

Encyclopédie de l' électrode composite de tungstène à base de terres rares

中钨智造科技有限公司
CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

PRÉSENTATION DE CTIA GROUP

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

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

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

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



Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item	Typical Value	Remarks
Tungsten Purity	≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Oxide Content	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Current Range	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance	2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Life Improvement	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Aerospace Manufacturing: Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

Nuclear and Power Equipment: Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

Precision Machining: Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

Automotive and Rail Transit: Welding of critical load-bearing components

Electronics and Vacuum Devices: High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Répertoire

Chapitre 1 Introduction

- 1.1 Concept et définition de l'électrode composite de tungstène à base de terres rares
- 1.2 Historique du développement, contexte technique et état de la recherche des électrodes composites de tungstène à base de terres rares
- 1.3 L'importance des électrodes composites en tungstène de terres rares dans l'industrie moderne

Chapitre 2 Composition des matériaux et classification des électrodes composites de tungstène à base de terres rares

- 2.1 Caractéristiques de base des matériaux à base de tungstène et limites des électrodes en tungstène pur
- 2.2 Types et fonctions des oxydes de terres rares
- 2.3 Normes de classification des électrodes composites en tungstène de terres rares
- 2.4 Modèles et spécifications courants des électrodes composites en tungstène de terres rares
- 2.5 Analyse de l'influence de la composition des matériaux composites d'électrode de tungstène de terres rares sur la performance
- 2.6 Comparaison des électrodes composites en tungstène de terres rares avec les électrodes traditionnelles en tungstène thorium

Chapitre 3 Préparation et production : Processus et technologie des électrodes composites en tungstène de terres rares

- 3.1 Préparation et rapport des matières premières
- 3.2 Explication détaillée du processus de métallurgie des poudres
- 3.3 Processus de réduction
- 3.4 Processus de formage et de mise en forme
- 3.5 Processus de frittage
- 3.6 Technologie de traitement sous pression
- 3.7 Technologie de traitement de surface et de revêtement
- 3.8 Contrôle des paramètres clés dans le processus de préparation
- 3.9 Optimisation du procédé et analyse des défauts courants
- 3.10 Technologie de préparation verte
- 3.11 Organigramme du processus de production à grande échelle

Chapitre 4 Caractéristiques physiques, chimiques et de soudage des électrodes composites de tungstène de terres rares

- 4.1 Propriétés mécaniques des électrodes composites en tungstène de terres rares
- 4.2 Propriétés thermiques des électrodes composites en tungstène de terres rares
- 4.3 Propriétés électriques des électrodes composites en tungstène de terres rares
- 4.4 Stabilité chimique et résistance à la corrosion des électrodes composites en tungstène de terres rares
- 4.5 Caractéristiques de soudage des électrodes composites en tungstène de terres rares
- 4.6 Effets de l'ajout de terres rares sur la microstructure

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

- 4.7 Comparaison des performances de l'électrode de tungstène
- 4.8 Adaptabilité environnementale des électrodes composites en tungstène de terres rares
- 4.9 Analyse des caractéristiques de fatigue et de durée de vie des électrodes composites de tungstène à base de terres rares
- 4.10 Fiche signalétique de l'électrode composite de tungstène de terres rares de CTIA GROUP LTD

Chapitre 5 : Lignes directrices d'utilisation et d'application des électrodes composites en tungstène de terres rares

- 5.1 Vue d'ensemble des principales utilisations des électrodes composites en tungstène de terres rares
- 5.2 Types de soudage applicables aux électrodes composites de tungstène à base de terres rares
- 5.3 Cas d'application industrielle des électrodes composites en tungstène de terres rares
- 5.4 Paramètres de procédé de soudage recommandés pour les électrodes composites de tungstène de terres rares
- 5.5 Précautions d'utilisation des électrodes composites en tungstène de terres rares
- 5.6 Résolution de problèmes courants avec des électrodes composites en tungstène de terres rares
- 5.7 Applications des électrodes composites en tungstène de terres rares dans les domaines émergents
- 5.8 Analyse des avantages économiques des électrodes composites en tungstène de terres rares

Chapitre 6 Équipement de production d'électrodes composites en tungstène de terres rares

- 6.1 Équipement de traitement des matières premières pour les électrodes composites de tungstène de terres rares
- 6.2 Équipement de réduction et de dopage des électrodes composites de tungstène de terres rares
- 6.3 Équipement de formage pour électrodes composites en tungstène de terres rares
- 6.4 Équipement de frittage pour électrodes composites de tungstène de terres rares
- 6.5 Équipement de traitement des électrodes composites de tungstène de terres rares
- 6.6 Équipement de traitement de surface pour les électrodes composites en tungstène de terres rares
- 6.7 Équipement auxiliaire pour électrodes composites en tungstène de terres rares
- 6.8 Directives de sélection et d'entretien de l'équipement d'électrode de tungstène de terres rares composites
- 6.9 Conception et intégration de lignes de production automatiques d'électrodes composites de tungstène de terres rares
- 6.10 Équipement de sécurité et mesures de protection pour les électrodes composites de tungstène de terres rares

Chapitre 7 Normes nationales et étrangères pour les électrodes composites en tungstène de terres rares

- 7.1 Normes nationales pour les électrodes composites en tungstène de terres rares
- 7.2 Normes internationales pour les électrodes composites en tungstène de terres rares
- 7.3 Normes de composition des matériaux pour les électrodes composites en tungstène de terres rares
- 7.4 Normes d'essai de performance pour les électrodes composites en tungstène de terres rares
- 7.5 Normes de protection de l'environnement et de sécurité pour les électrodes composites en

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

tungstène de terres rares

7.6 Système de certification des électrodes composites en tungstène de terres rares

7.7 Comparaison et analyse d'applicabilité des étalons d'électrodes composites de tungstène de terres rares

7.8 Dernières mises à jour des normes pour les électrodes composites en tungstène de terres rares

Chapitre 8 : Essais et inspection de la qualité des électrodes composites en tungstène de terres rares

8.1 Méthodes d'essai de performance des électrodes composites en tungstène de terres rares

8.2 Essais des propriétés mécaniques des électrodes composites de tungstène à base de terres rares

8.3 Analyse de la microstructure des électrodes composites de tungstène de terres rares

8.4 Détection de la composition chimique des électrodes composites de tungstène de terres rares

8.5 Technologie de détection des défauts des électrodes composites en tungstène de terres rares

8.6 Évaluation de la durée de vie et analyse de la fiabilité des électrodes composites en tungstène de terres rares

8.7 Points clés du contrôle de la qualité des électrodes composites en tungstène de terres rares

Chapitre 9 Considérations relatives à la sécurité et à l'environnement des électrodes composites en tungstène de terres rares

9.1 Spécifications de sécurité de fonctionnement

9.2 Risques pour la santé et mesures de protection

9.3 Évaluation des impacts environnementaux

9.4 Technologie de recyclage et de réutilisation

9.5 Exigences en matière d'entreposage et de transport

9.6 Principes de fabrication écologique

9.7 Conformité réglementaire

Chapitre 10 Tendances futures du développement des électrodes composites en tungstène de terres rares

10.1 Nouvelle technologie de combinaison de terres rares et de dopage

10.2 Dopage et renforcement par diffusion des nano-oxydes de terres rares

10.3 Intégration de la technologie d'optimisation intelligente des paramètres de soudage AI

10.4 Fabrication écologique et développement durable

10.5 Perspectives d'application dans l'aérospatiale, l'industrie nucléaire, la fabrication médicale et d'autres domaines

Appendice

Glossaire

Références

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Chapitre 1 Introduction

1.1 Concept et définition de l'électrode composite de tungstène à base de terres rares

L'électrode composite de tungstène de terres rares est une sorte de tungstène de haute pureté comme matrice, dopé avec une variété d'oxydes de terres rares (tels que l'oxyde de lanthane La_2O_3 , l'oxyde de cérium CeO_2 , l'oxyde d'yttrium Y_2O_3 , la zircone ZrO_2 , etc.) matériaux d'électrode avancés qui optimisent les performances. Son cœur réside dans la conception « composite », c'est-à-dire que, grâce à la synergie de plusieurs oxydes de terres rares, l'électrode améliore considérablement la capacité d'émission d'électrons, la stabilité de l'arc, la résistance aux hautes températures et la durée de vie de l'électrode. Par rapport aux électrodes traditionnelles en tungstène pur ou aux électrodes simples en tungstène de terres rares, les électrodes composites en tungstène de terres rares présentent de meilleures performances globales dans des applications telles que le soudage, la découpe et la fusion, ce qui en fait des matériaux clés indispensables pour l'industrie moderne.

D'après la définition technique, l'électrode composite de tungstène de terres rares fait référence à un matériau d'électrode non fondant préparé par métallurgie des poudres, dopage chimique ou pulvérisation de solution par dopage 1 % ~ 4 % de fraction massique d'oxydes de terres rares dans une matrice de tungstène. Il est principalement utilisé dans le soudage sous gaz inerte (soudage TIG), le soudage au plasma, le découpage, la pulvérisation thermique et les sources de lumière électrique. Selon le type et la quantité d'oxydes de terres rares, ils peuvent être divisés en composites binaires (tels que les électrodes cérium-lanthane-tungstène), composites ternaires (tels que les électrodes cérium-lanthane-yttrium-tungstène) et électrodes multi-composites. Les normes internationales (telles que ISO 6848:2015) la classent comme une électrode non fondante, et les modèles courants incluent la série WL (tungstène de lanthane), la série WC (tungstène de cérium), la série WY (tungstène d'yttrium) et les modèles multicomposites personnalisés.

Le développement d'électrodes composites en tungstène de terres rares découle des limites des électrodes en tungstène traditionnelles. Les électrodes en tungstène pur ont un point de fusion allant jusqu'à 3410°C et une excellente résistance à la corrosion, mais leur travail d'échappement d'électrons est élevé (environ $4,5\text{eV}$), ce qui entraîne un arc électrique difficile, un arc instable et une perte d'électrode rapide. Les premières électrodes en tungstène au thorium (contenant du ThO_2) amélioraient les performances en réduisant la fonction de fonctionnement, mais la radioactivité du thorium constituait une menace pour l'environnement et la santé de l'opérateur. En introduisant des oxydes de terres rares non radioactifs, l'électrode composite de tungstène de terres rares conserve non seulement le point de fusion élevé et la stabilité du tungstène, mais réduit également considérablement le travail d'échappement d'électrons (jusqu'à $2,0 \sim 2,5 \text{eV}$), améliore la stabilité de l'arc (l'indice de stabilité peut atteindre plus de 95 %) et prolonge la durée de vie (23 fois plus longue que l'électrode en tungstène pur).

En termes de microstructure, la matrice de tungstène de l'électrode composite de tungstène de terres rares est distribuée avec de fines particules d'oxyde de terres rares, qui améliorent la résistance mécanique et la ténacité du matériau en inhibant la croissance des grains et en affinant la structure des grains. Par exemple, l'oxyde de cérium réduit la fonction de travail et favorise l'émission

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

d'électrons ; L'oxyde de lanthane améliore la stabilité de l'arc ; l'oxyde d'yttrium améliore les propriétés mécaniques à haute température ; La zircone améliore les propriétés antioxydantes. L'effet synergique de ces éléments de terres rares permet à l'électrode de rester stable à des densités de courant élevées ($>100\text{A/mm}^2$) en optimisant les propriétés des joints de grains, en réduisant la volatilisation à haute température et en inhibant la propagation des fissures.

En termes de processus de préparation, les électrodes composites en tungstène de terres rares peuvent être préparées par mélange mécanique ou dopage chimique. La méthode de mélange mécanique mélange physiquement la poudre de tungstène avec de la poudre d'oxyde de terres rares, ce qui est simple mais légèrement moins uniforme. Les méthodes de dopage chimique permettent d'obtenir un dopage au niveau atomique grâce à la pulvérisation de solution ou à la technologie de co-précipitation pour une meilleure uniformité. La sélection du processus affecte l'uniformité de la distribution des terres rares et la stabilité des propriétés de l'électrode, telles que le dopage chimique, peut contrôler la taille des particules d'oxyde de terres rares au niveau nanométrique, améliorant considérablement la durabilité de l'électrode.

Le concept d'électrodes composites en tungstène de terres rares couvre également son expansion dans les domaines émergents. Par exemple, il est combiné avec du carbure de tungstène ou du nitrure de tungstène pour former des matériaux composites adaptés aux électrodes de batteries à énergie nouvelle, ou utilisé comme supports de catalyseur pour les réactions électrochimiques. Ces applications élargies illustrent sa polyvalence, entraînant la transition des matériaux de soudage traditionnels vers les secteurs de haute technologie. De plus, ses propriétés écologiques (non radioactives, conformes à REACH) en font une alternative idéale aux électrodes en tungstène thorium, répondant à la demande mondiale de matériaux durables.

En termes d'indicateurs de performance, les spécifications typiques des électrodes composites en tungstène de terres rares comprennent un diamètre de 1,0 ~ 10,0 mm, une longueur de 150 ~ 175 mm, et la surface peut être polie, oxydée ou revêtue. Ses paramètres clés comprennent : puissance d'échappement d'électrons $< 2,5\text{eV}$, stabilité de l'arc $> 95\%$, durée de vie de l'arc de 500 ~ 1000 heures (selon les conditions du processus). Ces caractéristiques le rendent largement utilisé dans le soudage de haute précision, l'aérospatiale et les domaines des nouvelles énergies.

1.2 Historique du développement, contexte technique et état de la recherche des électrodes composites en tungstène de terres rares

Le processus de développement des électrodes composites en tungstène de terres rares est étroitement lié à l'évolution de la technologie de soudage, de la science des matériaux et des exigences en matière de protection de l'environnement. Au début du 20^e siècle, le tungstène était utilisé comme matériau d'électrode en raison de son point de fusion élevé et de sa stabilité chimique, mais les performances inadéquates des électrodes en tungstène pur limitaient leur application. En 1913, l'électrode de tungstène au thorium (contenant 1 % ~ 2 % de ThO_2) a été introduite, ce qui a considérablement amélioré les performances d'arc en réduisant la fonction de travail et a été largement utilisé dans le soudage TIG. Cependant, la radioactivité du thorium a progressivement attiré l'attention, notamment dans le contexte d'une réglementation environnementale de plus en plus

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

stricte.

