des pièces et les rendant adaptées à la fabrication de moules de précision et de microcomposants. Troisièmement, la résistance mécanique et la ténacité permettent l'usinage de formes complexes, tandis que la faible porosité des électrodes réduit le risque de fissures, les rendant ainsi adaptées à la formation de trous profonds ou de structures fines.

Les applications incluent l'industrie automobile et la fabrication électronique. La dilatation thermique des électrodes en cuivre tungstène réduit les contraintes entre les pièces, tandis que le contrôle du liquide de refroidissement et de l'environnement améliore encore la stabilité.

6.2 Application des électrodes en cuivre tungstène dans les appareils électriques à haute tension

Les électrodes tungstène-cuivre utilisées dans les équipements électriques haute tension démontrent leurs performances supérieures dans des conditions électriques extrêmes et sont utilisées dans des scénarios

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

exigeant une durabilité et une stabilité élevées. Le point de fusion et la dureté élevés du tungstène, associés à la conductivité électrique et thermique élevée du cuivre, en font un matériau idéal pour des équipements tels que les interrupteurs haute tension et les parafoudres. Des procédés de préparation tels que la métallurgie des poudres ou l'infiltration sous vide garantissent la faible porosité et l'uniformité de la microstructure de l'électrode, tandis que le pressage isostatique à chaud optimise sa résistance à l'arc et sa résistance mécanique. L'utilisation d'électrodes tungstène-cuivre dans les équipements électriques haute tension répond aux besoins des équipements de transport d'énergie, de contrôle industriel et de défense, et leurs performances sont particulièrement remarquables dans les environnements à haute tension et à fort courant.

6.2.1 Application aux interrupteurs haute tension

Les électrodes tungstène-cuivre utilisées dans les appareillages de commutation haute tension sont un élément clé de leur application dans les équipements électriques haute tension, particulièrement adaptées aux applications nécessitant des déconnexions fréquentes de courants élevés. Les appareillages de commutation haute tension sont utilisés pour le contrôle et la protection des circuits dans les réseaux électriques. Les électrodes tungstène-cuivre utilisent une teneur en tungstène moyenne à élevée (par exemple, WCu 70/30 ou WCu 85/15). La poudre de tungstène est mélangée à la poudre de cuivre par un procédé de métallurgie des poudres. Après frittage, le cuivre remplit les pores de la phase liquide, formant une microstructure dense. Le pressage isostatique à chaud optimise la liaison interfaciale, tandis que la faible porosité de la microstructure améliore la résistance à l'érosion par arc électrique. La conductivité électrique élevée du cuivre assure une transmission efficace du courant.

Dans les appareillages de commutation haute tension, la résistance à haute température des électrodes tungstène-cuivre constitue un avantage clé. Le point de fusion élevé du tungstène permet de supporter des températures de décharge d'arc atteignant des milliers de degrés Celsius, réduisant ainsi la fusion ou l'usure de la surface et prolongeant la durée de vie. La résistance à l'arc des électrodes permet des commutations fréquentes, tandis que la conductivité thermique du cuivre favorise la dissipation thermique, réduisant ainsi le risque de surchauffe localisée et améliorant la stabilité électrique. La répartition uniforme des phases dans la microstructure réduit la concentration des contraintes, et les traitements de surface, comme le nickelage, améliorent la résistance à l'oxydation, ce qui les rend adaptés aux environnements humides ou industriels. Lors de la fabrication, la poudre de tungstène doit être d'une grande pureté et sa granulométrie doit être contrôlée pour garantir des performances constantes.

Les applications incluent les sous-stations électriques et les réseaux de distribution d'énergie industriels. Les électrodes en cuivre tungstène résistent aux déconnexions haute tension, réduisant ainsi les taux de défaillance. Des procédés de post-traitement tels que le meulage peuvent optimiser la qualité de la surface de contact.

6.2.2 Application dans les parafoudres

Les électrodes tungstène-cuivre des parafoudres démontrent leur valeur unique en matière de protection contre la foudre, particulièrement adaptées à l'absorption et à la dispersion des éclairs à haute énergie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Utilisées pour protéger les équipements électriques contre les dommages causés par les surtensions, les électrodes de parafoudre utilisent une forte teneur en tungstène (par exemple, WCu 80/20) et sont produites par infiltration sous vide. La poudre de tungstène forme un squelette solide, tandis que le cuivre s'infiltré dans le matériau par infiltration liquide, ce qui crée une microstructure uniforme et à faible porosité. Le pressage isostatique à chaud améliore la résistance aux chocs et la stabilité du matériau, tandis que la haute conductivité du cuivre permet une décharge rapide du courant.

Dans les parafoudres, la résistance aux hautes températures des électrodes tungstène-cuivre constitue un atout majeur. Le point de fusion élevé du tungstène protège contre l'arc électrique à haute température lors d'un coup de foudre, réduisant ainsi les pertes de matière et prolongeant la durée de vie. La résistance des électrodes à l'érosion par arc électrique garantit leur performance même après plusieurs coups de foudre, tandis que la conductivité thermique du cuivre dissipe rapidement la chaleur, prévenant ainsi les dommages matériels dus à la surchauffe. La finesse des grains de leur microstructure assure une résistance mécanique élevée, tandis que les traitements de surface, comme le placage, améliorent la résistance à la corrosion et l'adaptabilité aux environnements extérieurs. Lors de la fabrication, le mélange uniforme des matières premières et le contrôle de la taille des pores ont un impact direct sur l'efficacité de pénétration. Les scénarios d'application incluent les lignes de transmission haute tension et les stations de base de communication. Les électrodes tungstène-cuivre absorbent efficacement les courants de foudre, et les procédés de post-traitement tels que la découpe et le polissage optimisent la précision géométrique.

6.2.3 Avantages de l'application dans les appareils électriques à haute tension

Les électrodes tungstène-cuivre utilisées dans les équipements électriques haute tension sont le fruit des propriétés composites de leur matériau et de leur procédé de fabrication optimisé, ce qui leur confère des performances exceptionnelles dans les environnements à haute tension et à fort courant. Les équipements électriques haute tension nécessitent des électrodes résistantes à l'érosion par arc électrique, à la conductivité électrique et à la stabilité thermique. Grâce à leur forte teneur en tungstène, les électrodes tungstène-cuivre offrent une résistance aux températures élevées, tandis que la dureté du tungstène assure une résistance aux arcs électriques, et la conductivité électrique élevée du cuivre (proche de celle du cuivre pur) assure une transmission efficace du courant. La métallurgie des poudres crée une microstructure à faible porosité, tandis que la compression isostatique à chaud renforce la liaison interfaciale. Les traitements de surface, tels que le placage, améliorent la résistance aux intempéries. Les avantages des électrodes tungstène-cuivre résident principalement dans leur résistance à l'érosion par arc électrique. Cette résistance à l'arc électrique réduit l'usure superficielle et prolonge la durée de vie, notamment lors du fonctionnement fréquent des interrupteurs haute tension et des parafoudres. Deuxièmement, leur conductivité électrique et thermique combinée optimise les performances électriques. La dissipation thermique au sein de la phase cuivre réduit la surchauffe locale, améliorant la stabilité des équipements et les rendant adaptés aux déconnexions à courant élevé ou à la protection contre la foudre. Troisièmement, leur résistance mécanique et à la corrosion facilite leur fonctionnement dans des environnements difficiles. L'uniformité de la microstructure réduit le risque de fissuration et le traitement de surface améliore la durabilité. Les applications incluent les systèmes électriques et les équipements industriels. L'adaptation de la dilatation thermique des électrodes en cuivre tungstène réduit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

les contraintes sur le substrat, tandis que les systèmes de refroidissement et le contrôle environnemental améliorent encore les performances.

6.3 Application des électrodes en cuivre tungstène au soudage et au brasage

Les électrodes en tungstène-cuivre utilisées en soudage et brasage démontrent des performances uniques dans les environnements à haute température et à fort courant. Elles sont largement utilisées dans les applications industrielles exigeant des connexions efficaces et des assemblages fiables. Le point de fusion et la dureté élevés du tungstène, associés à la conductivité électrique et thermique élevée du cuivre, en font un outil idéal pour le soudage par résistance et le brasage. Des procédés de préparation tels que la métallurgie des poudres ou l'infiltration sous vide garantissent une faible porosité et une microstructure uniforme de l'électrode, tandis que le procédé de pressage isostatique à chaud optimise sa résistance à la fatigue thermique et sa stabilité de surface. L'application des électrodes en tungstène-cuivre en soudage répond aux besoins de secteurs tels que la construction automobile, l'assemblage électronique et la transformation des métaux. Leurs performances sont particulièrement remarquables pour les connexions à haute résistance et les conditions de travail complexes.

6.3.1 Application au soudage par résistance

Les électrodes tungstène-cuivre utilisées en soudage par résistance démontrent leur rôle essentiel dans l'assemblage efficace de pièces métalliques, ce qui les rend particulièrement adaptées à des procédés tels que le soudage par points et le soudage à la molette. Le soudage par résistance permet la fusion du métal grâce à l'utilisation d'un courant électrique et d'une pression. Les électrodes tungstène-cuivre utilisent une teneur en tungstène faible à moyenne. La poudre de tungstène est mélangée à une forte proportion de poudre de cuivre par un procédé de métallurgie des poudres. Après frittage, le cuivre forme un réseau conducteur continu. Le pressage isostatique à chaud optimise la microstructure, garantissant une faible porosité et une distribution de phase uniforme. La conductivité élevée du cuivre assure un chemin de courant stable, tandis que la résistance à haute température du tungstène assure la stabilité de l'électrode sous haute température. Les traitements de surface, comme le polissage, réduisent l'adhérence des scories de soudure.

En soudage par résistance, les électrodes tungstène-cuivre sont principalement utilisées pour le soudage par points de panneaux de carrosserie automobile ou de composants électroniques. Leur conductivité thermique dissipe rapidement la chaleur, réduit la zone affectée thermiquement et améliore la qualité de l'assemblage. La résistance du tungstène à l'érosion par arc garantit la stabilité de l'électrode lors des soudages répétés, prolongeant ainsi sa durée de vie. Elles sont particulièrement adaptées aux applications haute fréquence. Le réseau de phases de cuivre uniforme de la microstructure assure une transmission efficace du courant, et la robustesse de l'électrode autorise de multiples réglages et installations pour s'adapter à des pièces de différentes épaisseurs. Lors de la préparation, l'uniformité du mélange des matières premières et les paramètres de frittage influencent directement les performances de l'électrode, tandis que les procédés de post-traitement, tels que le meulage, optimisent la surface de contact. Les applications incluent la construction automobile et la production d'appareils électroménagers. Les propriétés anti-adhérence des électrodes tungstène-cuivre réduisent la fréquence de nettoyage et le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

système de refroidissement améliore la gestion thermique.

6.3.2 Application au brasage

Les électrodes tungstène-cuivre utilisées pour le brasage démontrent leur valeur unique pour l'assemblage à faible apport thermique, ce qui les rend particulièrement adaptées à l'assemblage de métaux et de céramiques de précision. Le brasage s'effectue par fusion d'une charge. Les électrodes tungstène-cuivre sont préparées par infiltration sous vide avec une teneur moyenne en tungstène. La poudre de tungstène forme le squelette, tandis que le cuivre s'infiltré dans la charge par infiltration en phase liquide. Le pressage isostatique à chaud optimise la microstructure, garantissant une faible porosité et une distribution de phase uniforme. La conductivité électrique et thermique élevée du cuivre assure un chauffage stable, tandis que la résistance à haute température du tungstène prévient la déformation de l'électrode. Les traitements de surface, comme le placage, améliorent la résistance à la corrosion.