En 1973, l'équipe de Wang Juzhen de l'usine d'ampoules de Shanghai en Chine a réussi à développer une électrode de tungstène en cérium (contenant du CeO₂), qui a été une percée pionnière dans le domaine des électrodes de tungstène de terres rares. Les électrodes en cérium-tungstène ont rapidement remplacé certaines applications d'électrodes en thorium-tungstène avec une non-radioactivité, une faible fonction de fonctionnement (environ 2,7 eV) et une excellente stabilité de l'arc, et ont été incluses dans la norme ISO 6848. Dans les années 80 du 20^e siècle, avec les progrès de la technologie de la métallurgie des poudres, des électrodes composites binaires en tungstène de terres rares (telles que les combinaisons de cérium-lanthane) ont commencé à apparaître. L'usine de matériaux tungstène-molybdène de Pékin et d'autres institutions ont réussi à obtenir une distribution uniforme des éléments de terres rares et à améliorer les performances globales des électrodes en optimisant le processus de dopage.

Dans les années 90, le développement d'électrodes ternaires composites en tungstène de terres rares (telles que les combinaisons de cérium, de lanthane, de lanthane et d'yttrium) est devenu un sujet brûlant. Le contexte technique comprend la large application de la microscopie électronique à balayage (MEB), de la diffraction des rayons X (DRX) et de la microscopie électronique à transmission (MET) pour aider à révéler la distribution microscopique des oxydes de terres rares dans les substrats de tungstène. Par exemple, des études ont montré que les particules d'oxyde de terres rares peuvent former une seconde phase stable, inhiber le grossissement des grains de tungstène à haute température et prolonger la durée de vie des électrodes. Au cours de la même période, le projet « Multi-composite rare-earth-tungsten electrode Industrialization Technology » soutenu par le plan 863 de la Chine a promu la production à grande échelle, couvrant la réduction de l'hydrogène, le pressage isostatique à froid et le frittage sous vide.

Au 21^e siècle, les domaines d'application des électrodes composites en tungstène de terres rares se sont étendus du soudage traditionnel à la découpe plasma, à la projection thermique et aux batteries à énergie nouvelle. Après 2000, la demande mondiale de matériaux verts a stimulé la popularité des électrodes radioactives. Le contexte technique comprend l'introduction de la nanotechnologie, l'utilisation de nanopoudres de terres rares pour améliorer l'uniformité du dopage, et la taille des particules est contrôlée dans la gamme de 50 ~ 100 nm. De plus, les équipements de production automatisés (par exemple, les sécheurs dopés par pulvérisation, les fours de frittage par induction à moyenne fréquence) améliorent considérablement le rendement et la cohérence.

Dans les années 2010, la recherche s'est concentrée sur l'optimisation des performances et le contrôle des défauts. Par exemple, le mécanisme de stratification du frittage a révélé l'influence du gradient de température sur la distribution des terres rares, et a optimisé les paramètres de frittage (1450~1800°C, vide <10⁻³Pa). Des normes internationales telles que AWS A5.12/A5.12M réglementent davantage la composition, les tests de performance et les exigences de contrôle de la qualité des électrodes. Au cours de la même période, la stabilité de la chaîne d'approvisionnement en terres rares est devenue une préoccupation, et le rapport Global Critical Minerals Outlook a souligné l'importance stratégique des ressources en terres rares.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

En 2025, l'état de la recherche sur les électrodes composites en tungstène de terres rares montre une tendance multidisciplinaire. Les points chauds comprennent :

Applications émergentes : Dans les batteries lithium-ion, les piles à combustible et les équipements photovoltaïques, les électrodes composites en tungstène de terres rares sont utilisées comme cathodes ou matériaux de revêtement conducteurs pour améliorer la densité énergétique et la durée de vie.

Fabrication verte : Le processus d'extraction des terres rares à partir des déchets de charbon réduit la dépendance aux minéraux vierges, ce qui s'aligne sur le concept d'économie circulaire.

Production intelligente : L'optimisation des processus assistée par l'IA et la technologie d'impression 3D sont utilisées pour la production d'électrodes personnalisées, améliorant ainsi la précision de fabrication de structures complexes.

Tests de performance : Le test de durée de vie de l'arc (> 1000 heures), l'expérience de vieillissement accéléré et l'analyse de la microstructure (MEB/MET) fournissent des données fiables pour l'évaluation des performances.

Les défis comprennent la rareté des ressources en terres rares, les coûts de traitement élevés et les obstacles au commerce international, mais les opportunités résident dans le soutien politique (par exemple, la réglementation chinoise sur la gestion des terres rares) et la demande croissante du marché. Selon les prévisions du marché mondial, la consommation annuelle d'électrodes composites en tungstène de terres rares a dépassé 1 600 tonnes et le taux de croissance annuel moyen devrait atteindre 5,8 % en 2025 ~ 2030.

1.3 L'importance des électrodes composites en tungstène de terres rares dans l'industrie moderne

L'importance des électrodes composites en tungstène de terres rares dans l'industrie moderne découle de leurs excellentes performances, de leurs applications multichamps et de leur contribution à la fabrication écologique. En tant qu'alternative verte aux électrodes en tungstène thorium, il élimine les risques radioactifs et est conforme aux réglementations environnementales mondiales (par exemple, REACH, RoHS), favorisant ainsi la durabilité dans l'industrie du soudage.

Dans le domaine du soudage, les électrodes composites en tungstène de terres rares sont les matériaux de base du soudage TIG et du soudage au plasma. Sa faible fonction de fonctionnement et sa grande stabilité à l'arc (>95 %) garantissent des soudures de haute qualité et sont largement utilisées dans l'aérospatiale (soudage du titane et de l'acier inoxydable), la construction automobile (soudage léger en alliage d'aluminium) et l'énergie nucléaire (soudage de pipelines de réacteurs). Par exemple, dans le secteur de l'aviation, les électrodes permettent de souder sans défaut des composants complexes, répondant à des normes de sécurité strictes ; Dans l'industrie automobile, il aide au soudage de précision des composants de batterie de véhicules électriques pour améliorer l'efficacité de la production.

Dans le domaine des nouvelles énergies, les électrodes composites en tungstène de terres rares sont

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

utilisées comme matériaux d'électrode ou revêtements conducteurs pour les batteries lithium-ion, les piles à combustible et les équipements photovoltaïques. Par exemple, dans la production de batteries au lithium, sa conductivité élevée et sa résistance à la corrosion améliorent la durée de vie des électrodes (>5000 cycles). Dans l'industrie photovoltaïque, les électrodes plasma pour la découpe des plaquettes de silicium améliorent la précision de coupe et la durabilité.

Dans l'industrie électronique, les électrodes composites en tungstène de terres rares sont utilisées dans les cathodes et les filaments des dispositifs à semi-conducteurs, fournissant une émission d'électrons stable et répondant aux exigences de haute précision de la fabrication de puces. De plus, dans le domaine de la projection thermique, sa résistance aux hautes températures (>3000°C) et sa résistance à l'oxydation sont utilisées pour pulvériser des revêtements résistants à l'usure et prolonger la durée de vie des composants mécaniques.

Dans les domaines militaire et médical, les électrodes composites en tungstène de terres rares prennent en charge le soudage de haute précision, comme la fabrication d'obus perforants et d'implants médicaux. Son point de fusion élevé et sa stabilité chimique garantissent une fiabilité dans des conditions extrêmes.

En termes d'avantages économiques, les électrodes composites en tungstène de terres rares permettent de réduire considérablement les coûts de production en prolongeant la durée de vie (500 ~ 1000 heures) et en réduisant les coûts de maintenance. Par exemple, dans le soudage TIG, le temps de combustion de l'arc est plus de 2 fois plus long que celui des électrodes en tungstène pur, ce qui réduit la fréquence de remplacement. L'analyse du marché mondial montre que sa demande dans la fabrication haut de gamme a stimulé la croissance du marché à un taux annuel moyen de plus de 5 %.

D'un point de vue stratégique, la rareté des ressources en terres rares et l'irremplaçabilité des électrodes composites en tungstène en font des matériaux clés et attirent l'attention des politiques. La loi sur les matières premières critiques de l'UE et la réglementation chinoise sur la gestion des terres rares mettent l'accent sur la protection des chaînes d'approvisionnement en terres rares, en promouvant la recherche et le développement de technologies de recyclage et de processus alternatifs. D'ici 2025, la taille du marché des électrodes composites en tungstène de terres rares devrait dépasser 1 milliard de dollars, devenant ainsi un pilier important de l'industrie de la haute technologie.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale



Chapitre 2 Composition des matériaux et classification des électrodes composites de tungstène à base de terres rares

2.1 Caractéristiques de base des matériaux à base de tungstène et limites des électrodes en tungstène pur

Les matériaux à base de tungstène sont largement utilisés dans la fabrication d'électrodes en raison de leurs propriétés physiques et chimiques uniques, devenant la matrice centrale des électrodes composites en tungstène de terres rares. Le tungstène est un métal réfractaire avec un point de fusion extrêmement élevé, une excellente stabilité thermique et chimique, ce qui le rend idéal pour les électrodes non fondantes. Ses propriétés essentielles comprennent une densité élevée, une bonne conductivité et une très faible pression de vapeur, ce qui le rend excellent dans les environnements de soudage à haute température et à courant élevé.

Le tungstène a un point de fusion de 3410°C, le plus élevé de tous les métaux, ce qui garantit que l'électrode ne fond pas ou ne se déforme pas de manière significative à des températures d'arc. Le tungstène a une densité de 19,25 g/cm³, ce qui lui confère une excellente résistance mécanique et une résistance à l'usure. De plus, le tungstène a une conductivité électrique d'environ 30 % de celle du cuivre, ce qui est inférieur aux matériaux conducteurs courants, mais suffisant pour supporter le soudage à courant élevé. Sa stabilité chimique se manifeste par une inertie aux environnements acides, alcalins et oxydants à température ambiante, ce qui le rend adapté à une utilisation dans des

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

environnements industriels exigeants. Le tungstène a un faible coefficient de dilatation thermique de seulement $4,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, ce qui réduit le risque de fissuration sous contrainte thermique à haute température.

Cependant, les électrodes en tungstène pur présentent des limites importantes dans les applications pratiques. Tout d'abord, le tungstène pur a un travail d'échappement d'électrons élevé, ce qui entraîne de mauvaises performances d'arc électrique. Dans le soudage TIG, les électrodes en tungstène pur nécessitent des tensions plus élevées pour initier des arcs, ce qui augmente la consommation d'énergie et peut entraîner une instabilité de l'arc. Deuxièmement, la stabilité de l'arc de l'électrode de tungstène pur est insuffisante, en particulier dans le soudage à courant élevé ou AC, l'arc est facile à dériver, affectant la qualité de la soudure. De plus, le grossissement du grain des électrodes en tungstène pur à haute température peut entraîner une fragilité du matériau et raccourcir sa durée de vie. Dans les environnements à haute température, des oxydes peuvent également se former à la surface du tungstène, entraînant une contamination des électrodes et une réduction des performances.

Une autre limitation des électrodes en tungstène pur est leur faible capacité d'émission d'électrons. Pendant le processus de soudage, l'efficacité de l'émission d'électrons affecte directement la stabilité et la concentration d'énergie de l'arc. La fonction de fonctionnement élevée des électrodes en tungstène pur rend difficile le maintien d'un arc stable dans des conditions de courant faible, limitant leur application dans le soudage de précision. De plus, la résistance à l'usure et à l'épuisement des électrodes en tungstène pur est limitée, en particulier dans le soudage à haute intensité à long terme, où la pointe de l'électrode est sujette à l'ablation et doit être remplacée fréquemment, ce qui augmente les coûts de production.

Ces limites ont conduit les chercheurs à explorer l'optimisation des performances des électrodes de tungstène par des modifications de dopage. Au début, les oxydes de thorium étaient utilisés comme dopants pour améliorer l'émission d'électrons, mais leurs problèmes de radioactivité ont conduit au développement d'oxydes de terres rares non toxiques. Les électrodes composites en tungstène de terres rares surmontent les lacunes des électrodes en tungstène pur en introduisant une variété d'oxydes de terres rares, devenant ainsi le choix principal de la technologie de soudage moderne.

2.2 Types et fonctions des oxydes de terres rares

Les oxydes de terres rares sont les additifs clés pour les électrodes composites en tungstène de terres rares, et leur type et leur action déterminent directement le degré d'optimisation des performances de l'électrode. Les oxydes de terres rares couramment utilisés comprennent l'oxyde de lanthane (La_2O_3), l'oxyde de cérium (CeO_2), l'oxyde d'yttrium (Y_2O_3) et la zircone (ZrO_2), qui réduisent la fonction de travail, améliorent la microstructure et améliorent la stabilité à haute température. Améliore considérablement les performances de l'électrode.

L'oxyde de lanthane (La_2O_3) est connu pour ses excellentes capacités d'émission d'électrons et sa stabilité d'arc. L'ajout d'oxyde de lanthane réduit le travail d'échappement d'électrons de la matrice de tungstène, de sorte que l'électrode peut déclencher un arc stable à une tension plus basse. Ceci est particulièrement important pour le soudage AC et de précision, car il réduit le temps de

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

démarrage de l'arc et améliore la cohérence de la soudure. L'oxyde de lanthane inhibe également la croissance des grains de tungstène à haute température en formant des particules stables de deuxième phase, améliorant ainsi la résistance à la fragilisation des électrodes. De plus, l'oxyde de lanthane a un faible taux d'évaporation à haute température, ce qui réduit la perte de matériau de l'électrode.

L'oxyde de cérium (CeO_2) est un autre oxyde de terres rares largement utilisé, connu pour sa faible fonction de fonctionnement et son efficacité d'émission d'électrons élevée. L'ajout d'oxyde de cérium permet à l'électrode de produire rapidement un arc électrique dans le soudage CC et CA, ce qui est particulièrement adapté au soudage de précision à faible courant. Les particules d'oxyde de cérium sont uniformément réparties dans la matrice de tungstène, ce qui améliore la conductivité électrique et thermique de l'électrode, tout en réduisant le gradient de température dans la zone de concentration de l'arc et en réduisant les pertes par combustion. De plus, l'oxyde de cérium contribue de manière significative à la capacité antisalissure de la surface de l'électrode, réduisant ainsi l'interférence des impuretés sur l'arc pendant le processus de soudage.

L'oxyde d'yttrium (Y_2O_3) améliore principalement les propriétés mécaniques à haute température et la résistance à l'oxydation des électrodes. L'oxyde d'yttrium est extrêmement stable thermiquement et peut maintenir l'intégrité structurelle dans les environnements d'arc à haute température et réduire l'ablation à l'extrémité de l'électrode. L'ajout d'oxyde d'yttrium affine également la structure des grains du tungstène, améliorant ainsi la ténacité et la résistance à la fatigue de l'électrode. Les électrodes contenant de l'yttrium sont donc particulièrement adaptées au soudage continu à courant élevé et à long terme, comme dans la fabrication de composants aérospatiaux.

La zircone (ZrO_2) est utilisée dans les électrodes composites en raison de son excellente résistance à l'oxydation et à la corrosion. La zircone forme une couche protectrice stable à haute température, empêchant la matrice de tungstène de réagir avec l'oxygène ou d'autres gaz réactifs, prolongeant ainsi la durée de vie de l'électrode. La zircone améliore également la résistance aux chocs thermiques de l'électrode, ce qui la rend adaptée à une utilisation dans des environnements complexes tels que la découpe plasma. De plus, l'ajout de zircone optimise la stabilité de l'arc, en particulier dans le soudage à haute fréquence.

D'autres oxydes de terres rares, tels que l'oxyde de néodyme (Nd_2O_3) et l'oxyde de samarium (Sm_2O_3), sont également explorés dans des applications spécifiques. Ces oxydes permettent d'optimiser les performances en ajustant la microstructure de l'électrode et les caractéristiques d'émission d'électrons. Par exemple, l'oxyde de néodyme réduit encore la fonction de travail, tandis que l'oxyde de samarium améliore la résistance de l'électrode à l'oxydation à haute température.

Le mécanisme d'action des oxydes de terres rares réside dans leur interaction avec la matrice de tungstène. À des températures élevées, les particules d'oxyde de terres rares migrent vers la surface de l'électrode, formant un point d'émission avec une faible fonction de fonctionnement et favorisant l'échappement des électrons. Dans le même temps, ces particules inhibent le glissement des joints de grain grâce à l'effet d'épinglage, améliorant ainsi la résistance à haute température du matériau.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Par exemple, la combinaison de l'oxyde de cérium et de l'oxyde de lanthane équilibre les performances d'arc et la durée de vie, tandis que la combinaison de l'oxyde d'yttrium et de la zircone optimise la stabilité à haute température et la résistance à la corrosion.

2.3 Normes de classification des électrodes composites en tungstène de terres rares

La classification des électrodes composites en tungstène de terres rares est basée sur le type, la quantité et les caractéristiques d'application des oxydes de terres rares, dans le but de répondre à différents besoins de soudage et normes industrielles. Les normes de classification comprennent principalement les aspects suivants :

Selon le type d'oxyde de terres rares : Selon le type d'oxyde de terres rares ajouté, l'électrode peut être divisée en électrode de terres rares unique (telle que le tungstène de cérium, le tungstène de lanthane) et l'électrode composite de terres rares. Les électrodes composites de terres rares sont subdivisées en composites binaires (tels que les électrodes cérium-lanthane-tungstène), composites ternaires (tels que les électrodes cérium-lanthane-yttrium-tungstène) et multicomposites (contenant plus de trois oxydes de terres rares). Les performances d'une seule électrode de terres rares sont relativement simples, tandis que l'électrode composite permet une optimisation plus complète des performances grâce à la synergie des éléments de terres rares.

Selon la teneur en terres rares : La teneur totale en oxydes de terres rares est généralement comprise entre 1 % ~ 4 % et est divisée en électrodes de terres rares faibles (1 % ~ 2 %), de terres rares moyennes (2 % ~ 3 %) et de terres rares élevées (3 % ~ 4 %) en fonction de différents contenus. Les électrodes à faible teneur en terres rares conviennent au soudage de précision à faible courant, tandis que les électrodes à haute teneur en terres rares sont utilisées pour le soudage à courant élevé et à usage intensif.

Par application : Selon l'application principale, les électrodes peuvent être divisées en soudage (comme le soudage TIG, le soudage plasma), la découpe (découpe plasma), la pulvérisation (pulvérisation thermique) et la source de lumière électrique (filament, cathode). Par exemple, l'électrode de soudage met l'accent sur la stabilité de l'arc et l'électrode de coupe se concentre sur la résistance aux hautes températures.

Selon les normes internationales : Selon les normes ISO 6848:2015 et AWS A5.12, les électrodes composites en tungstène de terres rares sont classées par type de terres rares et par performances. Par exemple, des modèles tels que WL20 (contenant 2 % d'oxyde de lanthane) et WC20 (contenant 2 % d'oxyde de cérium) spécifient le type et la teneur en terres rares, tandis que les électrodes composites peuvent être représentées par des nombres personnalisés, tels que WLaCeY (composite ternaire).

Selon le processus de traitement : selon la méthode de préparation, il peut être divisé en électrode mixte mécanique et électrode dopée chimique. Le coût de l'électrode de la méthode hybride mécanique est faible, mais l'uniformité est légèrement pire. Les électrodes dopées chimiquement offrent une plus grande uniformité de distribution des terres rares et conviennent aux applications

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

hautes performances.

Les critères de classification sont élaborés en tenant compte de l'équilibre entre l'optimisation des performances et les coûts de production. Par exemple, les électrodes composites binaires offrent un bon équilibre entre performances et coût, et sont largement utilisées dans le soudage industriel ; Les électrodes ternaires ou multicomposites sont conçues pour les environnements exigeants de haute précision, tels que l'aérospatiale et l'énergie nucléaire.

2.4 Modèles et spécifications courants des électrodes composites en tungstène de terres rares

Les modèles et les spécifications des électrodes composites en tungstène de terres rares sont formulés conformément aux normes internationales et à la demande du marché, et les modèles courants comprennent les séries WL, WC, WY et les modèles composites personnalisés. Voici les principaux modèles et leurs spécifications :

Série WL (électrode de tungstène de lanthane) : contient de l'oxyde de lanthane, généralement exprimé en WL10 (1 % La_2O_3), WL15 (1,5 % La_2O_3), WL20 (2 % La_2O_3). Il convient au soudage TIG et au soudage plasma, avec d'excellentes performances d'initiation d'arc et une stabilité d'arc, avec une plage de diamètre de 1,0 ~ 10,0 mm et une longueur de 150 ~ 175 mm.

Série WC (électrode de tungstène de cérium) : Contient de l'oxyde de cérium, le modèle courant est WC20 (2 % CeO_2). Il convient au soudage de précision à faible courant et au soudage AC, avec un diamètre de 1,0 ~ 6,4 mm et une longueur de 150 mm, et la surface est généralement polie pour réduire la contamination.

Série WY (électrode de tungstène d'yttrium) : contient de l'oxyde d'yttrium, modèle tel que WY20 (2 % Y_2O_3), principalement utilisé pour le soudage DC à courant élevé, excellente résistance à haute température, diamètre 2,0 ~ 8,0 mm, longueur 150 ~ 175 mm.

Modèles composites : tels que WLaCe (contenant de l'oxyde de lanthane et de l'oxyde de cérium), WLaCeY (contenant de l'oxyde de lanthane, de l'oxyde de cérium et de l'oxyde d'yttrium). Ces modèles sont des produits personnalisés, la teneur en terres rares est ajustée en fonction des besoins de l'application, généralement entre 1,5 % ~ 3,5 %, et le diamètre et la longueur peuvent être personnalisés selon les exigences du client.

Spécifications : Les diamètres des électrodes vont de 0,5 mm (micro-soudure) à 12,0 mm (soudage de l'industrie lourde), et les longueurs comprennent 150 mm, 175 mm et des longueurs personnalisées. Le traitement de surface comprend le polissage, l'oxydation et le revêtement, et la forme finale peut être pointue, plate ou sphérique pour répondre aux besoins des différents procédés de soudage.

Le choix du modèle dépend du type de soudure, de la plage de courant et des propriétés du matériau. Par exemple, le WL20 convient au soudage AC des alliages d'aluminium, le WC20 est utilisé pour le soudage à faible courant de l'acier inoxydable et le WLaCeY est utilisé pour le soudage à haute charge de l'acier à haute résistance. La diversité des spécifications garantit la large applicabilité de

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

l'électrode dans l'aérospatiale, la construction automobile, l'énergie nucléaire, etc.

2.5 Analyse de l'influence de la composition du matériau composite de l'électrode de tungstène de terres rares sur la performance

Les performances des électrodes composites en tungstène de terres rares sont affectées par la composition du matériau, notamment le type, le contenu, l'uniformité de distribution des oxydes de terres rares et leur interaction avec la matrice de tungstène. Voici une analyse de son impact sous plusieurs angles :

Types d'oxydes de terres rares : Différents oxydes de terres rares contribuent différemment aux performances des électrodes. L'oxyde de lanthane réduit principalement la fonction de travail et améliore la stabilité de l'arc. L'oxyde de cérium améliore l'initiation de l'arc et la capacité anti-pollution ; L'oxyde d'yttrium améliore la résistance à haute température et la résistance aux brûlures ; La zircone améliore les propriétés antioxydantes. Les composites binaires ou ternaires optimisent les performances combinées grâce à une action synergique, comme les électrodes WLaCe qui combinent des fonctions de fonctionnement faibles et des caractéristiques de longue durée.

Teneur en terres rares : Une teneur accrue en oxyde de terres rares réduit généralement la fonction de travail et améliore l'efficacité de l'émission d'électrons, mais une teneur trop élevée (>4 %) peut entraîner une diminution de la résistance de la matrice et des défauts de frittage. La faible teneur de 1 % ~ 2 % convient au soudage de précision, 2 % ~ 3 % est la plage générale et 3 % ~ 4 % est utilisé pour le soudage à charge élevée. L'optimisation du contenu nécessite de trouver un équilibre entre performances et coûts.

Uniformité de distribution : La distribution uniforme des oxydes de terres rares est cruciale pour les performances. La méthode de dopage chimique permet d'obtenir une distribution de particules à l'échelle nanométrique (< 100 nm) et d'améliorer la conductivité et la stabilité de l'électrode. Le mélange mécanique peut entraîner une agglomération de particules, ce qui réduit l'uniformité des performances. L'analyse MEB a montré que les particules de terres rares uniformément réparties pouvaient clouer efficacement les joints de grains et améliorer la capacité à résister au fluage à haute température.

Microstructure : L'ajout d'oxydes de terres rares affine les grains de tungstène, et la taille moyenne des grains est réduite de 20 ~ 50 µm à 5 ~ 10 µm de tungstène pur, ce qui améliore la ténacité et la résistance à la fatigue. Les particules de terres rares forment également une deuxième phase stable, réduisant le glissement des joints de grains à haute température et prolongeant la durée de vie des électrodes.

Effet synergique : Les électrodes multi-composites optimisent les performances grâce à l'action synergique des éléments de terres rares. Par exemple, la combinaison de l'oxyde de cérium et de l'oxyde de lanthane réduit la tension de l'arc et prolonge la durée de vie ; La combinaison de l'oxyde d'yttrium et de la zircone améliore la stabilité à haute température et la résistance à la corrosion. Cette synergie permet à l'électrode composite d'exceller dans des conditions de fonctionnement complexes.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item	Typical Value	Remarks
Tungsten Purity	≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Oxide Content	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Current Range	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance	2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Life Improvement	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Aerospace Manufacturing: Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

Nuclear and Power Equipment: Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

Precision Machining: Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

Automotive and Rail Transit: Welding of critical load-bearing components

Electronics and Vacuum Devices: High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Adaptabilité à l'environnement : La stabilité chimique des oxydes de terres rares améliore la résistance de l'électrode à la contamination, réduisant ainsi l'impact des oxydes ou des impuretés pendant le soudage. Les électrodes contenant de la zircone présentent une plus grande durabilité dans des environnements à forte humidité ou à gaz corrosifs.

En résumé, la conception de la composition des matériaux doit être optimisée en fonction des exigences de l'application. Le secteur aérospatial peut privilégier les électrodes composites ternaires pour garantir des performances à haute température, tandis que l'industrie électronique se penche vers des électrodes cérium-tungstène à faible teneur en terres rares pour le soudage de précision.

2.6 Comparaison des électrodes composites en tungstène de terres rares avec les électrodes traditionnelles en thorium-tungstène

Il existe des différences significatives entre les électrodes composites en tungstène de terres rares et les électrodes traditionnelles en tungstène thorium en termes de performances, de respect de l'environnement et de domaine d'application. Voici une comparaison sous plusieurs aspects :

Performance d'émission d'électrons : L'[électrode de tungstène au thorium](#) (contenant 1 % ~ 2 % de ThO₂) offre de bonnes performances d'initiation d'arc grâce à la faible fonction de travail du thorium, mais l'électrode composite de tungstène de terres rares réduit encore la fonction de travail grâce à l'effet synergique de plusieurs oxydes de terres rares, avec une tension d'arc plus faible et une stabilité d'arc plus élevée. Par exemple, le temps de démarrage de l'arc de l'électrode WLaCeY en soudage AC est environ 20 % plus court que celui de l'électrode en tungstène thorium.

Stabilité de l'arc : La stabilité de l'arc des électrodes composites en tungstène de terres rares est meilleure que celle des électrodes de tungstène au thorium, en particulier dans des conditions de courant élevé et de courant alternatif. La distribution uniforme des oxydes de terres rares réduit la dérive de l'arc et garantit la qualité de la soudure. L'électrode de tungstène au thorium peut provoquer une instabilité de l'arc en raison de la volatilisation du thorium pendant le soudage à long terme.

Durée de vie : La durée de vie des électrodes composites en tungstène de terres rares est nettement plus longue que celle des électrodes en tungstène thorium. Le faible taux d'évaporation et la résistance à l'épuisement des oxydes de terres rares permettent à l'électrode d'être utilisée en continu pendant 500 ~ 1000 heures dans le soudage à haute charge, tandis que les électrodes en tungstène au thorium sont généralement de 300 ~ 500 heures. La durée de vie prolongée réduit la fréquence des remplacements et les coûts de production.

Protection de l'environnement et sécurité : Les électrodes de tungstène au thorium contiennent du thorium radioactif, qui peut libérer des particules α pendant le traitement et l'utilisation, ce qui présente des risques pour la santé des opérateurs, et l'élimination des déchets doit être conforme à des normes strictes de radioprotection. Les électrodes composites en tungstène de terres rares sont non radioactives et conformes aux réglementations REACH et RoHS, ce qui réduit la pollution de l'environnement et les risques pour la santé, ce qui en fait le premier choix pour la fabrication

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

écologique.

Performances à haute température : Les électrodes composites en tungstène de terres rares présentent une meilleure stabilité à haute température et une meilleure résistance à l'épuisement grâce à l'affinement des grains et à la résistance à l'oxydation des oxydes de terres rares. Les électrodes de tungstène thorium sont sujettes à la volatilisation du thorium à haute température, ce qui entraîne une perte accrue de pointes d'électrodes.

Applications : Les divers modèles d'électrodes composites en tungstène de terres rares, telles que WL, WC et WLaCeY, les rendent adaptées à une plus large gamme de types et de matériaux de soudage, y compris les alliages d'aluminium, les aciers inoxydables et les superalliages. Bien que l'électrode de tungstène thorium convienne à une variété de soudages, son champ d'utilisation a progressivement diminué en raison des restrictions environnementales.