En brasage, les électrodes tungstène-cuivre sont utilisées pour connecter des composants électroniques ou des pièces aérospatiales. Leurs capacités de gestion thermique répartissent uniformément la chaleur, réduisent les contraintes thermiques au niveau du joint et améliorent sa résistance. La dureté du tungstène lui permet de conserver sa forme à haute température, et l'uniformité de sa microstructure assure un chauffage constant, ce qui la rend particulièrement adaptée au microsoudage ou aux structures multicouches. Lors de la fabrication, le contrôle des pores et la mouillabilité du cuivre influencent directement l'efficacité de la pénétration, tandis que les étapes de post-traitement telles que la découpe et le polissage optimisent la géométrie des électrodes. Les applications incluent le packaging microélectronique et la fabrication aérospatiale. L'adaptation de la dilatation thermique des électrodes tungstène-cuivre réduit les contraintes sur le substrat, et les contrôles environnementaux, comme une atmosphère inerte, préviennent l'oxydation.

6.3.3 Avantages de l'application dans le domaine du soudage

Les électrodes tungstène-cuivre utilisées en soudage sont le fruit de leurs propriétés composites et de leur procédé de fabrication optimisé, ce qui leur permet d'exceller dans les environnements à haute température et à fort courant. Le soudage exige des électrodes à la fois conductrices électrique et thermique, et durables. Les électrodes tungstène-cuivre assurent cette conductivité électrique grâce à une teneur en tungstène faible à moyenne. La conductivité élevée du cuivre assure un transfert de courant efficace, tandis que le point de fusion élevé du tungstène offre une résistance aux chocs thermiques. La métallurgie des poudres crée une microstructure à faible porosité, tandis que la compression isostatique à chaud améliore la liaison interfaciale. Les traitements de surface, comme le placage, améliorent la résistance aux intempéries.

Les avantages de l'application se reflètent d'abord dans la conductivité électrique et thermique. Le réseau de phase de cuivre de l'électrode tungstène-cuivre réduit l'effet de la chaleur résistive, améliore la qualité de l'assemblage et répartit uniformément la chaleur, réduisant ainsi la zone affectée thermiquement, ce qui la rend particulièrement adaptée au soudage haute fréquence. Deuxièmement, sa résistance aux hautes températures et à l'érosion par arc prolonge sa durée de vie. La dureté du tungstène permet des opérations

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

répétées, réduit les pertes de surface et s'adapte aux conditions de travail complexes. Troisièmement, ses propriétés anti-adhérence et de résistance mécanique permettent une utilisation dans de multiples scénarios. La ténacité de la microstructure réduit le risque de fissures et le traitement de surface réduit l'adhérence des scories de soudage.

Les scénarios d'application incluent l'industrie automobile et la fabrication électronique. Les capacités de gestion thermique des électrodes en tungstène-cuivre améliorent l'efficacité du soudage, tandis que les systèmes de refroidissement et les contrôles environnementaux optimisent encore davantage les performances.

6.4 Application des électrodes tungstène-cuivre dans les industries aérospatiale et militaire

Les électrodes tungstène-cuivre utilisées dans les secteurs aérospatial et militaire démontrent leurs performances supérieures dans des environnements extrêmes et sont largement utilisées dans les composants critiques exigeant une durabilité et une fiabilité élevées. Le point de fusion et la dureté élevés du tungstène, associés à la conductivité électrique et thermique élevée du cuivre, en font un matériau idéal pour les moteurs-fusées et les composants de guidage. Des procédés de préparation tels que la métallurgie des poudres ou l'infiltration sous vide garantissent une faible porosité et une microstructure uniforme des électrodes, tandis que le pressage isostatique à chaud optimise leur résistance à la fatigue thermique et leur résistance mécanique. L'application des électrodes tungstène-cuivre dans les secteurs aérospatial et militaire répond aux besoins de l'exploration spatiale, de la technologie des missiles et des équipements de défense. Leurs performances sont particulièrement remarquables dans des conditions de chaleur et de contraintes élevées.

6.4.1 Application aux composants liés aux moteurs-fusées

Les électrodes tungstène-cuivre utilisées dans les composants de moteurs-fusées démontrent leur valeur unique dans les environnements à haute température et haute pression, ce qui les rend particulièrement adaptées à la fabrication de systèmes de propulsion et de chambres de combustion. Les moteurs-fusées doivent maintenir leur stabilité sous des charges thermiques extrêmes. Les électrodes tungstène-cuivre sont fabriquées à partir d'une forte teneur en tungstène grâce à un procédé d'infiltration sous vide. La poudre de tungstène forme un squelette solide, tandis que le cuivre s'infiltré dans le matériau par infiltration liquide. Le pressage isostatique à chaud optimise la microstructure, garantissant une faible porosité et une distribution de phase uniforme. La conductivité électrique et thermique élevée du cuivre permet une gestion thermique efficace, tandis que la résistance à haute température du tungstène prévient la fusion. Les traitements de surface, tels que le placage, améliorent la résistance à la corrosion.

Dans les moteurs-fusées, les électrodes tungstène-cuivre sont utilisées dans les tuyères ou les revêtements des chambres de combustion. Leur résistance aux hautes températures protège des flux de gaz à haute température, préservant ainsi l'intégrité structurelle. L'uniformité de leur microstructure assure une répartition homogène de la chaleur et réduit les contraintes thermiques. La dureté du tungstène permet une utilisation à long terme, tandis que la conductivité thermique du cuivre favorise la dissipation thermique, prolongeant ainsi la durée de vie des composants et les rendant particulièrement adaptés aux

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

moteurs à forte poussée. Lors du processus de fabrication, le contrôle de la porosité et la pureté de la matière première influencent directement l'efficacité de pénétration. Les techniques de post-traitement telles que la découpe et le meulage optimisent la précision géométrique et s'adaptent aux formes complexes. Les scénarios d'utilisation incluent les lancements spatiaux et l'exploration de l'espace lointain. La résistance mécanique des électrodes en cuivre tungstène est compatible avec les environnements à haute pression, et les contrôles environnementaux, tels que les atmosphères inertes, préviennent l'oxydation.

6.4.2 Application dans les composants de guidage

Les électrodes tungstène-cuivre utilisées dans les composants de guidage démontrent leur rôle essentiel dans le contrôle de précision et la résistance aux vibrations, ce qui les rend particulièrement adaptées à la fabrication d'antennes radar et de systèmes de navigation. Les composants de guidage exigent une précision et une fiabilité élevées. Les électrodes tungstène-cuivre sont fabriquées par métallurgie des poudres avec une teneur moyenne en tungstène. La poudre de tungstène est mélangée à de la poudre de cuivre et frittée pour former un réseau conducteur. Le pressage isostatique à chaud optimise la microstructure, garantissant une faible porosité et une distribution de phase uniforme. La conductivité élevée du cuivre favorise la transmission du signal, tandis que la dureté du tungstène améliore la résistance aux vibrations. Les traitements de surface, comme le polissage, améliorent la qualité du contact.

Dans les composants de guidage, les électrodes tungstène-cuivre servent de contacts électriques ou de dissipateurs thermiques. Leur conductivité thermique répartit uniformément la chaleur, réduisant ainsi la surchauffe des composants électroniques. La robustesse de leur microstructure leur confère une résistance aux chocs mécaniques, ce qui les rend particulièrement adaptées aux avions à grande vitesse. La résistance à l'usure du tungstène assure une stabilité à long terme, tandis que la conductivité du cuivre optimise la qualité du signal et s'adapte aux environnements électromagnétiques complexes. Lors du processus de fabrication, les paramètres de mélange et de frittage des matières premières influencent directement les performances des électrodes, tandis que les étapes de post-traitement, comme le meulage, garantissent la précision dimensionnelle. Les scénarios d'utilisation incluent le guidage de missiles et la navigation par satellite. La dilatation thermique des électrodes en cuivre tungstène réduit les contraintes sur le substrat, et le contrôle environnemental, tel que le traitement anti-poussière, améliore la fiabilité.

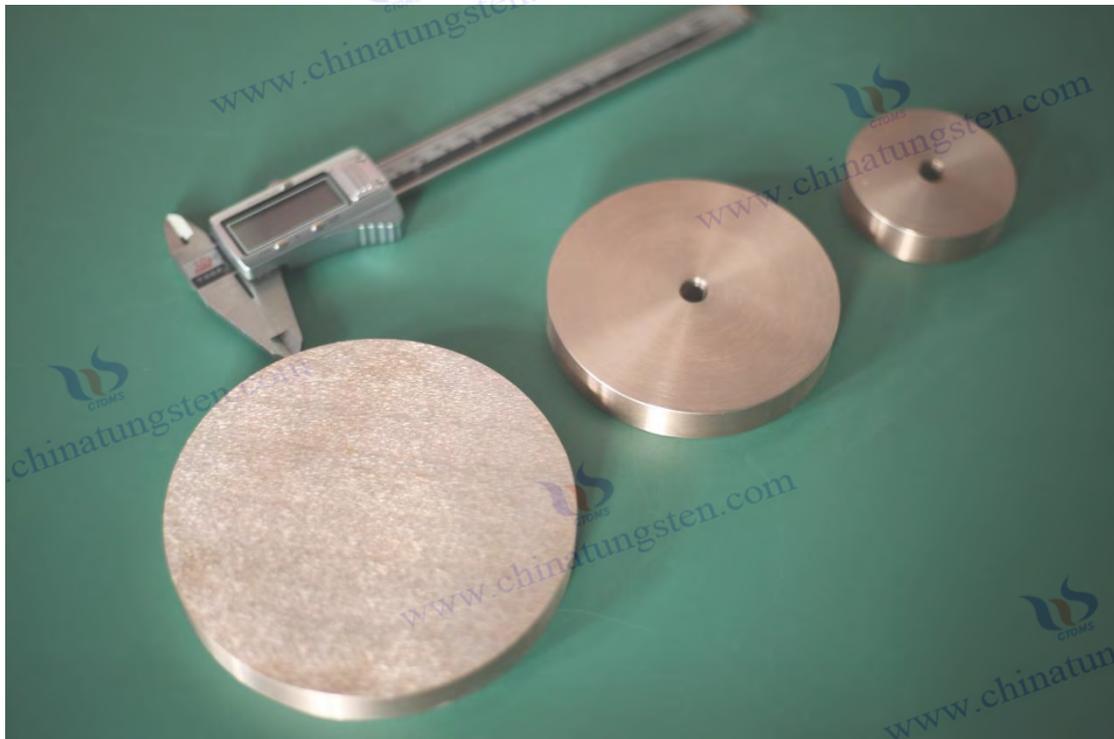
6.4.3 Avantages des applications dans les industries aérospatiales et militaires

Les électrodes tungstène-cuivre utilisées dans les applications aérospatiales et militaires bénéficient des propriétés composites de leur matériau et de leur procédé de fabrication optimisé, ce qui leur permet d'exceller dans les environnements à haute température et à fortes contraintes. Ces applications requièrent des électrodes présentant une résistance aux hautes températures, une conductivité électrique et une résistance mécanique élevées. Les électrodes tungstène-cuivre utilisent une forte teneur en tungstène pour assurer une résistance à la chaleur, tandis que la dureté du tungstène assure une résistance aux conditions extrêmes, et la conductivité électrique élevée du cuivre assure une transmission efficace du courant ou du signal. La métallurgie des poudres crée une microstructure à faible porosité, tandis que le pressage isostatique à chaud améliore la liaison interfaciale. Les traitements de surface, comme le placage,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

améliorent la résistance aux intempéries.