Coût et disponibilité : Le coût des matières premières des électrodes en thorium et tungstène est inférieur, mais les coûts de traitement et d'élimination des déchets sont plus élevés. Les ressources en terres rares des électrodes composites en tungstène de terres rares sont chères, mais le coût de production est réduit en optimisant le processus (comme le dopage chimique), et les progrès de la technologie de récupération des terres rares améliorent la disponibilité des ressources.

En résumé, les électrodes composites en tungstène de terres rares sont nettement meilleures que les électrodes en tungstène au thorium en termes de performances, de protection de l'environnement et de flexibilité d'application, et sont les matériaux privilégiés pour la technologie de soudage moderne. Ses propriétés non radioactives et ses caractéristiques de longue durée ont favorisé sa large application sur le marché mondial, en particulier en Europe et aux États-Unis, où les exigences en matière de protection de l'environnement sont strictes.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale



Chapitre 3 Préparation et production : Processus et technologie des électrodes composites en tungstène de terres rares

3.1 Préparation et rapport des matières premières

La préparation et le rapport des matières premières sont les maillons de base de la préparation des électrodes composites en tungstène de terres rares, qui déterminent directement la stabilité et la consistance des propriétés du matériau. Les principales matières premières des électrodes composites en tungstène de terres rares comprennent des matériaux à base de tungstène de haute pureté et des additifs d'oxyde de terres rares, et la conception du rapport doit être contrôlée avec précision pour optimiser la capacité d'émission d'électrons de l'électrode, la stabilité de l'arc et la durabilité à haute température.

Matières premières à base de tungstène : Les matériaux à base de tungstène sont généralement constitués de trioxyde de tungstène (WO_3) ou de paratungstate d'ammonium (APT, $(NH_4)_2WO_4$) comme ingrédient de départ. La pureté du trioxyde de tungstène doit atteindre plus de 99,95 % pour réduire l'impact des impuretés (telles que le fer, le silicium, le carbone) sur les performances de l'électrode. Le paratungstate d'ammonium est souvent utilisé dans les processus de dopage chimique en raison de sa solubilité dans l'eau et de sa facilité de dopage, éliminant les étapes de calcination supplémentaires et raccourcissant les cycles de production. La taille des particules de tungstène est généralement contrôlée de 1 à 5 microns pour assurer l'uniformité lors des processus de réduction

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

et de frittage ultérieurs. Les matières premières sont rigoureusement tamisées pour éliminer les inclusions d'oxyde ou les impuretés métalliques, et leur pureté est généralement confirmée par spectroscopie de fluorescence X (XRF).

Additifs à base d'oxyde de terres rares : Les oxydes de terres rares sont introduits sous forme de nitrates, notamment le nitrate de lanthane ($\text{La}(\text{NO}_3)_3$), le nitrate de cérium ($\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$) et le nitrate d'yttrium ($\text{Y}(\text{NO}_3)_3$) et le nitrate de zirconium ($\text{Zr}(\text{NO}_3)_4$). Ces nitrates doivent être formulés sous forme de solution à une concentration de 0,1 à 0,5 mol/L, avec un solvant d'eau désionisée et un pH ajusté à 5,5 à 6,5 pour éviter les précipitations ou les réactions chimiques. La pureté des éléments de terres rares ne doit pas être inférieure à 99,9 % pour éviter que les impuretés non métalliques telles que le soufre et le phosphore n'affectent la conductivité et la stabilité de l'électrode. La teneur totale en oxydes de terres rares est généralement de 1 % à 4 % (fraction massique), et le rapport spécifique est optimisé en fonction des besoins de l'application. Par exemple, une électrode composite binaire peut utiliser de l'oxyde de cérium et de l'oxyde de lanthane 1:1, et une électrode composite ternaire peut être de l'oxyde de cérium : oxyde de lanthane : oxyde d'yttrium = 1:1:3 pour équilibrer les performances d'arc et la stabilité à haute température.

Conception proportionnelle : La conception du rapport doit tenir compte de manière exhaustive du travail d'échappement des électrons, de la stabilité de l'arc et des propriétés mécaniques. La faible teneur en terres rares (1 % à 2 %) convient au soudage de précision, en mettant l'accent sur les performances d'amorçage de l'arc ; La teneur élevée en terres rares (3 % à 4 %) convient au soudage à courant élevé et à usage intensif, ce qui améliore la longévité et la résistance à l'épuisement. Les expériences montrent que l'effet synergique de l'oxyde de lanthane et de l'oxyde de cérium peut réduire le travail d'échappement des électrons à 2,0 à 2,5 eV, et la stabilité de l'arc est améliorée à plus de 95 %. Dans le processus de ratio, une simulation informatique et une vérification expérimentale du rapport optimisé sont nécessaires, et les méthodes courantes comprennent la conception expérimentale orthogonale et l'analyse de la surface de réponse pour déterminer la combinaison optimale de terres rares.

Mélange de matières premières : Le processus de mélange adopte des méthodes de dopage par pulvérisation ou d'imprégnation. La solution de nitrate de terres rares est pulvérisée uniformément dans la poudre de trioxyde de tungstène, le taux de pulvérisation est contrôlé à 0,5 à 1 L/min, la température de séchage est de 80 à 120 °C et le sècheur par atomisation est utilisé pour former une poudre dopée uniforme. La méthode d'imprégnation consiste à tremper de la poudre de tungstène dans une solution de terres rares à une vitesse d'agitation de 200 à 300 tr/min pour assurer une adsorption uniforme. Après le mélange, la poudre doit être séchée sous vide ou sous atmosphère inerte pour éviter l'oxydation. Après séchage, la poudre doit être tamisée à travers un tamis de 200 mailles pour éliminer les particules agglomérées.

Contrôle de la qualité : La préparation des matières premières doit contrôler strictement la teneur en humidité (<0,5 %) et la teneur en impuretés (<0,01 %). L'environnement d'entreposage doit être sec, ventilé et la température doit être contrôlée entre 10 et 25 °C pour éviter la dégradation due à l'humidité ou à la contamination. L'enregistrement du ratio doit être archivé numériquement et

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

coopéré avec le système de surveillance en ligne pour assurer la cohérence entre les lots.

3.2 Explication détaillée du processus de métallurgie des poudres

Le procédé de métallurgie des poudres est la technologie de base pour la préparation des électrodes composites en tungstène de terres rares, qui permet de densification et d'optimisation des performances des matériaux grâce à la préparation de poudre, au moulage, au frittage et au post-traitement. L'avantage de ce procédé est qu'il permet de contrôler avec précision la distribution et la microstructure des oxydes de terres rares, et qu'il est adapté à la production industrielle d'électrodes haute performance.

Préparation de la poudre : La préparation de la poudre implique le dopage et l'alliage mécanique. Dopage Le nitrate de terres rares est introduit dans la poudre de tungstène par séchage par pulvérisation ou méthode de mélange humide, et après séchage, il forme une poudre dopée uniforme. L'alliage mécanique adopte un broyeur planétaire à haute énergie, et les paramètres du broyeur à boulets sont : 400 à 600 tr/min, le rapport de billes est de 8 : 1 à 10 : 1 et le temps de broyage est de 8 à 12 heures. Le fluide de broyage à boulets est composé de billes de carbure pour éviter la pollution métallique. L'alliage mécanique raffine les particules de poudre à 0,1 à 1 micron, introduisant des défauts cristallins et améliorant l'activité de frittage ultérieure.

Caractérisation de la poudre : La poudre préparée doit être détectée par un analyseur de taille de particules laser pour s'assurer que le D50 (taille médiane des particules) est dans la plage de 1 à 5 microns. La surface spécifique est déterminée par la méthode BET, généralement de 2 à 5 m²/g, pour assurer l'activité de frittage. L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a confirmé la forme cristalline et la distribution des oxydes de terres rares, et la microscopie électronique à balayage (MEB) a observé la morphologie et l'uniformité des particules.

Formage : Le formage presse la poudre en un flan, et les méthodes courantes comprennent le pressage isostatique à froid et le moulage. Le pressage isostatique à froid utilise un milieu liquide pour appliquer une pression uniforme de 100 à 300 MPa, le temps de moulage est de 5 à 10 minutes et la densité du corps atteint 60 % à 70 % de la densité théorique. Le moulage utilise un moule rigide qui applique une pression de 150 à 200 MPa à travers une presse hydraulique, ce qui le rend adapté à la production de petits lots. De l'alcool polyvinylique (PVA) de 0,5 % à 1 % est ajouté comme liant pour améliorer la formabilité, qui doit être éliminé lors du pré-frittage. L'équipement de moulage doit être équipé de capteurs de pression pour assurer une répartition uniforme de la pression.

Frittage : Le frittage réalise le collage de particules de poudre et la densification du matériau, et le frittage par pression chaude sous vide et le frittage par plasma d'étincelle (SPS) sont couramment utilisés. Le frittage à chaud sous vide est effectué à des pressions de 1600 à 1800 °C et de 50 à 80 MPa, avec un contrôle segmenté des vitesses de chauffage (10 °C/min à 1000 °C, 4 °C/min à la température cible), un temps de maintien de 60 à 90 minutes et un vide de 10⁻³ Pa. SPS utilise un courant pulsé pour chauffer rapidement (100 à 200 °C/min), fritter à 1400 à 1600 °C et maintenir au chaud pendant 5 à 10 minutes, adapté aux nanopoudres et réduire l'évaporation des terres rares. La densité du matériau après frittage est proche de la valeur théorique (>99 %), et la taille des grains

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

est contrôlée de 5 à 10 microns.

Post-traitement : Le post-traitement comprend le forgeage rotatif, l'emboutissage et la finition de surface. Le forgeage rotatif traite des ébauches frittées d'un diamètre de 3 à 10 mm, avec un taux de déformation de 20 à 30 % par passe. Le diamètre a été réduit à 0,5 à 10 mm par étirage, lubrifié avec une émulsion de graphite. La finition de surface est réalisée par polissage mécanique ou électrochimique pour éliminer les défauts de surface et améliorer la finition.

Avantages et défis du procédé : Le procédé de métallurgie des poudres permet la distribution par diffusion d'oxydes de terres rares, améliorant ainsi l'émission d'électrons de l'électrode et sa résistance à l'épuisement. Les défis comprennent le contrôle de l'uniformité de la poudre et la prévention des défauts de frittage (par exemple, la porosité), qui doivent être résolus par l'optimisation des processus et la surveillance en ligne. À l'avenir, la combinaison de la nanotechnologie et de l'automatisation améliorera encore l'efficacité et la qualité.

3.3 Processus de réduction

Le processus de réduction convertit le trioxyde de tungstène ou le paratungstate d'ammonium en poudre de tungstène de haute pureté tout en fixant la distribution de l'oxyde de terres rares, qui est une étape clé dans la préparation des électrodes composites en tungstène de terres rares. La réduction de l'hydrogène est largement utilisée en raison de son efficacité et de sa propreté élevées, et est divisée en deux étapes de réduction pour optimiser la qualité de la poudre.

La première étape de réduction : à 500 à 600 °C, la poudre de trioxyde de tungstène dopée est placée dans une atmosphère d'hydrogène avec une pureté d'hydrogène supérieure à 99,99 % et un débit de 0,5 à 1 m³/h. Le four de réduction adopte un four tubulaire ou un four à cloche, et l'écart de température est contrôlé à ±5°C. Le temps de réduction est ajusté en fonction de la quantité de poudre, généralement de 4 à 6 heures, pour générer la phase intermédiaire WO₂, tandis que le nitrate de terres rares est décomposé en oxydes et initialement fixé dans la matrice de tungstène. La teneur en oxygène descend en dessous de 1 %.

Deuxième étape de réduction : la température monte à 800 à 950°C, ce qui permet d'éliminer davantage l'oxygène résiduel et de produire de la poudre de tungstène pure. Le débit d'hydrogène est porté à 1 à 1,5 m³/h, ce qui garantit une réduction adéquate. Le temps de réduction est de 6 à 8 heures, la taille des particules de poudre est contrôlée de 1 à 5 microns et la teneur en oxygène est réduite à moins de 0,01 %. La paroi intérieure du four de réduction doit être en acier inoxydable résistant aux hautes températures ou en alliage de molybdène pour éviter la pollution. La poudre réduite a été analysée par MEB et XRD pour confirmer la morphologie des particules et la distribution des terres rares.

Technologie d'optimisation : La réduction du gradient de température (chauffage segmenté) et la réduction de l'hydrogène humide (l'hydrogène contient de la vapeur d'eau à l'état de traces) peuvent affiner les particules et améliorer l'activité de surface. La réduction de l'hydrogène par voie humide favorise la croissance uniforme des grains de poudre de tungstène en contrôlant la teneur en vapeur

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

d'eau (0,1 % à 0,5 %). L'ajout d'additifs traces tels que le carbonate de lithium peut réduire la température de réduction et économiser la consommation d'énergie.

Sécurité et protection de l'environnement : La réduction de l'hydrogène doit être équipée de systèmes de détection des fuites et de ventilation, et les gaz d'échappement sont traités par un dispositif d'absorption des gaz d'échappement pour récupérer l'hydrogène qui n'a pas réagi. La technologie de réduction verte explore les fournaises de chauffage électrique à faible consommation d'énergie pour réduire les émissions de carbone. L'optimisation du processus de réduction garantit que la poudre est de haute qualité, jetant ainsi les bases du façonnage et du frittage ultérieurs.

3.4 Formage et processus de formage

Le processus de formage et de formage presse la poudre de tungstène dopée en une ébauche pour fournir une structure initiale uniforme et dense pour le frittage. La qualité du moulage affecte directement les performances finales de l'électrode, et les méthodes courantes comprennent le pressage isostatique à froid, le moulage et l'hydroformage.

Pressage isostatique à froid : Une pression uniforme (100 à 300 MPa) est appliquée à travers un milieu liquide, et la poudre est chargée dans un moule en caoutchouc flexible avec un temps de formage de 5 à 10 minutes. La densité du corps atteint 60 % à 70 % de la densité théorique, ce qui le rend adapté aux électrodes de grande taille (par exemple, > 10 mm de diamètre). L'équipement doit être équipé d'une pompe haute pression et d'un capteur de pression pour assurer une pression stable.

Moulage : Les moules en acier rigide sont utilisés pour appliquer une pression de 150 à 200 MPa à travers des presses hydrauliques, adaptées à la production de petits lots. Ajoutez de l'alcool polyvinylique de 0,5 % à 1 % ou de la paraffine comme liant pour améliorer la fluidité de la poudre. Après le moulage, le corps doit être pré-fritté à 400 à 600 °C pour éliminer le liant et initialement dense.

Hydroformage : Utilisé pour les électrodes de forme complexe, le mélange de poudre avec le liant dans une boue, l'injection de moule pour le durcissement. L'humidité de la boue est contrôlée à 20 % à 30 %, et elle est séchée à température ambiante pendant 24 heures après le moulage pour éviter la fissuration sous contrainte thermique. Après le démoulage, la précision dimensionnelle du corps doit être vérifiée et l'écart < 0,1 mm.

Optimisation du processus : optimisez la distribution de la pression grâce à la simulation par éléments finis pour réduire les gradients de densité. L'ajout de particules d'oxyde de terres rares à l'échelle nanométrique peut améliorer la force du corps. L'analyse des défauts a montré qu'une pression inégale provoquait des porosités ou des fissures, qui devaient être résolues par des profils à plusieurs étages et une correction de pression. L'équipement de moulage automatisé intègre des systèmes d'inspection par vision pour améliorer la cohérence.

Contrôle de la qualité : Le corps moulé doit être inspecté par ultrasons pour vérifier les défauts

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

internes. Les essais de densité utilisent la méthode d'Archimède pour assurer l'uniformité. Les enregistrements numériques du processus de moulage facilitent la traçabilité et l'optimisation.

3.5 Processus de frittage

Le processus de frittage densifie le corps formé par un traitement à haute température, formant un matériau d'électrode à haute densité et à haute résistance. Le frittage d'électrodes composites en tungstène de terres rares nécessite un équilibre équilibré d'oxydes de terres rares et un contrôle de la taille des grains, et les méthodes courantes comprennent le frittage par pression à chaud sous vide, le frittage par plasma d'étincelle (SPS) et le frittage par fusion verticale.

Frittage à chaud sous vide : Effectué à une pression de 1600 à 1800 °C, 50 à 80 MPa, degré de vide 10^{-3} Pa, contrôle segmenté de la vitesse de chauffage : 10°C/min à 1000°C, 4°C/min à la température cible, maintenu au chaud pendant 60 à 90 minutes. Le four de frittage adopte un corps chauffant en graphite et est équipé d'un thermomètre infrarouge pour assurer une température uniforme. Après frittage, la densité du matériau atteint plus de 99 %, la taille des grains est de 5 à 10 microns et les oxydes de terres rares forment une deuxième phase de diffusion pour améliorer la résistance à haute température.

Frittage par plasma d'étincelle (SPS) : Chauffage rapide (100 à 200 °C/min) à l'aide d'un courant pulsé, frittage à 1400 à 1600 °C, 30 à 50 MPa, et maintien pendant 5 à 10 minutes. Le SPS convient aux nanopoudres, réduit les pertes par évaporation des terres rares et contrôle la taille des grains de 3 à 8 microns. L'équipement doit être équipé d'un système de contrôle du courant de haute précision pour éviter la surchauffe.

Frittage par fusion verticale : utilisant un courant de fusion de 90 %, fritté à l'état partiellement fondu de la matrice de tungstène, adapté aux électrodes de grand diamètre. La température est contrôlée au-dessus de 3000°C, et l'atmosphère est argon ou hydrogène pour éviter l'oxydation. Le frittage vertical peut augmenter la densité, mais un contrôle précis du courant est nécessaire pour éviter la volatilisation des terres rares.

Pré-frittage : Réalisé à 1200 ± 50 °C, sous vide ou sous atmosphère d'hydrogène, en enlevant le liant et préalablement dense, en tenant pendant 2 à 4 heures. La densité du corps pré-fritté atteint 80 % à 85 %, fournissant une structure stable pour le frittage ultérieur à haute température.

Technologie d'optimisation : L'ajout d'additifs tels que le ZrH_2 (0,1 % à 0,5 %) peut réduire la teneur en oxygène, former une phase stable telle que le $La_2Zr_2O_7$ et améliorer les performances d'émission d'électrons. Le chauffage segmenté évite les fissures causées par les gradients de température. Le MEB et le TEM ont analysé la microstructure après frittage pour confirmer la distribution des terres rares et l'état des grains.

Contrôle des défauts : Les défauts courants comprennent les stomates (dus à l'oxygène résiduel), le grossissement des grains (dû à une température excessive) et la séparation des terres rares (due à la volatilisation). En optimisant le degré de vide et le temps de maintien, la porosité est réduite à moins

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

de 0,1 %. Le frittage vert utilise des SPS à faible consommation d'énergie pour réduire les émissions de carbone.

3.6 Technologie de traitement sous pression

Les techniques d'usinage sous pression transforment les ébauches frittées en tiges d'électrode, améliorant ainsi la densité et la qualité de surface, et les méthodes courantes comprennent le forgeage rotatif, l'emboutissage et le redressage.

Forgeage rotatif : Le diamètre de la billette frittée est réduit de 20 mm à 3 à 10 mm par une machine à marteler rotative, et le taux de déformation est de 20 % à 30 % par passe. La température de traitement est de 800 à 1200°C pour maintenir la plasticité de la matrice de tungstène. L'équipement de forgeage rotatif doit être équipé d'un système d'alimentation automatique pour assurer une déformation uniforme. Après plusieurs forgeages rotatifs, la densité du matériau atteint plus de 99,5 % et les grains sont encore affinés.

Dessin : La barre est étirée à l'aide de matrices en carbure pour réduire le diamètre à 0,5 à 10 mm. La vitesse d'arrachement est de 0,5 à 2 m/min, lubrifiée avec une émulsion de graphite, et le coefficient de frottement est de $< 0,1$. La machine de traction de chaîne permet d'obtenir une production continue et d'améliorer l'efficacité. La rugosité de surface de la barre après tréfilage est de $Ra < 0,5$ microns.

Redressage et coupe : Le redressage adopte une machine à redresser les rouleaux pour s'assurer que l'écart de rectitude de la barre est $< 0,1$ mm/m. La découpe se fait à l'aide d'une découpe laser ou mécanique d'une longueur de 150 à 175 mm et d'une tolérance de $\pm 0,5$ mm.

Optimisation et contrôle des défauts : La simulation par éléments finis optimise les paramètres de déformation pour réduire le risque de fissures. La distribution par diffusion des oxydes de terres rares améliore la ténacité du matériau et réduit le taux de rupture. Les défauts courants comprennent les rayures de surface (dus à une lubrification insuffisante) et les fissures internes (dus à des taux de déformation excessifs), qui sont résolues par l'optimisation de la lubrification et la déformation segmentaire.

Automatisation : La ligne de traitement sous pression intègre un système d'inspection en ligne pour surveiller le diamètre et la qualité de surface en temps réel. Le degré d'automatisation augmente le rendement à plus de 98 % et réduit les coûts de main-d'œuvre.

3.7 Technologie de traitement de surface et de revêtement

La technologie de traitement de surface et de revêtement est la dernière étape de l'amélioration de la résistance à la corrosion et des propriétés d'émission d'électrons des électrodes composites en tungstène de terres rares, y compris le polissage, le nettoyage et les revêtements facultatifs.

Polissage : Polissage mécanique (meule ou chiffon de polissage) et polissage électrochimique. Le polissage mécanique utilise des abrasifs à base d'alumine, d'une taille de particules de 2000 mailles

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

et d'une rugosité de surface de $Ra < 0,2$ micron. Le polissage électrochimique est effectué dans une solution mixte d'acide sulfurique-acide phosphorique d'une densité de courant de 0,5 à 1 A/cm² pour éliminer les micro-défauts de surface et améliorer la finition.

Nettoyage : L'huile et les oxydes sont éliminés par nettoyage par ultrasons, la solution de nettoyage est une solution alcaline (pH 8 à 10), une température de 50 à 60 °C, une fréquence ultrasonore de 40 kHz, et un temps de 5 à 10 minutes. Après le nettoyage, rincez à l'eau déminéralisée et séchez à 80°C pour éviter l'humidité résiduelle.

Techniques de revêtement : Des oxydes de terres rares ou des revêtements céramiques tels que les films La₂O₃ ou ZrO₂ peuvent être appliqués en option, grâce au dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ou à la pulvérisation plasma. Le revêtement a une épaisseur de 1 à 5 microns, ce qui améliore la résistance à l'oxydation et l'efficacité de l'émission d'électrons. Le procédé CVD a été réalisé à une température de 800 à 1000°C à basse pression (10⁻² Pa) à un taux de dépôt de 0,1 µm/min.

Optimisé et respectueux de l'environnement : le nettoyage au plasma améliore l'adhérence du revêtement et réduit le temps de prétraitement. La technologie verte utilise des agents de nettoyage à base d'eau pour remplacer les solvants organiques et réduire les émissions de composés organiques volatils (COV). Le taux de récupération des matériaux de revêtement est supérieur à 90 %, ce qui répond aux exigences de l'économie circulaire.

3.8 Contrôle des paramètres clés dans le processus de préparation

Les paramètres clés sont contrôlés tout au long du processus de préparation pour assurer la cohérence de la qualité des électrodes et l'optimisation des performances, impliquant la température, la pression, le vide et le temps.

Étape de réduction : la température de réduction de la première étape est de 500 à 600 °C, celle de la deuxième étape est de 800 à 950 °C et l'écart est de ± 5 °C. Débit d'hydrogène 0,5 à 1,5 m³/h, pureté 99,99 %. La surveillance de la teneur en oxygène utilise un analyseur de gaz pour contrôler en dessous de 0,01 %.

Étape de moulage : pression isostatique à froid 100 à 300 MPa, temps de maintien 5 à 10 minutes, écart de pression < 1 %. Pression de moulage 150 à 200 MPa, la teneur en liant est mesurée avec précision (0,5 % à 1 %).

Étape de frittage : température de frittage à chaud sous vide 1600 à 1800 °C, vitesse de chauffage 4 à 10 °C/min, degré de vide 10⁻³ Pa, conservation de la chaleur pendant 60 à 90 minutes. Les courants SPS sont contrôlés de 1000 à 2000 A et les pressions de 30 à 50 MPa. Les capteurs de température et de pression garantissent des paramètres stables.

Traitement sous pression : température de forgeage rotatif 800 à 1200°C, taux de déformation 20 % à 30 %. Vitesse d'étirage 0,5 à 2 m/min, surveillance du débit de lubrifiant. L'écart de redressement < 0,1 mm/m.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Contrôle de la qualité : Le contrôle statistique des processus (SPC) est utilisé pour collecter des données de paramètres en temps réel et combiner des algorithmes d'IA pour prédire les écarts. Des indicateurs de performance clés tels que la puissance d'échappement des électrons (<2,5 eV) ont été validés expérimentalement. Le système de gestion numérique enregistre les données de l'ensemble du processus pour assurer la traçabilité.

3.9 Optimisation du procédé et analyse des défauts courants

L'optimisation des processus améliore l'efficacité de la production et la qualité des produits, et analyse et améliore les défauts courants tels que les fissures, la porosité et la séparation des terres rares.

Mesures d'optimisation :

Alliage mécanique : Prolongez le temps de broyage des billes à 12 heures, affinez les particules à 0,1 micron et améliorez l'activité de frittage.

Frittage SPS : raccourcit le temps de maintien à 5 minutes, réduit la volatilisation des terres rares et contrôle la taille des grains de 3 à 5 microns.

Des additifs sont ajoutés : 0,1 % à 0,5 % de ZrH₂ réduit la teneur en oxygène, forme une phase stable et améliore les performances d'émission d'électrons.

Contrôle automatisé : Capteurs intégrés et paramètres d'optimisation de l'IA, le rendement est augmenté à plus de 95 %.

Analyse des défauts :

Fissures : En raison d'une pression de formage inégale ou d'un grand gradient de température de frittage, il est résolu par formage en plusieurs étapes et chauffage segmenté.

Porosité : En raison d'un manque d'oxygène résiduel ou d'un vide de frittage, le degré de vide a été optimisé à 10⁻³ Pa et la porosité a été réduite à 0,1 %.

Séparation des terres rares : Volatilisation à haute température, atténuée par la réduction de la température de frittage et l'ajout de stabilisants (tels que le ZrO₂).

Méthode de vérification : La simulation par éléments finis prédit la distribution des défauts, et la détection MEB et par ultrasons vérifie l'effet d'optimisation. Après optimisation, la durée de vie de l'électrode est prolongée de 20 % et la constance des performances est améliorée de 10 %.

3.10 Technologie de préparation verte

La technologie de préparation verte se concentre sur la protection de l'environnement et la durabilité, remplaçant les électrodes radioactives en thorium-tungstène et réduisant l'impact environnemental.

Récupération des matières premières : Extraire les matières premières des déchets d'électrodes de tungstène et des déchets de terres rares, avec un taux de récupération de plus de 80 %, réduisant ainsi l'exploitation minière. Réduction propre : à l'aide de fours électriques alimentés par des énergies renouvelables, l'hydrogène est recyclé et les gaz d'échappement sont traités par combustion catalytique. Frittage à faible consommation d'énergie : le frittage SPS réduit la consommation d'énergie de 30 % et les émissions de carbone de 20 % par rapport au pressage à chaud traditionnel.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Nettoyage écologique : Les agents de nettoyage à base d'eau remplacent les solvants organiques, réduisant ainsi les émissions de COV de 90 %. Les déchets liquides récupèrent les terres rares par échange d'ions. Élimination des déchets : Les électrodes usagées sont récupérées à partir du tungstène et des terres rares par fusion à haute température, avec un taux de recyclage de 85 %.

Les technologies vertes sont conformes aux réglementations REACH et RoHS, ce qui renforce la compétitivité du marché et favorise le développement durable.

3.11 Organigramme du processus de production à grande échelle

L'organigramme du processus de production à grande échelle est le suivant :

Préparation des matières premières : Peser le trioxyde de tungstène et le nitrate de terres rares, préparer une solution (pH 5,5 à 6,5).

Mélange et séchage : dopage par atomisation, séchage à 80 à 120°C, criblage 200 mesh.

Réduction : Deux étapes de réduction de l'hydrogène (500 à 600 °C, 800 à 950 °C), la teneur en oxygène < 0,01 %.

Moulage : pressage isostatique à froid (100 à 300 MPa) ou moulage, densité de 60 % à 70 % du corps.

Pré-frittage : 1200°C, retirer le liant.

Frittage : Pressage à chaud sous vide (1600 à 1800 °C, 60 MPa) ou SPS (1400 à 1600 °C).

Usinage sous pression : forgeage rotatif (diamètre 3 à 10 mm), emboutissage (0,5 à 10 mm), redressage.

Traitement de surface : polissage mécanique/électrochimique ($R_a < 0,2$ micron), nettoyage par ultrasons.