Les avantages applicatifs se reflètent d'abord dans la résistance aux hautes températures. La résistance thermique des électrodes en cuivre tungstène assure le fonctionnement stable des moteurs-fusées et des composants de guidage dans des environnements à haute température, réduit les pertes de matière et prolonge leur durée de vie. Ensuite, la combinaison de conductivité électrique et thermique optimise les performances. La dispersion thermique de la phase cuivre réduit les surchauffes locales, améliore l'efficacité des composants électroniques ou la transmission des signaux, et est particulièrement adaptée aux applications de haute précision. Enfin, la résistance mécanique et aux vibrations permet de supporter des conditions de travail complexes, la robustesse de la microstructure réduit le risque de fissures et le traitement de surface améliore la durabilité. Les scénarios d'utilisation incluent les lancements spatiaux et les équipements de défense. Les capacités de gestion thermique des électrodes en cuivre tungstène améliorent la fiabilité des composants, tandis que les systèmes de contrôle environnemental et de refroidissement optimisent encore les performances.



Électrode en cuivre et tungstène CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm ³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

Resistance Welding Electrodes: Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

Repair Welding Electrodes: Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes: Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

High-Voltage Discharge Tube Electrodes: This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chapitre 7 : Normes de contrôle de la qualité et de test pour les électrodes tungstène-cuivre

La fabrication des électrodes tungstène-cuivre est un processus rigoureux tout au long du processus de production, du criblage des matières premières à la transformation du produit fini. La pureté, la granulométrie et l'uniformité des poudres de tungstène et de cuivre doivent être vérifiées dès le processus de fabrication afin d'éviter que des impuretés excessives n'affectent la conductivité électrique et la résistance à haute température de l'électrode. Lors du formage et du frittage, la densité de pressage, la température de frittage et le temps de maintien doivent être contrôlés afin de garantir une structure interne dense, exempte de pores ou de fissures importants, et de minimiser le risque d'usure. De plus, lors de la phase d'usinage, la précision dimensionnelle et la rugosité de surface doivent être surveillées, en particulier pour les électrodes utilisées en électroérosion de précision.

En termes de normes d'essai, les électrodes tungstène-cuivre doivent subir de multiples tests de performance pour vérifier leur qualité. Physiquement, la densité, la dureté et la conductivité sont testées pour garantir qu'elles répondent aux exigences de performance de base du scénario d'application. L'intégrité structurelle est inspectée au microscope métallographique ou par ultrasons, et les défauts internes affectant la résistance sont strictement interdits. Dans des cas particuliers, des tests de résistance à l'érosion par arc et des tests de stabilité à haute température sont également requis pour simuler l'usure en conditions de fonctionnement réelles. Les normes ASTM sont souvent référencées à l'échelle internationale, tandis que les spécifications GB/T sont utilisées au niveau national. Certaines applications haut de gamme utilisent également des normes personnalisées pour répondre à des exigences plus strictes.

7.1 Détection des indicateurs clés de l'électrode en cuivre tungstène

Les électrodes tungstène-cuivre sont essentielles pour garantir leurs performances et leur fiabilité, notamment en termes de conductivité physique, thermique et électrique. Grâce à des méthodes d'essai scientifiques et à des processus standardisés, les fabricants peuvent vérifier que les électrodes répondent aux exigences spécifiques de leurs applications. Les électrodes tungstène-cuivre sont produites par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide, et leur microstructure et la distribution de leur composition ont un impact direct sur leurs performances. Le pressage isostatique à chaud optimise encore leur régularité. Le processus d'essai fait appel à divers instruments et contrôles environnementaux pour évaluer la densité, la conductivité thermique et les propriétés électriques de l'électrode, autant d'éléments essentiels dans des domaines tels que l'usinage par électroérosion, les équipements électriques haute tension et le soudage. À l'avenir, les progrès des technologies d'essai permettront un contrôle qualité encore plus précis.

7.1.1 Essai des propriétés physiques de l'électrode en cuivre tungstène

Les électrodes tungstène-cuivre sont essentielles au contrôle qualité. Leur densité, leur intégrité structurelle et leurs propriétés mécaniques sont évaluées afin de fournir les bases nécessaires aux applications ultérieures. Les propriétés physiques reflètent la qualité de la préparation des électrodes et leurs caractéristiques microstructurales. La dureté élevée du tungstène, combinée à la ductilité du cuivre, complique les tests. Ces derniers sont généralement réalisés en laboratoire à l'aide d'équipements

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

spécialisés et de procédures standardisées, prenant en compte de nombreux paramètres tels que la densité, la porosité et la morphologie de surface. Les électrodes optimisées pour le pressage isostatique à chaud présentent une grande stabilité physique, et ces résultats d'essais guident l'amélioration des procédés, garantissant ainsi leur fiabilité dans des environnements soumis à de fortes charges ou à des températures élevées.

7.1.1.1 Méthodes et normes d'essai de densité

Les méthodes et normes d'essai de densité constituent le point de départ des essais de propriétés physiques des électrodes tungstène-cuivre. Elles visent à mesurer la masse volumique de l'électrode, reflétant sa compacité et sa distribution poreuse. La densité affecte directement la résistance mécanique et la conductivité de l'électrode. Les essais utilisent généralement la méthode d'Archimède ou la méthode de déplacement, qui calcule la densité en immergeant l'électrode dans un liquide et en mesurant la variation de poids. La méthode d'Archimède nécessite une surface d'électrode propre afin d'éviter que le liquide résiduel n'affecte les résultats. La température et l'humidité doivent être contrôlées pendant le fonctionnement pour garantir des mesures cohérentes. La méthode de déplacement, obtenue par pesée précise et déplacement de liquide, convient aux électrodes de formes complexes et nécessite une balance de haute précision.

Le processus d'essai standardisé comprend la préparation des échantillons et des mesures multipoints. Les échantillons sont sélectionnés aléatoirement dans différents lots et des zones représentatives sont découpées pour évaluer l'uniformité. L'environnement d'essai doit être stable afin d'éviter toute interférence externe. Les résultats des essais sont corrélés aux paramètres du procédé, tels que la température et la pression de frittage. Le personnel du contrôle qualité établit les plages de densité en fonction des normes industrielles. Les électrodes hors de ces plages nécessitent une remontée jusqu'au procédé de production et un ajustement des conditions de mélange de poudre ou d'infiltration. Des traitements de surface, comme le polissage, peuvent faciliter les essais de densité et réduire l'impact des défauts de surface.

7.1.1.2 Méthodes et normes d'essai de performance thermique

Les méthodes et normes de test de performance thermique sont essentielles pour évaluer les capacités de gestion thermique des électrodes tungstène-cuivre. Ces tests mesurent leurs caractéristiques de conductivité thermique et de dilatation thermique. La performance thermique a un impact direct sur la stabilité de l'électrode et son efficacité de dissipation thermique dans des environnements à haute température. Les tests sont généralement effectués à l'aide d'un fluxmètre thermique ou d'une méthode par flash laser. La méthode par fluxmètre thermique mesure le transfert de chaleur à l'aide d'un capteur de flux thermique et convient à l'évaluation de la conductivité thermique des électrodes massives, nécessitant un fonctionnement à température constante. La méthode par flash laser chauffe la surface de l'échantillon par une brève impulsion et mesure le temps de diffusion thermique. Elle convient aux tôles fines ou aux composants délicats et nécessite un équipement très sensible.

Le processus d'essai normalisé comprend la préparation des échantillons et le contrôle environnemental.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Les échantillons doivent être polis jusqu'à obtenir une surface plane afin d'éviter que la rugosité de surface n'affecte les mesures. L'environnement d'essai doit simuler les conditions de fonctionnement réelles, telles que les températures élevées, et les mesures multipoints garantissent la représentativité des données. Les résultats de performance thermique sont corrélés à la microstructure. Les électrodes optimisées pour le pressage isostatique à chaud présentent une bonne stabilité thermique, et les données d'essai guident les ajustements du procédé. Le personnel du contrôle qualité fixe des seuils de performance thermique conformes aux normes industrielles. Les électrodes dépassant ces seuils nécessitent une optimisation de la teneur en cuivre ou de la répartition de la porosité.

7.1.1.3 Méthodes et normes d'essai de conductivité

Les méthodes et normes de test de conductivité sont essentielles à l'évaluation des propriétés électriques des électrodes tungstène-cuivre. Elles mesurent leur résistivité et leur conductivité afin de garantir un transfert de courant efficace. La conductivité a un impact direct sur les performances de l'électrode en électroérosion (EDM) ou dans les applications électriques haute tension. Les tests utilisent généralement la méthode des quatre sondes ou celle du pont. La méthode des quatre sondes minimise les effets de la résistance de contact en mettant l'échantillon en contact en plusieurs points de l'électrode, ce qui la rend idéale pour des mesures de haute précision et nécessite un fonctionnement à courant constant. La méthode du pont compare les valeurs de résistance à l'aide d'un circuit en pont et convient aux électrodes de formes complexes nécessitant une instrumentation très sensible. Le processus d'essai standardisé comprend la préparation des échantillons et le contrôle environnemental. Les échantillons doivent être découpés aux dimensions standard afin d'éviter toute influence géométrique sur les résultats. L'environnement d'essai doit être protégé des interférences électromagnétiques, et la température et l'humidité doivent être maintenues stables. La mesure multipoints garantit la constance de la conductivité. Les résultats de conductivité sont étroitement liés à la microstructure et à la teneur en cuivre. Les électrodes optimisées par compression isostatique à chaud (CIC) présentent une bonne uniformité de conductivité, et les données d'essai guident les ajustements de ratio.

7.1.2 Test de performance chimique de l'électrode en cuivre tungstène

Les électrodes tungstène-cuivre sont un élément essentiel du contrôle qualité. Ce contrôle évalue leur composition, leur résistance à la corrosion et leur teneur en impuretés afin de garantir leur stabilité chimique et leur durée de vie dans divers environnements. Les propriétés chimiques ont un impact direct sur la résistance à l'oxydation et à la corrosion, ainsi que sur leur fiabilité à long terme. Les tests sont généralement réalisés en laboratoire, à l'aide de techniques analytiques avancées et de procédures opératoires standardisées. La grande stabilité chimique du tungstène et les propriétés actives du cuivre permettent des procédures de test variées. Les électrodes optimisées pour le pressage isostatique à chaud présentent une excellente uniformité chimique. Les résultats des tests guident le choix des matières premières et l'amélioration des procédés.

7.1.2.1 Méthode d'analyse des composants

Les méthodes d'analyse de composition constituent la base des tests des propriétés chimiques des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

électrodes tungstène-cuivre. Elles visent à déterminer le rapport tungstène/ cuivre, ainsi que la teneur en autres oligo-éléments, afin de garantir que ce rapport répond aux exigences de conception. Ce processus fait généralement appel à l'analyse spectroscopique ou au titrage chimique. Les méthodes d'analyse spectroscopique, telles que la spectroscopie de fluorescence X (XRF) ou la spectroscopie d'émission optique à plasma inductif (ICP-OES), permettent d'identifier la composition élémentaire grâce aux signatures spectrales émises par l'échantillon et sont adaptées aux tests rapides. Les méthodes de titrage chimique déterminent précisément la teneur en tungstène et en cuivre par réaction d'une solution étalon avec l'échantillon, ce qui nécessite un équipement de titrage de haute précision.