Contrôle qualité : MEB, DRX, test de performance (puissance d'échappement électronique < 2,5 eV).

Emballage et stockage : emballage étanche à l'humidité avec une température de stockage de 10 à 25°C.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale



Chapitre 4 Caractéristiques physiques, chimiques et de soudage des électrodes composites de tungstène de terres rares

4.1 Propriétés mécaniques des électrodes composites en tungstène de terres rares

Les propriétés mécaniques des électrodes composites en tungstène de terres rares sont essentielles à leur application dans des environnements industriels exigeants, notamment la dureté, la résistance, la ténacité et la résistance à l'usure. Ces propriétés sont influencées par l'ajout de matrice de tungstène et d'oxydes de terres rares, et sont nettement meilleures que les électrodes en tungstène pur.

Dureté : La dureté Vickers (HV) de la matrice de tungstène est comprise entre 400 et 450, et l'ajout d'oxydes de terres rares (par exemple, l'oxyde de lanthane, l'oxyde de cérium) améliore encore la dureté par le raffinement des grains, généralement jusqu'à 450 à 500 HV. L'augmentation de la dureté est due au renforcement par diffusion des particules d'oxyde de terres rares, qui forment des points de clou à la limite de grain de tungstène pour inhiber le glissement de la limite de grain. Par exemple, les électrodes contenant 2 % d'oxyde de lanthane ont une dureté supérieure d'environ 15 % à celle du tungstène pur, ce qui les rend adaptées au soudage à haute charge.

Résistance : La résistance à la traction des électrodes composites en tungstène de terres rares est de 800 à 1000 MPa à température ambiante et de 400 à 600 MPa à haute température (1500°C). Les

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

oxydes de terres rares améliorent la résistance de la matrice en formant des secondes phases stables telles que les particules La_2O_3 ou CeO_2 . L'ajout d'oxyde d'yttrium est particulièrement important, car les électrodes contenant 2 % de Y_2O_3 ont une résistance à la traction 20 % plus élevée à haute température que le tungstène pur, ce qui les rend adaptées au soudage de composants aérospatiaux.

Ténacité : Les électrodes en tungstène pur ont une grande fragilité en raison de leurs gros grains, et leur résistance à la rupture (K_{1c}) est d'environ $6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. L'ajout d'oxydes de terres rares affine les grains à 5 à 10 microns et améliore la résistance à la rupture à 8 à $10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. L'effet synergique de l'oxyde de cérium et de l'oxyde de lanthane améliore la ténacité en réduisant les défauts de limite de grain, réduisant ainsi le risque de fracture à l'extrémité de l'électrode pendant le soudage.

Résistance à l'usure : La résistance à l'usure des électrodes composites en tungstène de terres rares est considérablement améliorée par la dispersion et le renforcement des oxydes de terres rares. Dans le soudage à courant élevé, la pointe de l'électrode s'use en raison de la température élevée de l'arc, et l'électrode contenant de la zirconie réduit le taux d'usure de 30 % en formant une couche d'oxyde protectrice. Les tests de résistance à l'abrasion montrent que le volume d'usure des électrodes composites est inférieur d'environ 40 % à celui des électrodes en tungstène pur, ce qui prolonge la durée de vie.

Méthode d'essai : Les propriétés mécaniques sont déterminées par l'appareil d'essai de dureté Vickers, l'appareil d'essai de traction universel et l'appareil d'essai de choc. Les tests de performance à haute température sont effectués sous vide ou sous atmosphère inerte, simulant l'environnement de soudage. Une analyse microscopique a été réalisée par microscopie électronique à balayage (MEB) pour observer la morphologie des fractures et confirmer le mécanisme de renforcement des particules de terres rares.

L'optimisation des propriétés mécaniques permet aux électrodes composites en tungstène de terres rares de bien fonctionner dans le soudage à haute résistance et à long terme, particulièrement adaptées aux applications exigeantes telles que les équipements nucléaires et la fabrication de moteurs d'avion.

4.2 Propriétés thermiques des électrodes composites en tungstène de terres rares

Les propriétés thermiques déterminent la stabilité et la durabilité des électrodes composites en tungstène de terres rares dans des environnements d'arc à haute température, y compris le point de fusion, la conductivité thermique et le coefficient de dilatation thermique.

Point de fusion : Le point de fusion de la matrice de tungstène est de 3410°C , ce qui est la base de la stabilité à haute température de l'électrode composite. L'ajout d'oxydes de terres rares (tels que La_2O_3 , CeO_2) a peu d'effet sur le point de fusion, mais la résistance à la déformation à haute température est renforcée par l'amélioration de la microstructure. L'électrode contenant 2 % d'oxyde d'yttrium reste structurellement intacte au-dessus de 3000°C , ce qui la rend adaptée à la découpe plasma et à la fusion à haute température.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Conductivité thermique : La conductivité thermique du tungstène est d'environ 174 W/(m·K) (température ambiante), qui diminue légèrement à des températures élevées. L'ajout d'oxydes de terres rares augmente la conductivité thermique de 5 à 10 % en affinant les grains et en réduisant la résistance à la dissipation thermique aux joints de grains. Par exemple, la conductivité thermique des électrodes contenant de l'oxyde de cérium est de 180 à 190 W/(m·K) à 1000°C, ce qui contribue à une dissipation rapide de la chaleur et réduit l'épuisement de la pointe.

Coefficient de dilatation thermique : Le coefficient de dilatation thermique du tungstène est de $4,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, et sa faible dilatation thermique réduit le stress thermique à haute température. L'ajout d'oxydes de terres rares augmente légèrement le coefficient de dilatation thermique (jusqu'à 4,8 à $5,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), mais la contrainte thermique peut être contrôlée en optimisant le rapport (par exemple, la combinaison de zircon et d'oxyde de lanthane) pour assurer la stabilité de l'électrode pendant le cycle thermique.

Performance aux chocs thermiques : L'électrode composite de tungstène de terres rares est renforcée par la diffusion d'oxydes de terres rares, et la résistance aux chocs thermiques est considérablement améliorée. L'électrode contenant de la zircon reste exempte de fissures dans des conditions de montée en température rapide ($>1000^{\circ}\text{C}/\text{min}$), ce qui la rend adaptée au soudage à haute fréquence. L'essai de choc thermique adopte la méthode de cyclage rapide à froid et à chaleur rapide, et le nombre de cycles de l'électrode composite est 50 % plus élevé que celui du tungstène pur.

Méthode d'essai : La conductivité thermique est déterminée par la méthode du flash laser et le coefficient de dilatation thermique est testé dans la plage de 25 à 2000 °C à l'aide d'un exoplameur. Les performances de choc thermique sont évaluées par un test de simulation d'arc et le temps d'apparition de la fissure est enregistré. L'optimisation des propriétés thermiques permet à l'électrode composite de bien fonctionner dans des environnements à haute température et à forte charge thermique.

4.3 Propriétés électriques des électrodes composites en tungstène de terres rares

Les propriétés électriques sont les principaux avantages des électrodes composites en tungstène de terres rares, qui déterminent leurs performances d'initiation d'arc et leur stabilité en soudage, notamment le travail d'échappement d'électrons, la conductivité et les caractéristiques de l'arc.

Travail d'échappement d'électrons : Le travail d'échappement d'électrons des électrodes de tungstène pur est de 4,5 eV, ce qui entraîne l'initiation de l'arc. L'ajout d'oxydes de terres rares a considérablement réduit le travail d'évasion, par exemple, le travail d'échappement de l'électrode contenant 2 % d'oxyde de cérium a été réduit à 2,2 à 2,5 eV, et la combinaison d'oxyde de lanthane et d'oxyde d'yttrium a été optimisée à moins de 2,0 eV. Une faible puissance d'échappement permet à l'électrode de s'amorcer rapidement à basse tension, ce qui réduit la consommation d'énergie.

Conductivité : La conductivité du tungstène est de $1,82 \times 10^7$ S/m (température ambiante), et l'ajout d'oxydes de terres rares améliore légèrement la conductivité en réduisant la résistance aux joints de grains. L'électrode contenant de l'oxyde de lanthane augmente la conductivité de 5 % à 1000°C,

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

assurant une efficacité de transfert de courant élevée. Le test de conductivité utilise la méthode des quatre sondes pour confirmer l'optimisation de la distribution du courant par la distribution uniforme des particules de terres rares.

Caractéristiques de l'arc : La stabilité de l'arc des électrodes composites en tungstène de terres rares est aussi élevée que plus de 95 %, ce qui est mieux que 80 % du tungstène pur. Les oxydes de terres rares forment un point d'émission de travail d'échappement faible à la surface de l'électrode, améliorant l'efficacité de l'émission d'électrons et rendant l'arc concentré et stable. L'électrode contenant de l'oxyde de cérium et de l'oxyde de lanthane réduit la dérive de l'arc de 30 % dans le soudage AC, ce qui la rend adaptée au soudage des alliages d'aluminium. Les essais à l'arc vérifient la stabilité grâce à la photographie à grande vitesse et à l'analyse des fluctuations de courant.

Mécanisme d'optimisation : Les oxydes de terres rares migrent vers la surface de l'électrode à haute température, formant une couche d'émission active et réduisant la tension de démarrage de l'arc (de 50 V à 30 V pour le tungstène pur). Les composites multivariés (par exemple, WLaCeY) améliorent la durée de vie de l'arc en équilibrant de manière synergique l'émission d'électrons et la stabilité thermique.

Méthode d'essai : Le travail d'échappement d'électrons est déterminé par spectroscopie de photoélectrons ultraviolets (UPS), et la conductivité est mesurée à l'aide d'une résistivité de haute précision. Les caractéristiques de l'arc sont testées dans un environnement de soudage TIG simulé, en enregistrant l'heure de début de l'arc et la durée de l'arc. La supériorité des propriétés électriques rend les électrodes composites irremplaçables dans le soudage de précision.

4.4 Stabilité chimique et résistance à la corrosion des électrodes composites en tungstène de terres rares

La stabilité chimique et la résistance à la corrosion déterminent la durabilité des électrodes composites en tungstène de terres rares dans des environnements complexes, en particulier dans des atmosphères gazeuses à haute température, oxydantes ou corrosives.

Stabilité chimique : La matrice de tungstène a une excellente stabilité aux acides, aux alcalis et à l'eau à température ambiante, et n'est pas sujette aux réactions chimiques. L'ajout d'oxydes de terres rares améliore encore la stabilité chimique à haute température. Par exemple, la zircone et l'oxyde d'yttrium forment une couche protectrice à la surface de l'électrode, inhibant la réaction du tungstène avec l'oxygène ou l'azote. Le taux d'oxydation de l'électrode contenant 2 % de zircone a été réduit de 40 % à 2000°C et sous atmosphère oxygénée.

Résistance à la corrosion : Les électrodes composites en tungstène de terres rares excellent dans les gaz corrosifs, tels que l'argon, contenant des traces de vapeur d'eau. L'ajout d'oxyde de lanthane et d'oxyde de cérium réduit l'accumulation d'oxyde à la surface de l'électrode et augmente la capacité anti-contamination de 50 %. Dans un environnement très humide, le taux de corrosion de l'électrode contenant de la zircone n'est que de 1/3 de celui du tungstène pur, ce qui prolonge la durée de vie.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Résistance à la contamination : Pendant le soudage, les électrodes peuvent être contaminées par des éclaboussures de bain de fusion ou des impuretés gazeuses. Les oxydes de terres rares réduisent l'adsorption des impuretés et maintiennent la stabilité de l'arc en formant une couche de surface stable. Le test a montré que la stabilité de l'arc de l'électrode contenant de l'oxyde de cérium était maintenue de plus de 90 % dans un environnement pollué.

Méthode d'essai : La stabilité chimique a été évaluée par une expérience d'oxydation à haute température (1500 à 2000°C, pression partielle d'oxygène 10^{-2} Pa), et le taux de perte de masse a été enregistré. La résistance à la corrosion utilise un test au brouillard salin et un test de corrosion électrochimique pour mesurer la densité du courant de corrosion. En simulant l'environnement de soudage, la morphologie de surface de l'électrode est observée.

L'amélioration de la stabilité chimique et de la résistance à la corrosion rend l'électrode composite adaptée aux conditions de travail complexes, telles que l'ingénierie maritime et le soudage d'équipements chimiques.

4.5 Caractéristiques de soudage des électrodes composites en tungstène de terres rares

Les caractéristiques de soudage sont les principaux indicateurs d'application des électrodes composites en tungstène de terres rares, notamment les performances d'initiation de l'arc, la durée de vie de combustion de l'arc, le contrôle de la profondeur de pénétration et la qualité de la soudure.

Performances d'amorçage d'arc : Les oxydes de terres rares réduisent le travail d'échappement d'électrons, réduisant la tension d'arc de 50 V à 25 à 30 V de tungstène pur et raccourcissant le temps de démarrage de l'arc à moins de 0,1 seconde. Les électrodes contenant de l'oxyde de cérium fonctionnent bien à de faibles courants (<50 A) pour le soudage de précision ; Les électrodes contenant de l'oxyde de lanthane ont une plus grande stabilité de l'arc dans le soudage AC.

Durée de vie de l'arc : La durée de vie de l'arc des électrodes composites atteint 500 à 1000 heures, ce qui est 2 à 3 fois plus long que celui des électrodes en tungstène pur (200 à 300 heures). Le faible taux d'évaporation et la résistance à l'épuisement des oxydes de terres rares réduisent les pertes de pointe, et l'électrode contenant de l'oxyde d'yttrium prolonge sa durée de vie de 30 % à des courants élevés (>200 A).

Contrôle de la profondeur de pénétration : La concentration de l'arc de l'électrode composite est élevée et l'uniformité de la profondeur de pénétration est augmentée de 20 %. Les électrodes contenant de l'oxyde de lanthane et de l'oxyde de cérium peuvent être contrôlées avec précision de 0,5 à 5 mm en soudage TIG, ce qui les rend adaptées au soudage de plaques minces et épaisses. La forme de l'arc est analysée par la photographie à grande vitesse pour confirmer sa stabilité.

Qualité de la soudure : L'électrode composite réduit la dérive de l'arc et les projections, la surface de soudure est lisse et la porosité est réduite de 50 %. Les électrodes avec WLaCeY augmentent la résistance à la traction de la soudure de 10 % dans le soudage en alliage d'aluminium, répondant ainsi aux exigences aérospatiales.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Méthode d'essai : Les caractéristiques de soudage sont testées par le banc d'essai de soudage TIG, et la tension de démarrage de l'arc, le temps d'allumage de l'arc et la distribution de la profondeur de pénétration sont enregistrés. La qualité de la soudure est confirmée par des contrôles non destructifs aux rayons X et une analyse métallographique pour confirmer le taux de défauts. La supériorité des caractéristiques de soudage a favorisé l'application large des électrodes composites dans des domaines de haute précision.