Le processus d'essai standardisé comprend la préparation des échantillons et l'échantillonnage multipoint. Les échantillons doivent être prélevés sur différentes parties de l'électrode et broyés en une poudre uniforme pour garantir leur représentativité. L'humidité de l'environnement d'essai doit être contrôlée pour éviter l'oxydation ou l'absorption d'humidité de l'échantillon, et les opérateurs doivent respecter les règles de sécurité lors de la manipulation des réactifs chimiques. Les résultats de l'analyse de composition sont liés au processus de préparation. Par exemple, l'uniformité du mélange de poudre et les conditions d'infiltration influencent directement le ratio final. Le personnel de contrôle qualité définit la plage de composition en fonction des spécifications du produit. Les électrodes dépassant cette plage doivent suivre le lot de matière première ou ajuster les paramètres du procédé. Un traitement de surface, tel que le polissage, peut réduire l'impact de la contamination de surface. À l'avenir, l'efficacité et la précision de la détection de composition pourront être améliorées par l'introduction de spectromètres portables ou de systèmes d'analyse automatisés.

7.1.2.2 Méthode d'essai de résistance à la corrosion

Les méthodes d'essai de résistance à la corrosion sont essentielles pour évaluer la stabilité chimique des électrodes tungstène-cuivre en milieu acide, alcalin ou humide, afin de garantir leur performance à long terme dans les applications industrielles. Ce processus implique généralement un essai au brouillard salin ou un essai d'immersion. L'essai au brouillard salin simule un environnement atmosphérique corrosif et observe les changements à la surface de l'électrode. Cet essai doit être réalisé dans une chambre de brouillard salin dédiée. L'essai d'immersion, quant à lui, place l'électrode dans une solution corrosive spécifique, telle que de l'acide sulfurique dilué ou une solution de chlorure de sodium, et vérifie régulièrement le degré de corrosion superficielle et la perte de masse. Cet essai nécessite un équipement à température constante.

Le processus d'essai standardisé comprend la préparation des échantillons et le contrôle environnemental. Les échantillons doivent être polis pour obtenir une surface uniforme afin d'éviter que les défauts initiaux n'affectent les résultats. Le cycle d'essai est défini en fonction des exigences de l'application, et plusieurs groupes d'échantillons sont testés en parallèle pour vérifier la cohérence. Les résultats de résistance à la corrosion sont liés à la microstructure et au traitement de surface. Les électrodes optimisées par pressage isostatique à chaud présentent une bonne uniformité de résistance à la corrosion. Les données d'essai guident le processus de placage ou de revêtement. Le personnel du contrôle qualité évalue les taux de corrosion conformément aux normes industrielles. Les électrodes hors de cette plage nécessitent une optimisation de la teneur en cuivre ou l'introduction d'un traitement de résistance à la corrosion.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.1.2.3 Normes de test de la teneur en impuretés

Les normes de test de teneur en impuretés sont essentielles pour garantir la pureté chimique des électrodes en tungstène et cuivre. Elles visent à identifier et à contrôler les effets de l'oxygène, du soufre ou d'autres oligo-éléments afin d'éviter qu'ils n'affectent les performances. Ce procédé utilise généralement la combustion ou la spectrométrie de masse. La méthode de combustion décompose l'échantillon à haute température et mesure la quantité d'oxygène ou d'azote libérée, nécessitant un spectromètre d'absorption infrarouge. La spectrométrie de masse analyse la composition élémentaire par ionisation de l'échantillon et permet de détecter les traces d'impuretés, nécessitant un spectromètre de masse haute résolution.

Le processus d'essai standardisé comprend la préparation des échantillons et le contrôle environnemental. Les échantillons sont sélectionnés aléatoirement dans différents lots, broyés et séchés pour éliminer l'humidité superficielle. L'environnement d'essai doit être exempt de toute contamination externe et les opérateurs doivent respecter les règles de sécurité lors de la manipulation d'équipements à haute température. Les résultats relatifs à la teneur en impuretés dépendent de la pureté de la matière première et de l'environnement de préparation. Les électrodes optimisées pour le pressage isostatique à chaud présentent de faibles niveaux d'impuretés. Les données d'essai guident le criblage des matières premières et l'optimisation du procédé. Le personnel du contrôle qualité fixe les seuils d'impuretés conformément aux normes industrielles. Les électrodes dépassant cette plage nécessitent un ajustement de la pureté de la poudre ou la mise en place d'étapes de purification.

7.1.3 Essai des propriétés mécaniques de l'électrode en cuivre tungstène

Les électrodes tungstène-cuivre sont un élément essentiel du contrôle qualité. Elles évaluent leur dureté, leur résistance et leur ténacité afin de garantir leur fiabilité sous de fortes charges ou chocs. Les propriétés mécaniques reflètent la résistance de l'électrode à la déformation, à la rupture et à l'absorption d'énergie. Les essais sont généralement réalisés en laboratoire à l'aide d'équipements spécialisés et de procédures standardisées. La dureté élevée du tungstène et la ductilité du cuivre permettent des procédures d'essai variées. Les électrodes optimisées pour le pressage isostatique à chaud présentent une excellente uniformité mécanique, et ces résultats d'essais orientent l'amélioration des procédés et le choix des applications.

7.1.3.1 Méthodes et normes d'essai de dureté

Les méthodes et normes d'essai de dureté sont fondamentales pour tester les performances mécaniques des électrodes tungstène-cuivre. Elles visent à mesurer la résistance de surface à l'indentation et à l'usure, garantissant ainsi la durabilité de l'électrode pendant le traitement ou l'utilisation. Ce procédé utilise généralement les méthodes de dureté Vickers ou Rockwell. La méthode Vickers consiste à enfoncer un pénétrateur en diamant dans la surface de l'échantillon et à observer la géométrie de l'indentation. Cette méthode est adaptée aux tests de matériaux durs et nécessite un microscope de haute précision. La méthode Rockwell mesure la profondeur de pénétration du pénétrateur pour évaluer rapidement les variations de dureté. Elle est adaptée aux essais à grande échelle et nécessite l'utilisation d'une machine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

d'essai standard.

Le processus d'essai standardisé comprend la préparation des échantillons et la mesure multipoint. Les échantillons doivent être découpés à différents endroits de l'électrode et polis jusqu'à obtenir une surface plane afin d'éviter que des défauts initiaux n'affectent les résultats. L'environnement d'essai doit contrôler la température et l'humidité afin d'éviter toute interférence due à la dilatation thermique ou à l'oxydation de surface. Les opérateurs doivent respecter les règles de sécurité lors de l'utilisation de l'équipement. Les résultats de dureté dépendent de la microstructure et de la teneur en tungstène. Après optimisation du procédé de pressage isostatique à chaud, les électrodes présentent une bonne uniformité de dureté, et les données d'essai guident l'ajustement du ratio. Le personnel du contrôle qualité définit la plage de dureté conformément aux normes industrielles. Les électrodes hors de cette plage doivent être optimisées lors du frittage ou du post-traitement. Un traitement de surface tel que le meulage peut faciliter les essais de dureté. À l'avenir, l'introduction de duromètres automatisés ou de l'analyse d'images permettra d'améliorer l'efficacité et la précision de la détection.

7.1.3.2 Méthodes et normes d'essai de résistance

Les méthodes et normes d'essai de résistance sont essentielles pour évaluer la résistance à la compression et à la traction des électrodes tungstène-cuivre, garantissant ainsi leur stabilité sous de fortes contraintes mécaniques. Ce processus implique généralement des essais de compression ou de traction. Les essais de compression mesurent la limite de déformation de l'échantillon par application d'une pression et conviennent aux électrodes en bloc, nécessitant une machine d'essai universelle. Les essais de traction évaluent la résistance à la traction en appliquant une force de traction jusqu'à la rupture, adaptés aux électrodes en forme de tige ou de feuille et nécessitant l'utilisation de dispositifs spécialisés.

Le processus d'essai normalisé comprend la préparation des échantillons et le contrôle environnemental. Les échantillons doivent être usinés aux dimensions standard pour garantir une géométrie homogène, et les incisions doivent être lisses pour éviter la concentration de contraintes. L'environnement d'essai doit maintenir une température constante pour éviter que les fluctuations de température n'affectent les propriétés du matériau, et des mesures multipoints sont utilisées pour vérifier l'uniformité. Les résultats de résistance sont liés à la microstructure et au processus de préparation. Les électrodes optimisées pour le pressage isostatique à chaud (CIC) présentent une stabilité à la compression élevée, et les données d'essai guident l'ajustement des paramètres de pression et de frittage. Le personnel du contrôle qualité fixe les seuils de résistance en fonction des normes industrielles. Les électrodes en dehors de cette plage nécessitent une optimisation de la granulométrie de la poudre ou des conditions d'infiltration.

7.1.3.3 Méthodes et normes d'essai de ténacité

Les méthodes et normes d'essai de ténacité sont essentielles pour évaluer la résistance à la rupture et les capacités d'absorption d'énergie des électrodes tungstène-cuivre, afin de garantir leur fiabilité lors de chocs ou de cycles thermiques. Ce processus implique généralement des essais d'impact ou de ténacité. Les essais d'impact consistent à frapper un échantillon avec un pendule et à mesurer l'énergie absorbée. Cette méthode est adaptée à l'évaluation de la résistance aux chocs et nécessite un pendule standard. Les

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

essais de ténacité, quant à eux, consistent à charger une fissure pré-crée et à analyser son comportement de propagation. Ils sont adaptés aux tests de composants de précision et nécessitent un équipement de chargement de haute précision.

Le processus d'essai normalisé comprend la préparation des échantillons et le contrôle environnemental. Les échantillons doivent être usinés selon la forme spécifiée, les pré-fissures doivent répondre aux exigences de la norme et la surface doit être polie pour réduire les défauts initiaux. L'environnement d'essai doit être stable afin d'éviter que les vibrations ou les fluctuations de température n'affectent les résultats. Plusieurs groupes d'échantillons sont testés en parallèle pour garantir leur représentativité. Les résultats de ténacité sont liés à la microstructure et à la teneur en cuivre. Les électrodes optimisées par pressage isostatique à chaud présentent une bonne uniformité de ténacité. Les données d'essai guident les ajustements de la distribution de phase.

7.2 Inspection de la microstructure de l'électrode en cuivre et tungstène

Les tests microstructuraux des électrodes tungstène-cuivre constituent une étape cruciale du contrôle qualité. Ils visent à évaluer l'efficacité du procédé de fabrication et les propriétés des matériaux en analysant leurs caractéristiques structurelles internes. La microstructure a un impact direct sur la résistance mécanique, la conductivité et la durabilité de l'électrode. Les tests sont généralement réalisés en laboratoire à l'aide de techniques de microscopie avancées et de procédures opératoires standardisées. Les électrodes tungstène-cuivre sont fabriquées par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide. Leur microstructure est constituée d'un squelette de tungstène et d'une distribution de phase de cuivre. Le pressage isostatique à chaud optimise leur uniformité et leur densité. Le processus d'inspection comprend une analyse métallographique, une évaluation de l'uniformité de la distribution de phase et une mesure de la granulométrie, autant d'indicateurs cruciaux dans des domaines tels que l'usinage par électroérosion, les équipements électriques haute tension et le soudage.

7.2.1 Analyse métallographique

L'analyse métallographique est au cœur des tests microstructuraux des électrodes tungstène-cuivre. Elle vise à évaluer la qualité et la régularité du matériau par l'observation des caractéristiques structurelles internes. Ce procédé utilise des techniques microscopiques, généralement la microscopie optique ou la microscopie électronique à balayage (MEB), pour révéler la structure de phase, la distribution des pores et les liaisons interfaciales de l'électrode. L'analyse métallographique permet d'identifier les défauts de fabrication, tels que les pores non remplis ou la séparation de phases. Les électrodes optimisées pour le pressage isostatique à chaud présentent une excellente uniformité structurelle. Les résultats permettent d'ajuster le procédé afin de garantir des performances stables de l'électrode sous des charges ou des températures élevées.

7.2.1.1 Préparation des échantillons métallographiques

La préparation métallographique des échantillons est une étape fondamentale de l'analyse métallographique. Elle vise à obtenir une section lisse, propice à l'observation microscopique grâce au

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

traitement des échantillons. Ce processus comprend généralement plusieurs étapes : découpe, meulage et polissage. La découpe utilise un outil de coupe métallographique pour découper l'électrode en fines tranches. Des outils de coupe appropriés doivent être sélectionnés pour éviter d'endommager le matériau. Le meulage utilise du papier de verre de différents grains pour éliminer progressivement la rugosité de surface, en contrôlant la pression et la direction afin d'obtenir une section lisse. Le polissage utilise une suspension diamantée ou une pâte à polir à l'alumine pour améliorer l'état de surface et doit être effectué dans un environnement exempt de poussière pour éviter toute contamination.

La préparation des échantillons implique également la gravure de la section transversale à l'aide de réactifs chimiques appropriés afin de mettre en évidence la structure de phase du tungstène et du cuivre. Le temps de gravure et la concentration des réactifs sont ajustés en fonction des propriétés du matériau. Les électrodes optimisées pour la compression isostatique à chaud (CIC) nécessitent une attention particulière à la protection de surface afin d'éviter une corrosion excessive susceptible d'altérer l'observation. Le contrôle environnemental, comme la température et l'humidité, est crucial pendant la préparation, et les échantillons doivent être conservés au sec pour éviter l'oxydation. Le personnel du contrôle qualité vérifie la qualité de la préparation conformément aux normes industrielles ; des défauts tels que des rayures ou des fissures peuvent fausser l'analyse.

7.2.1.2 Critères d'évaluation de l'uniformité de la distribution de phase

L'évaluation de l'uniformité de phase est une étape clé de l'analyse métallographique. Elle vise à évaluer la répartition du tungstène et du cuivre au sein de l'électrode afin de garantir des performances constantes. Ce processus consiste à observer des coupes transversales au microscope et à analyser l'uniformité de la structure de phase à l'aide d'un logiciel de traitement d'images. L'évaluation quantitative est généralement réalisée par une méthode de grille ou de comptage de points. La méthode de grille divise la coupe transversale en plusieurs régions et calcule les rapports de phase de chaque région. La méthode de comptage de points calcule la densité de répartition du tungstène et du cuivre par échantillonnage aléatoire, à l'aide d'un système d'imagerie haute résolution.

Le processus d'évaluation standardisé comprend la sélection d'échantillons et l'analyse multipoint. Les échantillons doivent être sélectionnés dans différents lots et emplacements pour garantir leur représentativité, et l'analyse doit couvrir plusieurs zones de la section transversale pour vérifier l'uniformité. Les électrodes optimisées par le procédé de pressage isostatique à chaud présentent une meilleure distribution de phase. Les résultats des tests sont liés au processus d'infiltration et au mélange de poudre. Des défauts tels qu'un enrichissement local ou des vides peuvent affecter les performances. Le personnel du contrôle qualité fixe des seuils d'uniformité en fonction des normes industrielles. Les électrodes dépassant cette plage doivent ajuster la granulométrie de la matière première ou les conditions de frittage. Le contrôle environnemental, notamment l'absence de vibrations, garantit des images claires.

7.2.1.3 Détection de la granulométrie

L'analyse granulométrique est un élément essentiel de l'analyse métallographique. Elle vise à mesurer la taille des grains de tungstène et de cuivre et à évaluer leur impact sur les performances de l'électrode. Ce

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

procédé consiste à observer la section gravée au microscope, soit par la méthode d'interception de ligne standard, soit par analyse d'image automatisée. La méthode d'interception de ligne standard utilise des lignes droites aléatoires pour tracer les sections des grains, tandis que la méthode d'analyse d'image automatisée utilise un logiciel pour identifier les joints de grains, ce qui nécessite un microscope à fort grossissement.

Le processus d'inspection standardisé comprend la préparation des échantillons et des mesures multizones. Les échantillons doivent être polis et gravés pour garantir une bonne visibilité des joints de grains. La mesure doit couvrir différentes parties de la section transversale afin d'évaluer l'uniformité. Après optimisation du procédé de pressage isostatique à chaud, la granulométrie de l'électrode est plus homogène. Les résultats des tests sont étroitement liés à la température et à la durée de frittage. Des grains trop gros ou irréguliers peuvent réduire les performances. Le personnel de contrôle qualité définit la plage granulométrique conformément aux normes industrielles. Les électrodes dépassant cette plage doivent optimiser les paramètres de frittage ou introduire une technologie de raffinement. Le contrôle environnemental, comme une température constante, évite l'influence de la dilatation thermique. À l'avenir, la précision et les performances en temps réel de la détection granulométrique pourront être améliorées grâce à l'utilisation de microscopes nanométriques ou de technologies d'imagerie dynamique.

7.2.2 Détection des défauts des électrodes tungstène-cuivre

Les électrodes tungstène-cuivre sont un élément clé de l'inspection microstructurale. Elles visent à identifier et à évaluer les défauts tels que les pores, les fissures et les inclusions afin de garantir la qualité et la fiabilité des électrodes. Ces défauts peuvent entraîner une baisse des performances ou une réduction de la durée de vie. Les tests sont généralement réalisés en laboratoire, à l'aide de méthodes de contrôle non destructives ou destructives, associées à des procédures de détermination normalisées. Les procédés de préparation des électrodes tungstène-cuivre, tels que la métallurgie des poudres ou l'infiltration sous vide, peuvent introduire des défauts. La compression isostatique à chaud (CIC) réduit ces défauts en optimisant la microstructure. Les résultats des tests guident l'amélioration des procédés, garantissant ainsi la stabilité des performances des électrodes sous de fortes charges ou dans des environnements extrêmes.

7.2.2.1 Méthode de détection de la porosité et plage admissible

Les méthodes et tolérances de détection de la porosité sont fondamentales pour la détection des défauts dans les électrodes tungstène-cuivre. Elles visent à identifier les vides internes et à évaluer leur impact sur les propriétés du matériau. La porosité peut se former lors du frittage ou de l'infiltration, affectant la densité et la conductivité de l'électrode. La détection est généralement réalisée par contrôle par rayons X ou par ultrasons. Le contrôle par rayons X utilise l'imagerie par transmission pour visualiser la répartition des pores internes. Il est adapté aux électrodes complexes et nécessite un système d'imagerie haute résolution. Le contrôle par ultrasons analyse les vides internes par réflexion des ondes sonores et convient aux électrodes de grande taille, nécessitant des sondes et un équipement de traitement du signal spécialisés.

Le processus d'essai standardisé comprend la préparation des échantillons et le balayage multi-angles.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La surface de l'échantillon doit être propre pour réduire les interférences, et l'essai couvre différentes parties de l'électrode pour garantir l'exhaustivité. Les électrodes optimisées pour la compression isostatique à chaud (CIC) présentent une porosité moindre. Les résultats des essais dépendent du procédé de préparation, comme la granulométrie de la poudre et les conditions d'infiltration, qui influencent directement la formation des pores. Le personnel du contrôle qualité définit la plage de porosité admissible en fonction des normes industrielles. Les électrodes dépassant cette plage nécessitent un ajustement de la température de frittage ou un traitement sous vide.

7.2.2.2 Méthodes et critères de détection des fissures

Les méthodes et critères de détection des fissures sont essentiels pour évaluer le risque de fracture interne des électrodes tungstène-cuivre. Ils visent à identifier les défauts causés par des contraintes thermiques ou mécaniques. Des fissures peuvent se développer lors du frittage, du refroidissement ou du post-traitement, affectant la résistance mécanique et la durée de vie de l'électrode. La détection s'effectue généralement par ressuage ou par magnétoscopie. Le ressuage révèle les fissures de surface par pénétration de colorant et convient aux géométries complexes nécessitant un nettoyage de surface. La magnétoscopie, qui utilise un champ magnétique et des particules magnétiques pour révéler les fissures internes, convient aux matériaux ferromagnétiques et nécessite un équipement de magnétisation.

Le processus d'essai standardisé comprend le prétraitement des échantillons et l'inspection multipoint. La contamination de surface doit être éliminée et les zones critiques des électrodes doivent être inspectées pour vérifier leur intégrité. Les électrodes optimisées pour le pressage isostatique à chaud (CIC) présentent moins de fissures. Les résultats des essais sont corrélés à la vitesse de refroidissement et aux conditions de pression, et les défauts tels que les microfissures peuvent nécessiter une amplification. Le personnel du contrôle qualité définit des critères de détermination des fissures basés sur les normes industrielles. Les électrodes dépassant ces critères nécessitent une optimisation du processus de frittage ou l'introduction d'un traitement de détente des contraintes.

7.2.2.3 Méthodes de détection des inclusions et normes de contrôle

Les méthodes de détection des inclusions et les normes de contrôle sont essentielles pour garantir la pureté des électrodes tungstène-cuivre. Elles visent à identifier les corps étrangers introduits dans les matières premières ou lors du processus de préparation. Les inclusions peuvent inclure des oxydes ou de la poudre non fondue, qui affectent la conductivité et la résistance à la corrosion de l'électrode. La détection s'effectue généralement par analyse spectrale ou microscopie électronique. L'analyse spectroscopique détecte les inclusions en analysant la signature spectrale émise par l'échantillon. Elle permet un dépistage rapide et nécessite une instrumentation très sensible. La microscopie électronique, quant à elle, analyse la morphologie des inclusions par imagerie à fort grossissement et permet une analyse détaillée. Elle nécessite l'utilisation d'un spectromètre à dispersion d'énergie.

Le processus de test standardisé comprend la préparation des échantillons et l'analyse multizone. Les échantillons doivent être découpés et polis jusqu'à obtenir une surface plane, et le test doit couvrir différentes parties de l'électrode pour garantir la représentativité. L'électrode présente moins d'inclusions

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

après l'optimisation du procédé de pressage isostatique à chaud. Les résultats du test dépendent de la pureté des matières premières et de l'homogénéité du mélange. Des défauts tels que la présence de corps étrangers locaux peuvent nécessiter une analyse transversale plus approfondie. Le personnel du contrôle qualité établit des normes de contrôle des inclusions conformément aux normes de l'industrie. Les électrodes dépassant la plage de tolérance doivent ajuster la source de poudre ou introduire un procédé de filtration. Un contrôle environnemental, tel qu'un traitement anti-poussière, permet d'éviter toute pollution secondaire. À l'avenir, la détection des inclusions en temps réel et la précision pourront être améliorées grâce à la mise en place d'une surveillance en ligne ou d'une technologie de détection automatisée.