4.6 Effets de l'ajout de terres rares sur la microstructure

L'ajout d'oxydes de terres rares a considérablement modifié la microstructure de l'électrode composite de tungstène de terres rares et a affecté ses performances. Les effets sont analysés à partir de la structure du grain, de la distribution de phase et du contrôle des défauts.

Raffinement des grains : La taille des grains des électrodes en tungstène pur est de 20 à 50 microns, ce qui est facile à grossir à haute température. Les oxydes de terres rares (par exemple, La_2O_3 , CeO_2) inhibent la croissance des grains par l'effet d'épinglage, réduisant la taille des grains à 5 à 10 microns. L'analyse MEB a montré que l'uniformité du grain de l'électrode contenant 2 % d'oxyde d'yttrium a été augmentée de 30 %, ce qui a amélioré la ténacité et la résistance à la fatigue.

Distribution de phase : Les oxydes de terres rares forment des particules diffuses de seconde phase dans une matrice de tungstène, dont la taille varie de 50 à 200 nm. Ces particules sont uniformément réparties dans les joints de grains et les grains, ce qui améliore la résistance de la matrice. La zircone et l'oxyde de lanthane se combinent pour former une phase composite (telle que $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$) pour améliorer la stabilité à haute température. L'analyse XRD confirme la stabilité et la distribution des phases des terres rares.

Contrôle des défauts : Les oxydes de terres rares réduisent les défauts des joints de grains (tels que l'inoculation, la dislocation) et réduisent le taux de fluage à haute température. La densité des défauts de l'électrode contenant de l'oxyde de cérium a été réduite de 40 %, ce qui a été vérifié par l'observation TEM. L'ajout de terres rares inhibe également la propagation des microfissures et améliore la résistance à la rupture.

Analyse du mécanisme : Les oxydes de terres rares migrent vers les joints de grains pendant le frittage, formant des pointes de clous et inhibant le glissement et la croissance des grains. À des températures de soudage élevées, les particules de terres rares migrent vers la surface, formant une couche active émettrice d'électrons et réduisant les travaux d'évasion. L'optimisation de la microstructure améliore considérablement les performances globales de l'électrode.

4.7 Comparaison des performances de l'électrode de tungstène

Il existe des différences significatives de performances entre les électrodes composites en tungstène de terres rares et les électrodes en tungstène pur et les électrodes en tungstène thorium, et les comparaisons suivantes sont faites à bien des égards :

Performances d'émission d'électrons : Les électrodes composites en tungstène de terres rares (travail d'échappement de 2,0 à 2,5 eV) sont meilleures que le tungstène pur (4,5 eV) et le tungstène thorium (2,6 à 2,8 eV), et la tension de l'arc est inférieure de 20 à 30 V, ce qui les rend adaptées au soudage

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

de précision.

Stabilité de l'arc : la stabilité de l'électrode composite est de > 95 %, celle du tungstène pur est de 80 % et celle du tungstène thorium est de 90 %. L'électrode contenant de l'oxyde de lanthane avait le taux de dérive le plus bas dans le soudage AC.

Durée de vie : 500 à 1000 heures de combustion à l'arc de l'électrode composite, 200 à 300 heures de tungstène pur, 300 à 500 heures de tungstène thorium. L'ajout de terres rares prolonge la durée de vie de 2 à 3 fois.

Propriétés mécaniques : Dureté de l'électrode composite 450 à 500 HV, résistance à la traction 800 à 1000 MPa, supérieure à celle du tungstène pur (400 HV, 700 MPa) et du tungstène thorium (420 HV, 750 MPa).

Protection de l'environnement : l'électrode composite est non radioactive et conforme à la réglementation REACH ; Le tungstène thorium contient du thorium radioactif et nécessite un traitement spécial ; Le tungstène pur est non radioactif mais a de mauvaises performances.

Champ d'application : L'électrode composite convient au soudage TIG, au soudage plasma, à la découpe et aux batteries à énergie nouvelle ; Le tungstène thorium est réduit en raison des restrictions de protection de l'environnement ; Le tungstène pur est limité aux scénarios de faible demande.

Les électrodes composites sont largement supérieures aux électrodes traditionnelles, devenant le premier choix pour la fabrication écologique et les applications haut de gamme.

4.8 Adaptabilité environnementale des électrodes composites en tungstène de terres rares

L'adaptabilité environnementale des électrodes composites en tungstène de terres rares se reflète dans leurs performances stables à des températures élevées, à une humidité élevée et dans des environnements corrosifs.

Environnement à haute température : L'électrode contenant de l'oxyde d'yttrium et de la zircone maintient son intégrité structurelle au-dessus de 3000 °C et sa résistance à l'oxydation est augmentée de 40 %, ce qui la rend adaptée à la découpe plasma et à la fusion à haute température.

Environnement à forte humidité : Dans un environnement avec 90 % d'humidité relative, le taux de corrosion de l'électrode contenant de l'oxyde de cérium n'est que de 1/3 de celui du tungstène pur, et la stabilité de l'arc est maintenue à plus de 90 %.

Gaz corrosifs : Dans les atmosphères contenant du soufre ou du chlore, la couche protectrice en zircone réduit les réactions de surface des électrodes et réduit le taux de corrosion de 50 %. La résistance à la contamination est vérifiée par des tests d'éclaboussures simulés.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Méthode d'essai : L'adaptabilité à haute température est évaluée par un essai de cyclage thermique (25 à 2000 °C, 100 cycles). Les tests d'humidité élevée et de corrosivité utilisent des chambres environnementales qui enregistrent les pertes de qualité et les changements de performances. L'adaptabilité environnementale des électrodes composites les rend adaptées aux applications d'ingénierie marine et de chimie.

4.9 Analyse des caractéristiques de fatigue et de durée de vie des électrodes composites en tungstène de terres rares

Les caractéristiques de fatigue et de durée de vie sont les indicateurs clés pour évaluer la durabilité des électrodes composites en tungstène de terres rares, impliquant la fatigue à haute température, la fatigue du cycle thermique et la durée de vie de l'arc.

Fatigue à haute température : L'électrode composite est soumise à des contraintes cycliques de 1500 à 2000 °C, et la durée de vie en fatigue atteint 10^4 à 10^5 fois, ce qui est mieux que les 10^3 fois du tungstène pur. Les oxydes de terres rares affinent les grains et réduisent la propagation des fissures de fatigue.

Fatigue des cycles thermiques : L'électrode en zirconium peut être cyclée jusqu'à 500 fois sans fissures lors de l'augmentation et de la descente rapides de la température (1000°C/min). La contrainte thermique a été optimisée par une analyse de simulation par éléments finis afin d'optimiser le rapport entre les terres rares.

Durée de vie de l'arc : La durée de vie de l'arc de l'électrode composite est de 500 à 1000 heures en soudage 200 A DC, et la durée de vie de l'électrode contenant WLaCeY est prolongée de 20 % en soudage AC. Test de durée de vie Grâce à des expériences de soudage en continu, le taux d'usure de la pointe est enregistré.

Méthode d'analyse : La résistance à la fatigue est évaluée par l'essai de cycle de traction à haute température et la durée de vie est évaluée par l'essai de combustion à l'arc. L'analyse MEB et l'analyse des ruptures confirment le mécanisme de défaillance par fatigue. La longue durée de vie des électrodes composites réduit les coûts de maintenance et améliore l'efficacité industrielle.

4.10 Électrode composite en tungstène de terres rares Fiche signalétique de CTIA GROUP LTD

Fiche de données de sécurité (FDS) de CTIA GROUP LTD - Électrode composite de tungstène à base de terres rares

Partie 1 : Nom du produit

Nom chinois : Électrode composite de tungstène de terres rares (WLaCeY, WL, WC, etc.)

Partie 2 : Informations sur la composition/la composition

Tungstène (>95 %), oxyde de lanthane (0,5 % à 2 %), oxyde de cérium (0,5 % à 2 %), oxyde d'yttrium (0,5 % à 2 %), zirconium (0 à 1 %)

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Partie 3 : Vue d'ensemble du danger

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

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

Partie 4 : Mesures de premiers secours

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

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

Traitement médical.

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

Traitement médical.

Manger : Buvez suffisamment d'eau tiède pour provoquer des vomissements. Traitement médical.

Partie 5 : Mesures de protection contre l'incendie

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

Méthodes d'extinction d'incendie : Les pompiers doivent porter des masques à gaz et des combinaisons intégrales de lutte contre les incendies pour éteindre le feu dans le sens du vent. Agent extincteur : poudre de cuir sèche, sable.

Partie 6 : Traitement d'urgence des fuites

Traitement d'urgence : isoler la zone de pollution qui fuit et en restreindre l'accès. Coupez la source de feu. Il est recommandé au personnel d'intervention d'urgence de porter des masques anti-poussière (masques faciaux) et des vêtements antigaz. Évitez la poussière, balayez-le soigneusement et transférez-le dans un endroit sûr dans un sac. S'il y a une grande quantité de fuites, couvrez-la d'une bâche en plastique ou d'une toile. Collecter et recycler ou transporter vers des sites de traitement des déchets pour élimination.

Partie 7 : Fonctionnement, élimination et stockage

Précautions d'utilisation : Les opérateurs doivent suivre une formation spéciale et respecter strictement les procédures d'utilisation. Il est recommandé aux opérateurs de porter des masques anti-poussière à filtre auto-amorçant, des lunettes de protection chimique, des vêtements de travail anti-pénétration toxiques et des gants en caoutchouc. Loin des incendies et des sources de chaleur, il est strictement interdit de fumer sur le lieu de travail. Utilisez des systèmes et des équipements de ventilation antidéflagrants. Évitez la poussière. Évitez tout contact avec des oxydants et des halogènes. Lors de la manipulation, il doit être chargé et déchargé légèrement pour éviter d'endommager l'emballage et les conteneurs. Équipé des variétés et des quantités correspondantes d'équipements de lutte contre l'incendie et d'équipements de traitement d'urgence en cas de fuite. Les récipients vides peuvent laisser des substances nocives derrière eux.

Précautions de stockage : Stocker dans un entrepôt frais et ventilé. Éloignez-vous du feu et des sources de chaleur. Il doit être stocké séparément des oxydants et des halogènes, et ne doit pas être mélangé. Equipé des variétés et des quantités correspondantes d'équipements de lutte contre l'incendie. L'aire d'entreposage doit être équipée de matériaux appropriés pour contenir le déversement.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Partie 8 : Contrôle de contact/Protection personnelle

CMA Chine (mg/m³) : 6

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

TLVTN : ACGIH 1 mg/m³

TLVWN : ACGIH 3mg/m³

Méthode de surveillance : Spectroluminométrie thiocyanure de potassium-chlorure de titane

Contrôle technique : processus de production sans poussière et ventilation complète.

Protection de l'appareil respiratoire : Lorsque la concentration de poussières dans l'air dépasse la norme, un masque anti-poussière à filtre auto-amorçant doit être porté. Lors d'une évacuation d'urgence, vous devez porter un respirateur à air.

Protection oculaire : Portez des lunettes de sécurité chimique.

Protection corporelle : porter des vêtements de travail anti-pénétration anti-poison.

Protection des mains : porter des gants en caoutchouc.

Partie 9 : Propriétés physiques et chimiques

Ingrédients principaux : produit pur

Aspect et propriétés : solide, blanc brillant métallisé

Point de fusion (°C) : N/A

Boiling point (°C): N/A

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

Densité de vapeur (air = 1) : Aucune donnée

Pression de vapeur saturée (kPa) : Aucune donnée

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

Température critique (°C) : Aucune donnée

Pression critique (MPa) : Aucune donnée

Valeur logarithmique du coefficient de distribution d'eau : Aucune donnée

Point d'éclair (°C) : Pas de données

Température d'inflammation (°C) : Aucune donnée

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

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

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

Utilisation principale : utilisé pour fabriquer des pièces de blindage, des tiges de fléchettes en alliage de tungstène, des billes en alliage de tungstène, etc.

Partie 10 : Stabilité et réactivité

Ingrédients interdits : acides forts et alcalis.

Partie 11 :

Toxicité aiguë : pas de données

CL50 : Aucune donnée

Partie 12 : Données écologiques

Il n'y a pas de données sur cette partie

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Partie 13 : Élimination des déchets

Méthode d'élimination des déchets : Reportez-vous aux réglementations nationales et locales pertinentes avant l'élimination. Si possible, recyclez.

Partie 14 : Informations d'expédition

Numéro de marchandises dangereuses : Aucune information

Catégorie d'emballage : Z01

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

Partie 15 : Renseignements réglementaires

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

Partie 16 : Renseignements sur le fournisseur

Fournisseur : CTIA GROUP LTD

Téléphone : 0592-5129696/5129595

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale



Chapitre 5 : Lignes directrices d'utilisation et d'application des électrodes composites en tungstène de terres rares

5.1 Vue d'ensemble des principales utilisations des électrodes composites en tungstène de terres rares

Les électrodes composites en tungstène de terres rares ont un large éventail d'applications dans de multiples domaines industriels en raison de leurs excellentes capacités d'émission d'électrons, de leur stabilité d'arc et de leurs propriétés non radioactives. Ses principales utilisations couvrent le soudage, la découpe, la pulvérisation thermique, les sources de lumière électrique et les domaines électrochimiques et énergétiques émergents. Voici une explication détaillée des principaux scénarios d'application :

Soudage : Les électrodes composites en tungstène de terres rares sont les matériaux de base pour le soudage sous gaz inerte (soudage TIG), le soudage au plasma et d'autres processus. Son faible échappement d'électrons et sa grande stabilité à l'arc le rendent adapté au soudage de haute précision, tel que le soudage de plaques minces dans les composants aérospatiaux, les équipements nucléaires et la construction automobile. Les électrodes contenant de l'oxyde de lanthane et de l'oxyde de cérium fonctionnent bien dans le soudage AC et DC avec une qualité de soudage élevée et une faible porosité.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Découpe : Dans la découpe plasma, les électrodes composites en tungstène de terres rares sont largement utilisées en raison de leur résistance aux températures élevées et à l'épuisement. Les électrodes contenant de l'oxyde d'yttrium et de la zircone restent stables sous des arcs plasma à haute température, ce qui les rend adaptées à la découpe de l'acier inoxydable, des alliages d'aluminium et des superalliages, et sont largement utilisées dans la construction navale et les machines lourdes.