7.3 Normes industrielles pour les électrodes tungstène-cuivre

Les électrodes tungstène-cuivre sont essentielles pour garantir une qualité et des performances constantes, tout au long du processus de production, de test et d'application. Élaborées par des organismes compétents, ces normes, combinées aux exigences relatives aux procédés de fabrication et aux applications des électrodes tungstène-cuivre, guident les fabricants et les utilisateurs dans la réalisation des spécifications techniques et l'assurance de la sécurité. Les électrodes tungstène-cuivre sont produites par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide, et leur microstructure et leurs performances doivent répondre aux exigences de l'industrie. Le pressage isostatique à chaud optimise encore leur constance. Les normes industrielles englobent les normes nationales pertinentes et les exigences spécifiques, couvrant la composition des matériaux, les indicateurs de performance et le contrôle des défauts, et offrent un soutien technique dans des domaines tels que l'usinage par électroérosion (EDM), les équipements électriques haute tension et le soudage.

7.3.1 Normes nationales pertinentes

Les normes nationales pertinentes fournissent un cadre technique unifié pour la production et l'application des électrodes tungstène-cuivre, reflétant les dernières avancées chinoises en science des matériaux et en fabrication industrielle. Ces normes, élaborées conjointement par l'Administration nationale de normalisation de Chine et les associations industrielles, couvrent la préparation, les essais et l'utilisation des électrodes, visant à améliorer la qualité des produits et la compétitivité internationale. Les procédés de préparation des électrodes tungstène-cuivre, tels que la métallurgie des poudres et l'infiltration sous vide, doivent être conformes à ces normes. Les électrodes optimisées par pressage isostatique à chaud (CIC) doivent être soumises à des essais pour vérifier leur conformité.

7.3.1.1 Dispositions pertinentes des normes chinoises

chinoises, principalement émises par l'Administration chinoise de normalisation, fournissent une base juridique et technique spécifique au contrôle qualité et à l'application des électrodes tungstène-cuivre. Ces réglementations, notamment les normes nationales telles que « Contacts électriques cuivre-tungstène et argent-tungstène » et « Méthodes de détection des défauts pour les contacts électriques cuivre-tungstène », traitent des exigences de composition, des indicateurs de performance et des spécifications de détection des défauts. Le processus de fabrication doit garantir que le rapport tungstène/cuivre est

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conforme aux normes. Les tests portent sur les propriétés physiques, chimiques et mécaniques, et les électrodes optimisées par pressage isostatique à chaud doivent subir des tests microstructuraux. Les normes exigent des fabricants qu'ils mettent en place un système de gestion de la qualité, testent régulièrement les matières premières et les produits finis, et s'assurent que les traitements de surface, tels que les revêtements, répondent aux exigences de résistance à la corrosion.

Ces réglementations s'appliquent au domaine des alliages électriques. Elles mettent l'accent sur la stabilité des électrodes dans les équipements électriques haute tension et l'usinage par électroérosion, et encouragent les entreprises à adopter des procédés avancés pour réduire les défauts. Des associations professionnelles, telles que le Comité technique national de normalisation des alliages électriques, sont chargées de l'élaboration des normes. Parmi les organisations clés, on compte l'Institut de recherche en sciences électriques de Guilin et Wenzhou Hongfeng Electrical Alloy Co., Ltd., qui représentent la force technologique de la Chine. Les normes exigent également un étiquetage clair des produits et des consignes de sécurité pour garantir leur compatibilité avec divers scénarios d'application.

7.3.1.2 Exigences des normes industrielles

Les normes industrielles fournissent des spécifications techniques détaillées pour des applications spécifiques des électrodes tungstène-cuivre, principalement élaborées par le ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information ou les associations industrielles concernées. Ces exigences, notamment celles relatives aux « plaques en alliage tungstène-cuivre », se concentrent sur les propriétés des matériaux, les techniques de traitement et les conditions d'exploitation, guidant les entreprises dans la production d'électrodes répondant à la demande du marché. Le processus de préparation exige une granulométrie de poudre et des paramètres de frittage contrôlés. Les électrodes optimisées par pressage isostatique à chaud doivent satisfaire aux exigences de résistance et de conductivité. Les procédés de post-traitement, tels que la découpe et le meulage, doivent garantir une précision géométrique.

Les normes industrielles exigent que les électrodes résistent à l'érosion par arc en électroérosion, assurent une conductivité thermique efficace en soudage et maintiennent la résistance aux hautes températures des équipements électriques haute tension. Les tests doivent porter sur la microstructure, les défauts et les indicateurs de performance, et les fabricants doivent mettre en place un système d'inspection par lots pour enregistrer les paramètres de processus et les résultats des tests. Ces normes encouragent également la production verte, réduisent les émissions de déchets et respectent les exigences de protection de l'environnement. La participation d'organismes compétents, tels que Guilin Jinge Electrical and Electronic Materials Technology Co., Ltd., à l'élaboration de la norme reflète le niveau technologique du secteur.

7.3.2 Normes internationales pertinentes

Les normes internationales fournissent un cadre technique unifié pour l'application mondiale des électrodes tungstène-cuivre, reflétant la collaboration et le consensus entre différents pays et régions en science des matériaux et en fabrication industrielle. Ces normes sont élaborées par des organisations telles que l'Organisation internationale de normalisation (ISO) ou publiées indépendamment par de

grands pays industrialisés comme l'Europe, les États-Unis, le Japon et la Corée du Sud, en fonction de leurs besoins et de leur niveau de développement. Elles visent à promouvoir le commerce international et les échanges technologiques. Les procédés de fabrication des électrodes tungstène-cuivre, tels que la métallurgie des poudres et l'infiltration sous vide, doivent être conformes à ces normes. Les électrodes optimisées par pressage isostatique à chaud (CIC) doivent être soumises à des tests pour vérifier leur compatibilité internationale. Les normes internationales couvrent les exigences de composition, les tests de performance et les spécifications d'application, fournissant des orientations aux entreprises multinationales et garantissant une qualité et une fiabilité constantes sur les marchés mondiaux.

7.3.2.1 Normes internationales sur les électrodes tungstène-cuivre

Les normes internationales relatives aux électrodes tungstène-cuivre sont principalement élaborées par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) afin d'établir des spécifications unifiées pour la production et l'application mondiales de ces électrodes. Ces normes intègrent les propriétés des matériaux tungstène-cuivre aux diverses exigences des diverses applications industrielles, couvrant l'ensemble du processus, de la sélection des matières premières aux tests du produit final. Les normes ISO reposent souvent sur une collaboration internationale approfondie et intègrent l'expertise technique de pays tels que l'Europe, les États-Unis, le Japon et la Corée du Sud, garantissant ainsi une applicabilité mondiale. Les électrodes tungstène-cuivre sont produites par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide.

Leur microstructure et leurs propriétés doivent être conformes aux ratios de composition et aux propriétés physiques spécifiés par l'ISO. Les électrodes optimisées par compression isostatique à chaud (CIC) doivent subir des tests de performance rigoureux pour satisfaire aux exigences internationales. Les normes ISO relatives aux électrodes tungstène-cuivre portent principalement sur la préparation des matériaux, l'évaluation des performances et le contrôle qualité. Par exemple, les normes précisent que le rapport tungstène-cuivre doit être ajusté en fonction de l'application afin d'équilibrer la conductivité, la résistance aux hautes températures et la résistance mécanique. Pendant le processus de production, la granulométrie de la poudre, les conditions de frittage et les techniques d'infiltration doivent être contrôlées avec précision pour garantir une faible porosité et une distribution de phase uniforme dans l'électrode.

En termes de tests, les normes ISO exigent une évaluation complète de la densité, de la conductivité, de la dureté et de la résistance à la corrosion de l'électrode, à l'aide de techniques avancées de contrôle non destructif telles que les rayons X ou les ultrasons pour identifier les défauts internes. Le procédé de pressage isostatique à chaud joue un rôle clé dans l'amélioration de la densité du matériau et de la constance des performances, et les résultats des tests doivent être comparés aux seuils de performance internationalement reconnus.

Ces normes s'appliquent particulièrement à des domaines tels que l'usinage par électroérosion, les équipements électriques haute tension et le soudage, mettant l'accent sur la stabilité et la durabilité des électrodes dans des conditions extrêmes. Les normes ISO encouragent également l'utilisation de procédés respectueux de l'environnement, réduisent les émissions de déchets lors de la production et s'adaptent aux tendances mondiales en matière de développement durable.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3.2.2 Normes relatives aux électrodes tungstène-cuivre en Europe, en Amérique, au Japon, en Corée du Sud et dans d'autres pays

Les normes relatives aux électrodes tungstène-cuivre en Europe, aux États-Unis, au Japon, en Corée du Sud et dans d'autres pays reflètent les spécificités régionales en matière de développement technologique industriel et de besoins d'application. Ces normes sont élaborées par les organismes nationaux de normalisation respectifs et reflètent les différentes traditions techniques et orientations du marché. Les normes américaines sont principalement émises par l'American Welding Society (AWS) et l'American Society for Testing and Materials (ASTM), les normes européennes sont élaborées par le Comité européen de normalisation (CEN), les normes japonaises par le Comité japonais des normes industrielles (JISC), et les normes sud-coréennes se réfèrent aux normes japonaises tout en intégrant les besoins locaux. Ces normes fournissent des conseils détaillés pour la préparation, les essais et l'application des électrodes tungstène-cuivre. Les électrodes optimisées par compression isostatique à chaud (CIC) doivent respecter les spécifications de performance spécifiées par chaque région.

Aux États-Unis, la norme AWS se concentre sur l'application des électrodes tungstène-cuivre en soudage TIG et en usinage par électro-étincelage, et spécifie la composition, la géométrie et les exigences de traitement de surface des électrodes. La norme ASTM se concentre davantage sur les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau et convient aux secteurs de l'aérospatiale et de la défense. Le processus de préparation doit garantir une répartition uniforme du tungstène et du cuivre, et les tests portent sur la dureté, la conductivité et la résistance à l'érosion par arc. Les électrodes optimisées par pressage isostatique à chaud doivent passer plusieurs lots de tests. La norme européenne CEN met l'accent sur la protection de l'environnement et la sécurité, couvre l'utilisation des électrodes dans les appareils électriques haute tension, se concentre sur les tests de conductivité thermique et de résistance à la corrosion, et le processus de préparation exige l'utilisation de technologies à faible pollution. Les méthodes de test comprennent l'analyse métallographique et les essais non destructifs. Les électrodes optimisées par pressage isostatique à chaud doivent satisfaire à des exigences unifiées d'accès au marché.

Les normes japonaises JIS, reconnues pour leur haute précision et leur contrôle des processus, sont particulièrement adaptées aux industries électronique et automobile. Elles spécifient la microstructure et la qualité de surface des électrodes, exigent l'utilisation d'équipements de précision pour la préparation, et les tests incluent l'analyse de la granulométrie et des défauts. Le pressage isostatique à chaud (CIC) est essentiel pour améliorer la consistance des matériaux, et les résultats des tests doivent être comparés aux normes japonaises strictes. Les normes sud-coréennes sont fortement influencées par le Japon et, conformément aux besoins de fabrication locaux, se concentrent sur les performances des électrodes pour le soudage et la fabrication de batteries. Le processus de préparation nécessite des conditions optimisées de mélange et de frittage des poudres, et les tests portent sur la conductivité et la résistance. Les électrodes optimisées pour le CIC doivent s'adapter à un environnement de production rapide.

Les différences entre ces normes reflètent les avantages technologiques et les priorités d'application de chaque région. Les États-Unis privilégient l'aspect pratique, l'Europe la protection de l'environnement, le Japon la précision et la Corée du Sud l'efficacité. Les multinationales doivent sélectionner les normes applicables en fonction de leurs marchés cibles. L'optimisation du procédé de pressage isostatique à

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chaud offre la possibilité de répondre à de multiples normes. À l'avenir, avec l'intégration technologique mondiale, ces normes devraient converger davantage, notamment dans les domaines de la fabrication intelligente et des nouvelles énergies. Les normes relatives aux électrodes tungstène-cuivre deviendront encore plus internationales.



Électrode en cuivre et tungstène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1 Analyse de la chaîne industrielle des électrodes tungstène-cuivre

La chaîne industrielle des électrodes tungstène-cuivre est essentielle pour comprendre le développement de son marché et ses avancées technologiques, englobant l'ensemble du processus, de l'acquisition des matières premières à la fabrication du produit final. Cette analyse révèle l'interdépendance entre chaque maillon de la chaîne industrielle, fournissant une base importante pour optimiser l'efficacité de la production et la compétitivité du marché. Les électrodes tungstène-cuivre sont fabriquées par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide. Leur performance dépend de la qualité des matières premières en amont et du perfectionnement des procédés de fabrication intermédiaires. Le pressage isostatique à chaud joue un rôle important dans l'amélioration de la cohérence des produits. Chaque étape de la chaîne industrielle est influencée par l'innovation technologique, la demande du marché et le contexte politique.

8.1.1 Approvisionnement en matières premières en amont

L'approvisionnement en matières premières en amont est le fondement de la chaîne industrielle des électrodes tungstène-cuivre. Il implique l'extraction du tungstène et la transformation du cuivre, fournissant des matières premières de haute qualité pour la production ultérieure. Ce maillon détermine directement la pureté de la composition et la stabilité des performances de l'électrode. Le minerai de tungstène, principale source de matière première, est généralement extrait par extraction souterraine ou à ciel ouvert et nécessite un enrichissement et une purification pour obtenir une poudre de tungstène de haute pureté. Le cuivre est issu de la fusion du minerai de cuivre ou du recyclage des déchets de cuivre, qui sont transformés en poudre de cuivre ou en matériaux en vrac adaptés à la métallurgie des poudres. La fiabilité de l'approvisionnement en matières premières dépend de la répartition des ressources minérales et des technologies minières. De nombreuses régions du monde sont concernées, formant un réseau d'approvisionnement complexe.

Le processus de préparation des matières premières exige un contrôle qualité rigoureux. La granulométrie, la pureté et la morphologie des poudres de tungstène et de cuivre doivent être soigneusement sélectionnées afin de garantir un mélange uniforme et un traitement ultérieur fluide. Les fournisseurs doivent collaborer étroitement avec les fabricants en aval afin d'ajuster rapidement leurs stratégies d'approvisionnement pour répondre aux fluctuations de la demande du marché. Les facteurs environnementaux, tels que l'impact écologique de l'extraction minière, font également l'objet d'une attention particulière, incitant l'industrie à s'orienter vers une exploitation minière et une valorisation des ressources durables. Le procédé de pressage isostatique à chaud exige une pureté accrue des matières premières, ce qui incite les entreprises en amont à améliorer continuellement leurs technologies de purification et leurs niveaux de traitement. À l'avenir, avec la croissance des nouvelles énergies et des industries manufacturières haut de gamme, l'approvisionnement en matières premières en amont sera confronté à des exigences de pureté plus élevées et à des besoins de coopération internationale accrus.

8.1.2 Fabrication intermédiaire

La production et la fabrication intermédiaires constituent le maillon essentiel de la chaîne industrielle des électrodes tungstène-cuivre. Elles permettent de transformer les matières premières fournies en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

amont en produits finis répondant aux exigences de l'application. Cette étape comprend de multiples procédés tels que le mélange de poudre, le moulage, le frittage et l'infiltration, et est réalisée par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide. Le processus de production exige un contrôle précis des paramètres tels que la température, la pression et l'atmosphère afin de garantir la densité microstructurale et l'uniformité de la distribution des phases de l'électrode. Le procédé de pressage isostatique à chaud joue un rôle clé à cette étape, optimisant les propriétés des matériaux grâce à une pression omnidirectionnelle, réduisant les défauts et améliorant la régularité du produit. Les entreprises de fabrication disposent généralement d'équipements de pointe et d'équipes techniques professionnelles pour répondre aux besoins spécifiques des différents scénarios d'application.

La fabrication implique également des opérations de post-traitement, telles que la découpe, le meulage et le traitement de surface, afin d'affiner la géométrie et la qualité de surface de l'électrode. Ces opérations nécessitent des outils de haute précision et des contrôles qualité rigoureux pour garantir la conformité des produits aux normes industrielles. Le processus de fabrication est porté par l'innovation technologique, avec l'apparition ces dernières années de nouvelles technologies telles que le façonnage quasi-définitif et l'utilisation de nanopoudres pour améliorer l'efficacité et réduire les coûts. L'évolution des exigences du marché impose également des ajustements flexibles des lignes de production, notamment pour répondre aux exigences spécifiques des secteurs de l'aérospatiale ou de l'électronique.

8.1.3 Marché des applications en aval

Le marché des applications en aval est le maillon terminal de la chaîne industrielle des électrodes tungstène-cuivre. Il englobe l'utilisation pratique des électrodes dans de nombreux domaines de haute technologie, reflétant leurs avantages en termes de performances et la demande du marché. Ce marché comprend des secteurs tels que l'usinage par électroérosion, les équipements électriques haute tension, le soudage et le brasage, ainsi que les applications aérospatiales et militaires. Les électrodes tungstène-cuivre sont largement plébiscitées pour leur résistance aux hautes températures, leur conductivité électrique et leur résistance mécanique. Des procédés de préparation tels que la métallurgie des poudres et l'infiltration sous vide garantissent que la microstructure et les performances de l'électrode répondent à divers besoins. Les électrodes optimisées par pressage isostatique à chaud présentent une stabilité et une durabilité accrues dans les applications en aval. L'évolution de la demande du marché stimule directement l'expansion du marché en aval et l'innovation produit.

Dans le domaine de l'usinage par électro-étincelage, les électrodes tungstène-cuivre sont largement utilisées dans la fabrication de moules et le traitement de matériaux difficiles à usiner, notamment dans les secteurs automobile et électronique, où leurs capacités d'usinage de haute précision sont privilégiées. Les entreprises personnalisent la forme et les performances des électrodes selon les besoins des clients, et les procédés de post-traitement tels que le meulage et le polissage améliorent encore la qualité des produits. Le marché des appareils électriques haute tension exploite la résistance à l'érosion par arc des électrodes tungstène-cuivre, principalement pour les équipements de transmission de puissance et de contrôle industriel. Les fabricants doivent garantir la fiabilité des électrodes dans les environnements haute tension. Les domaines du soudage et du brasage reposent sur la conductivité thermique et les propriétés anti-adhérentes des électrodes et sont largement utilisés dans l'assemblage automobile et le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conditionnement de la microélectronique. La demande du marché favorise l'adaptation flexible des lignes de production.

Les secteurs aérospatial et militaire constituent un autre pilier essentiel du marché aval. Les électrodes tungstène-cuivre sont utilisées dans les moteurs-fusées et les composants de guidage, exigeant qu'elles répondent aux exigences de performance dans des environnements extrêmes. La collaboration technique et les investissements en R&D à l'échelle de l'industrie incitent les fabricants à développer des produits haute performance. Les électrodes optimisées par pressage isostatique à chaud (CIC) excellent dans ces applications. Les tendances du marché sont également influencées par le soutien politique et les réglementations environnementales, la fabrication verte et la recyclabilité devenant des tendances clés.

8.2 Direction technique des électrodes tungstène-cuivre

Les électrodes tungstène-cuivre sont essentielles à l'amélioration des performances et à l'expansion du marché. Elles privilégient l'optimisation des procédés de fabrication, le développement de nouveaux matériaux et des applications intelligentes. Cette approche vise à répondre à des exigences industrielles de plus en plus complexes en combinant les dernières technologies de fabrication aux avancées de la science des matériaux afin d'améliorer l'efficacité et la durabilité des électrodes. Les électrodes tungstène-cuivre sont fabriquées par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide. L'optimisation de leur microstructure et de leurs propriétés est au cœur du développement technologique, la compression isostatique à chaud jouant un rôle majeur dans l'amélioration de la qualité des produits. Ces avancées technologiques, portées par les tendances du marché et soutenues par les investissements en recherche, renforceront la compétitivité des électrodes dans les applications haut de gamme.

8.2.1 Optimisation du processus de préparation

L'optimisation des procédés est un axe de développement essentiel de la technologie des électrodes tungstène-cuivre. Elle vise à améliorer les performances des électrodes, à réduire les coûts et à optimiser l'efficacité de la production en perfectionnant les procédés existants. Ce procédé comprend plusieurs étapes, dont la préparation de la poudre, le formage, le frittage et l'infiltration. Il repose sur la métallurgie des poudres ou l'infiltration sous vide, avec la compression isostatique à chaud (CIC) comme principal outil d'optimisation. L'objectif de l'optimisation des procédés est de réduire les défauts, d'améliorer l'uniformité microstructurale et la densité du matériau afin de répondre aux exigences strictes de domaines tels que l'usinage par électroérosion (EDM), les équipements électriques haute tension et les applications aérospatiales et militaires.

La préparation des poudres est le point de départ de l'optimisation. L'amélioration des technologies de broyage à boulets et des procédés d'atomisation permet d'améliorer la granulométrie et la pureté des poudres de tungstène et de cuivre afin de garantir l'homogénéité du mélange. La technologie de mise en forme quasi nette est introduite dès l'étape de formage afin de réduire les opérations ultérieures. La pression de pressage et la conception du moule sont optimisées pour augmenter la densité du corps vert. L'optimisation du frittage se concentre sur le contrôle de la température et la gestion de l'atmosphère. La porosité et l'oxydation sont réduites grâce à un chauffage multi-étages et un environnement sous vide. Le

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pressage isostatique à chaud améliore encore l'effet de frittage. L'optimisation de l'étape d'infiltration assure une fusion parfaite du squelette de tungstène et de la phase de cuivre en ajustant la mouillabilité et le temps d'infiltration du cuivre, réduisant ainsi les zones non remplies.

L'optimisation des procédés de post-traitement est tout aussi importante. Les améliorations des techniques de coupe et de meulage ont permis d'améliorer la précision géométrique et la qualité de surface des électrodes, tandis que les progrès des traitements de surface tels que le placage et le revêtement ont amélioré la résistance à la corrosion et la durabilité. La mise en œuvre de l'optimisation des procédés nécessite des équipements de pointe, tels que des lignes de production automatisées et des systèmes de surveillance en temps réel, afin de réduire les erreurs humaines. À l'avenir, l'optimisation des procédés de fabrication intégrera l'intelligence artificielle et les technologies de simulation pour prédire les paramètres optimaux des procédés et développer des matériaux à gradient fonctionnel ou des électrodes nanostructurées répondant aux exigences de précision accrue et aux environnements extrêmes, favorisant ainsi l'utilisation des électrodes tungstène-cuivre sur les marchés émergents.