Projection thermique : Les électrodes composites sont utilisées dans les processus de pulvérisation plasma pour pulvériser des revêtements résistants à l'usure ou à la corrosion à la surface des composants mécaniques. Son point de fusion élevé et sa résistance à l'oxydation assurent la stabilité lors de la pulvérisation et sont utilisés dans les pales de moteurs d'avion, les équipements de forage pétrolier, etc.

Source de lumière électrique : Dans le domaine des sources lumineuses électriques, les électrodes composites en tungstène de terres rares sont utilisées comme cathodes ou filaments pour les lampes à décharge de gaz à haute intensité (telles que les lampes au xénon et les lampes au mercure). Ses excellentes propriétés d'émission d'électrons prolongent la durée de vie des lampes et améliorent l'efficacité lumineuse, et sont largement utilisées dans les équipements de projection et l'éclairage médical.

Nouvelles énergies et électrochimie : Les électrodes composites en tungstène de terres rares sont utilisées comme matériaux d'électrode ou revêtements conducteurs dans les batteries lithium-ion, les piles à combustible et les électrolyseurs, améliorant ainsi la densité énergétique et la durée de vie. De plus, ses applications dans le domaine de l'électrocatalyse (comme la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau) émergent, et l'activité catalytique des oxydes de terres rares améliore l'efficacité de la réaction.

Les diverses utilisations des électrodes composites en tungstène de terres rares bénéficient de leurs ratios de terres rares personnalisables et de leurs microstructures optimisées, ce qui leur permet de répondre aux besoins de performance de différentes industries. L'analyse du marché mondial montre que sa consommation annuelle a dépassé 1 600 tonnes et devrait continuer à croître au cours des cinq prochaines années, en particulier dans les domaines de la fabrication verte et de la haute technologie.

5.2 Types de soudage applicables aux électrodes composites en tungstène de terres rares

Les électrodes composites en tungstène de terres rares conviennent à une variété de types de soudage, et leurs avantages en termes de performances sont exceptionnels dans différents processus. Voici les principaux types et caractéristiques du soudage :

Soudage sous gaz inerte au tungstène (soudage TIG/GTAW) : Le soudage TIG est le domaine le plus largement utilisé des électrodes composites en tungstène à base de terres rares. Les électrodes contenant de l'oxyde de cérium, telles que le WC20, présentent d'excellentes propriétés d'arc dans le soudage à polarité positive DC (DCSP), ce qui les rend adaptées à l'acier inoxydable, à l'acier au carbone et aux alliages de nickel. Les électrodes contenant de l'oxyde de lanthane, telles que le

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

WL20, ont une grande stabilité d'arc dans le soudage à courant alternatif (AC) et conviennent aux alliages d'aluminium et de magnésium, réduisant la dérive de l'arc et les soudures lisses.

Soudage au plasma (PAW) : Le soudage au plasma nécessite que l'électrode reste stable à des températures et des courants élevés. Les électrodes composites contenant de l'oxyde d'yttrium et de la zircone, telles que WLaCeY, conviennent au soudage plasma de haute précision, comme celles des structures à paroi mince dans l'aérospatiale, en raison de leur résistance à l'épuisement et de leur longue durée de vie. La pointe de l'électrode a un faible taux d'usure sous l'arc plasma à haute température et une durée de vie de 500 à 800 heures.

Soudage sous gaz inerte métallique (soudage MIG) assisté : Dans le soudage MIG, les électrodes composites en tungstène de terres rares sont parfois utilisées comme électrodes auxiliaires pour le soudage à l'arc stabilisateur ou de matériaux spéciaux. Son efficacité d'émission d'électrons élevée réduit la tension de démarrage de l'arc, ce qui le rend adapté aux lignes de production automatisées. Assistance au soudage par points par résistance : Dans certains procédés de soudage par points de haute précision, l'électrode composite sert de tête d'électrode, assurant une transmission de courant stable et réduisant les projections, ce qui la rend adaptée à la fabrication de composants électroniques.

Procédés de soudage spéciaux : tels que le soudage plasma à microfaisceaux et le soudage composite laser-TIG, l'électrode composite améliore la qualité de la soudure en optimisant la concentration de l'arc. Les électrodes contenant de l'oxyde de lanthane et de l'oxyde de cérium ont des tensions d'arc aussi basses que 25 V en micro-soudage et conviennent au soudage de plaques minces (< 0,5 mm).

Les électrodes composites en tungstène de terres rares répondent à divers besoins en ajustant le rapport de terres rares (par exemple, oxyde de cérium : oxyde de lanthane = 1:1). Les expériences montrent que la stabilité de l'arc dans le soudage TIG est supérieure à 95 % et que la précision du contrôle de la profondeur de pénétration est augmentée de 20 %, ce qui est nettement meilleur que celui de l'électrode de tungstène pur.

5.3 Cas d'application industrielle des électrodes composites en tungstène de terres rares

Les électrodes composites en tungstène de terres rares ont démontré une valeur d'application significative dans de multiples industries, y compris les cas spécifiques suivants :

Aérospatiale : Dans la construction aéronautique, les électrodes contenant de l'oxyde de lanthane et de l'oxyde d'yttrium, telles que WLaCeY, sont utilisées pour le soudage TIG des alliages et superalliages de titane. Par exemple, un projet de soudage d'aubes de moteur d'avion utilise des électrodes WL20 avec un courant de 150 à 200 A, une résistance à la traction de soudure de 900 MPa et une porosité inférieure à 0,1 %, répondant à des normes aéronautiques strictes.

Fabrication automobile : Les électrodes composites sont largement utilisées dans le soudage des composants de batteries de véhicules électriques. L'électrode (WC20) contenant de l'oxyde de cérium est utilisée pour le soudage TIG des coques de batteries en alliage d'aluminium avec un courant de 50 à 100 A, une surface de soudure lisse et une augmentation de 10 % de la durée de vie.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Un constructeur automobile a amélioré l'efficacité du soudage de 15 % et réduit les coûts de production de 8 % en utilisant des électrodes composites.

Industrie de l'énergie nucléaire : Le soudage des cuves de réacteur nucléaire nécessite une résistance élevée à la corrosion et une longue durée de vie. L'électrode composite contenant de la zirconne a bien fonctionné dans le soudage au plasma, soudant des tuyaux en acier inoxydable 304 avec une profondeur de pénétration contrôlée de 3 à 5 mm, aucune fissure dans la soudure et une augmentation de 20 % de la résistance à la corrosion.

Construction navale : Dans la découpe plasma, les électrodes contenant de l'oxyde d'yttrium sont utilisées pour couper des plaques d'acier à haute résistance avec une vitesse de coupe allant jusqu'à 1 m/min, prolongeant la durée de vie des électrodes de 30 % et réduisant la fréquence de remplacement. Un chantier naval utilise des électrodes WLaCeY, ce qui améliore la précision de coupe de 10 % et réduit le gaspillage de matériaux.

Industrie électronique : Dans la fabrication d'équipements à semi-conducteurs, les électrodes composites sont utilisées pour le soudage au plasma par microfaisceaux afin de connecter des composants en cuivre et en aluminium. L'électrode contenant de l'oxyde de cérium est stable à l'arc à faible courant (<30 A), et le diamètre du joint de soudure est contrôlé à 0,1 mm près pour répondre aux exigences de l'emballage des puces.

Nouveau domaine d'énergie : Les électrodes composites sont utilisées comme substrats de revêtement conducteur dans la fabrication d'électrodes de batterie au lithium, et les électrodes contenant de l'oxyde de lanthane améliorent la durée de vie de la batterie de plus de 5 000 fois. Une entreprise photovoltaïque utilise des électrodes composites pour découper des plaquettes de silicium d'une rugosité de surface de $Ra < 0,5$ micron afin d'améliorer l'efficacité du module.

Ces cas montrent que les électrodes composites en tungstène de terres rares répondent aux besoins de l'industrie grâce à des performances personnalisées, ce qui favorise le développement d'une fabrication de haute précision.

5.4 Paramètres de procédé de soudage recommandés des électrodes composites en tungstène de terres rares

La sélection des paramètres du processus de soudage affecte directement les performances et la qualité de soudage des électrodes composites en tungstène de terres rares. Voici les paramètres recommandés pour le soudage TIG et plasma, couvrant différents matériaux et types d'électrodes :

Paramètres de soudage TIG :

Type d'électrode : WL20 (2 % d'oxyde de lanthane), WC20 (2 % d'oxyde de cérium), WLaCeY (composite ternaire)

Type de courant :

Polarité positive DC (DCSP) : convient à l'acier inoxydable, à l'acier au carbone et aux courants de 50 à 250 A

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Courant alternatif (AC) : Convient aux alliages d'aluminium et de magnésium, aux courants de 60 à 200 A et aux fréquences de 70 à 150 Hz

Diamètre de l'électrode : 1,6 à 4,0 mm (1,6 à 2,4 mm pour les plaques minces, 3,2 à 4,0 mm pour les plaques épaisses)

Angle de pointe : 30 à 60° (soudage de précision 30°, courant élevé 60°)

Gaz de protection : argon (pureté 99,99 %), débit 8 à 15 L/min

Tension de démarrage de l'arc : 25 à 35 V

Vitesse de soudage : 0,1 à 0,5 m/min

Longueur d'extension de l'électrode : 3 à 6 mm

Paramètres de soudage plasma :

Type d'électrode : WLaCeY, WY20 (oxyde d'yttrium à 2 %)

Type de courant : polarité positive DC, courant de 80 à 300 A

Diamètre de l'électrode : 2,4 à 4,8 mm

Angle de pointe : 45 à 60°

Gaz plasma : argon, débit 0,5 à 2 L/min

Gaz de protection : argon + 5 % d'hydrogène, débit 10 à 20 L/min

Tension de démarrage de l'arc : 30 à 40 V

Vitesse de soudage : 0,2 à 0,8 m/min

Adaptation matérielle :

Acier inoxydable : WL20, courant 100 à 200 A, débit d'argon 10 L/min, angle de pointe 45°

Alliage d'aluminium : WC20, courant alternatif 80 à 150 A, fréquence 100 Hz, débit d'argon 12 L/min

Alliage de titane : WLaCeY, courant 120 à 180 A, angle de pointe 30°, mélange argon + hélium (1:1)

Suggestion d'optimisation : Les paramètres doivent être ajustés en fonction de l'épaisseur de la pièce et de l'équipement de soudage. Un faible courant et des pointes d'électrode tranchantes s'insèrent dans des plaques minces, réduisant ainsi les zones affectées par la chaleur ; Un courant élevé et un grand angle de pointe conviennent aux plaques épaisses et améliorent la profondeur de pénétration. La surveillance en temps réel de la tension de l'arc et des fluctuations de courant garantit la stabilité.

5.5 Précautions d'utilisation des électrodes composites en tungstène de terres rares

L'utilisation appropriée des électrodes composites en tungstène de terres rares maximise leurs performances et prolonge leur durée de vie. Voici quelques considérations clés :

Sélection de l'électrode : Choisissez le modèle en fonction du matériau et du processus de soudage, par exemple, le WL20 convient au soudage AC en alliage d'aluminium, le WC20 convient au soudage de l'acier inoxydable à faible courant et le WLaCeY est utilisé pour le soudage en alliage de titane à haute charge.

Meulage de la pointe : La pointe de l'électrode doit être rectifiée à un angle approprié (30 à 60°), à

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

l'aide d'une meule diamantée spéciale pour éviter toute contamination. La direction de meulage est le long de la direction axiale de l'électrode et la rugosité de surface $Ra < 0,2$ microns. Le soudage AC doit être meulé dans une pointe hémisphérique pour réduire l'épuisement.

Gaz de protection : utiliser de l'argon de haute pureté ou un mélange argon + hélium, débit de 8 à 20 L/min. Vérifiez l'étanchéité des conduites de gaz pour éviter la contamination par l'oxygène ou la vapeur d'eau.

Stockage et transport : Les électrodes sont stockées dans un environnement sec et ventilé (température 10 à 25°C, humidité <60 %) dans un emballage étanche à l'humidité. Le transport évite les fortes vibrations et empêche la flexion des électrodes ou les dommages de surface.

Spécifications de fonctionnement : Inspectez la surface de l'électrode avant de souder pour vous assurer qu'il n'y a pas de taches d'huile ou d'oxydes. Évitez tout contact des électrodes avec le bain de fusion pour éviter toute contamination. Maintenez l'électrode déployée de 3 à 6 mm pendant le soudage pour éviter la surchauffe.

Protection de sécurité : Portez des lunettes et des gants de protection pour éviter les rayonnements d'arc et l'inhalation de poussière. Assurez-vous que la zone de soudage est bien ventilée et équipée d'un dispositif d'extraction de poussière.

Inspection régulière : vérifiez l'état de l'embout de l'électrode toutes les 50 heures, réaffûtez-le ou remplacez-le. Enregistrez le temps d'utilisation pour éviter qu'une usure excessive n'affecte la qualité de la soudure.

Le respect de ces considérations garantit des performances d'électrode stables et réduit les taux de défaillance.

5.6 Résolution de problèmes courants avec des électrodes composites en tungstène de terres rares

Les problèmes et les solutions qui peuvent être rencontrés lors de l'utilisation d'électrodes composites en tungstène de terres rares sont les suivants :

Problème 1 : Instabilité de l'arc

Cause : Contamination de l'extrémité de l'électrode, gaz de protection insuffisant ou fluctuations de courant.

Solution : Nettoyez la surface de l'électrode, vérifiez le débit de gaz (8 à 15 L/min) et stabilisez la puissance de sortie. Rebroyez la pointe à 45°.

Problème 2 : L'électrode brûle rapidement

Cause : Courant excessif, angle de pointe inapproprié ou contamination par le gaz.

Solution : Réduisez le courant à la plage recommandée (par exemple, 100 à 200 A), ajustez l'angle de pointe à 60° et utilisez de l'argon de haute pureté.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Problème 3 : Il y a beaucoup de pores dans la soudure

Cause : Contamination de l'électrode ou oxygène dans le gaz protecteur.

Solution : Nettoyage par ultrasons de l'électrode, vérification de la pureté du gaz (>99,99 %), augmentation du débit à 12 L/min.

Problème 4 : Difficulté à créer un arc

Cause : Meulage incorrect de la pointe ou vieillissement de l'électrode.

Solution : Réaffûtez la pointe à 30°, vérifiez la durée de vie de l'électrode, remplacez-la si nécessaire.

Problème 5 : Rupture de l'électrode

Cause : Contraintes mécaniques ou défauts internes.

Solution : Vérifiez la force de serrage de l'électrode (<100 N) et confirmez qu'il n'y a pas de fissures internes grâce à un contrôle par ultrasons.

La résolution de problèmes nécessite l'enregistrement des données de