8.2.2 Chemin d'amélioration des performances

L'amélioration des performances est l'objectif principal du développement technologique des électrodes tungstène-cuivre. L'objectif est d'améliorer leur résistance aux hautes températures, leur conductivité électrique, leur résistance mécanique et leur durabilité grâce à des améliorations des matériaux et des innovations de procédés. Cette approche englobe l'optimisation de la composition, le contrôle de la microstructure et la modification de surface, en vue de réaliser des avancées technologiques pour répondre aux besoins de domaines tels que l'usinage par électroérosion, les équipements électriques haute tension et les applications aérospatiales et militaires. Les électrodes tungstène-cuivre sont fabriquées par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide. Leurs performances dépendent du rapport tungstène/cuivre et du contrôle précis du procédé de fabrication. Le pressage isostatique à chaud joue un rôle clé dans l'amélioration de la consistance et de la stabilité du matériau.

L'optimisation de la composition est un moyen important d'améliorer les performances. En ajustant le ratio tungstène/ cuivre, la conductivité ou la résistance thermique peuvent être améliorées pour des applications spécifiques. Par exemple, l'augmentation de la teneur en cuivre peut améliorer la conductivité et est adaptée aux applications de soudage, tandis que l'augmentation du ratio tungstène améliore la résistance aux hautes températures et est adaptée aux composants de moteurs-fusées. La régulation de la microstructure peut être obtenue par l'introduction de nanopoudres ou de matériaux multiphasés pour affiner la granulométrie, réduire les pores et les défauts, et par des procédés de pressage isostatique à chaud pour optimiser la force de liaison de l'interface et améliorer la résistance mécanique globale. Les technologies de modification de surface, telles que le placage ou le revêtement, introduisent des matériaux résistants à la corrosion ou antioxydants pour prolonger la durée de vie des électrodes dans des environnements humides ou hautement corrosifs.

De plus, l'amélioration des performances repose sur des mécanismes de détection et de rétroaction. Grâce à l'analyse métallographique et à la détection des défauts, les points faibles affectant les performances peuvent être identifiés et les paramètres du procédé ajustés pour une amélioration continue. L'équipe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

R&D collabore avec les fabricants pour explorer l'utilisation d'alliages ou de matériaux composites, en introduisant des éléments d'interphase pour améliorer la ténacité. Les avancées en matière de gestion thermique contribuent également à l'amélioration des performances en optimisant la conduction thermique des électrodes afin de réduire le risque de surchauffe localisée.

8.2.3 Exploration de l'extension des applications

L'expansion et l'exploration des applications sont au cœur du développement technologique des électrodes tungstène-cuivre, visant à explorer de nouveaux segments de marché grâce à une utilisation innovante de leurs propriétés uniques. Cette exploration englobe des secteurs émergents tels que les énergies nouvelles, les dispositifs médicaux et la fabrication intelligente, explorant de nouveaux scénarios d'application basés sur la résistance aux hautes températures, la conductivité électrique et la résistance mécanique des électrodes tungstène-cuivre. Les électrodes tungstène-cuivre sont fabriquées par métallurgie des poudres ou par infiltration sous vide. Leur microstructure et leurs propriétés optimisées constituent le fondement d'applications étendues, tandis que le pressage isostatique à chaud améliore leur adaptabilité aux environnements complexes. La diversification des demandes du marché et les avancées technologiques propulseront les électrodes tungstène-cuivre vers des secteurs à plus forte valeur ajoutée.

Le secteur des nouvelles énergies est un domaine clé pour le développement de ses applications. Les électrodes tungstène-cuivre peuvent servir de connecteurs pour les batteries de véhicules électriques ou de contacts électriques pour les équipements de charge, leur conductivité et leur résistance à la chaleur favorisant une transmission efficace de l'énergie. Le secteur des dispositifs médicaux explore des applications dans les instruments chirurgicaux de précision ou les équipements d'imagerie, où les capacités d'usinage de haute précision et la stabilité des électrodes répondent aux exigences de miniaturisation. La fabrication intelligente se concentre sur leur potentiel dans les articulations robotisées ou les capteurs, où la résistance mécanique et la résistance aux vibrations des électrodes tungstène-cuivre sont parfaitement adaptées aux environnements hautement dynamiques. La collaboration technologique et les investissements en R&D au sein de l'industrie incitent les fabricants à développer des produits sur mesure pour répondre aux exigences spécifiques de ces marchés émergents.

L'expansion des applications implique également de soutenir l'innovation des procédés. Grâce à la conception à gradient fonctionnel ou aux nanotechnologies, des électrodes aux propriétés multifonctionnelles peuvent être fabriquées pour répondre aux besoins de diverses industries. L'introduction de techniques de post-traitement telles que la gravure laser et l'impression 3D a amélioré la complexité géométrique et la flexibilité de production des électrodes. Les études de marché et les retours utilisateurs constituent des bases essentielles pour l'exploration, et les fabricants doivent collaborer avec les entreprises en aval pour vérifier la faisabilité de nouvelles applications.



Électrode en cuivre et tungstène CTIA GROUP LTD

[COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT](#)

Annexe :

Glossaire des électrodes en tungstène et cuivre

le terme	définition
Électrode en cuivre et tungstène	Composé de tungstène et de cuivre dans un rapport spécifique, il allie le point de fusion élevé, la résistance aux hautes températures et la dureté du tungstène à la conductivité électrique, à la conductivité thermique et à la ductilité élevées du cuivre. Il est largement utilisé dans des domaines tels que l'usinage par électroérosion (EDM), les équipements électriques haute tension, le soudage et le brasage, ainsi que les applications aérospatiales et militaires. Ses performances sont optimisées par la métallurgie des poudres ou l'infiltration sous vide, et le pressage isostatique à chaud améliore encore sa consistance microstructurale et sa durabilité.
Métallurgie des poudres	La production d'électrodes tungstène-cuivre s'effectue par mélange de poudre de tungstène et de poudre de cuivre, compactage puis frittage à haute température. Ce procédé garantit l'homogénéité du matériau, réduit la porosité et permet d'obtenir les propriétés mécaniques et électriques souhaitées grâce au contrôle des paramètres de frittage. Il s'agit de l'une des technologies les plus courantes dans la production d'électrodes tungstène-cuivre.
Infiltration sous vide	Procédé de fabrication d'électrodes tungstène-cuivre par infiltration de cuivre liquide dans un squelette poreux préfabriqué en tungstène, sous vide. Ce procédé consiste à fondre le cuivre à haute température et à combler les pores du squelette en tungstène, optimisant ainsi la densité et la distribution des phases du matériau. Il est particulièrement adapté aux électrodes exigeant une conductivité et une résistance aux températures élevées.
Pressage isostatique à chaud	Procédé utilisant une température élevée et un gaz isobare pour appliquer une pression omnidirectionnelle aux électrodes en cuivre et tungstène. Ce procédé élimine les défauts internes, améliore la densité du matériau et optimise la constance des performances. Il est largement utilisé pour améliorer la résistance mécanique et la stabilité thermique des électrodes.
microstructure	Les caractéristiques microstructurales internes des électrodes tungstène-cuivre, notamment le squelette du tungstène, la distribution des phases du cuivre, la granulométrie et la porosité, influent directement sur leur conductivité, leur résistance mécanique et leur durabilité. La qualité microstructurale peut être évaluée par analyse métallographique et détection des défauts, et le pressage isostatique à chaud (HIP) a un effet significatif sur l'optimisation de cette qualité microstructurale.
EDM	Technologie d'usinage utilisant une décharge d'arc pour enlever de la matière à la surface d'une pièce. Les électrodes en tungstène-cuivre sont largement utilisées comme électrodes d'outillage. Leur avantage réside dans leur capacité à usiner des matériaux de haute dureté, tels que l'acier à matrice et les alliages de titane. Leurs principales propriétés sont leur résistance à l'érosion par arc et leur conductivité

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	électrique.
Appareils électriques à haute tension	Dans le domaine des équipements électriques à haute tension et à courant élevé, les électrodes en cuivre tungstène sont utilisées dans les interrupteurs, les parafoudres et autres composants. Grâce à leur résistance à l'érosion par arc électrique et à leur stabilité conductrice, elles garantissent un fonctionnement fiable dans les environnements à haute énergie.
soudage par résistance	Méthode de soudage permettant d'obtenir une connexion métallique par chauffage électrique et pression. L'électrode en tungstène-cuivre assure une conductivité électrique et thermique. Son adhérence et sa résistance aux hautes températures lui confèrent une excellente performance en soudage par points et à la molette.
Industrie aérospatiale et militaire	Dans les domaines de la fabrication d'engins spatiaux et d'équipements militaires, les électrodes en cuivre tungstène sont utilisées dans les tuyères de moteurs-fusées et les composants de guidage, entre autres, et doivent répondre à des exigences de températures extrêmement élevées, de contraintes mécaniques et de fiabilité. Leur résistance à la chaleur et leur résistance mécanique constituent leurs principaux atouts.
Post-traitement	Les électrodes en cuivre tungstène sont taillées, meulées, polies et traitées en surface afin d'optimiser leur géométrie, leur qualité de surface et leurs performances fonctionnelles. Ce procédé garantit que les électrodes répondent aux exigences d'applications spécifiques, telles que l'usinage de haute précision ou la résistance aux environnements corrosifs.
Analyse des composants	La teneur en tungstène et en cuivre et la teneur en oligo-éléments des électrodes tungstène-cuivre sont détectées par des méthodes chimiques ou spectrales pour évaluer la pureté des matières premières et l'effet du processus de préparation afin de garantir que les performances de l'électrode répondent aux exigences de conception.
Détection des défauts	L'identification et l'évaluation des défauts tels que les pores, les fissures et les inclusions dans les électrodes en cuivre tungstène, y compris les tests aux rayons X et l'analyse métallographique, visent à améliorer la qualité et la durée de vie du produit.
Normes de l'industrie	Les spécifications élaborées par des organisations nationales ou internationales, telles que les normes ISO et les normes nationales chinoises, définissent la composition, les performances et les exigences de test des électrodes en cuivre tungstène, garantissant une qualité constante sur les marchés mondiaux.



Électrode en cuivre et tungstène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Références

Références chinoises

- [1] Li Ming, Zhang Qiang. Recherche sur la technologie de préparation et les performances de l'électrode tungstène-cuivre [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2023, 39(5) : 45-52.
- [2] Wang Fang, Liu Wei. Analyse d'application des matériaux composites tungstène-cuivre à l'usinage par électro-étincelage [J]. Modern Manufacturing Technology, 2024, 12(3) : 78-85.
- [3] Zhao Jun, Chen Li. Microstructure et contrôle qualité des électrodes tungstène-cuivre [J]. Matériaux et procédés métalliques, 2022, 18(4) : 33-40.

Références en anglais

- [1] Zhang, H., & Liu, J. Préparation et performance des électrodes tungstène-cuivre[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(12) : 123-130.
- [2] Smith, R., et Brown, T. Applications des composites tungstène-cuivre en usinage par décharge électrique[J]. Advanced Manufacturing Review, 2024, 15(6) : 89-96.
- [3] Johnson, K., et Lee, S. Analyse de la microstructure et contrôle qualité des électrodes tungstène-cuivre[J]. Revue d'ingénierie des matériaux, 2022, 10(3) : 55-62.



Électrode en cuivre et tungstène CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT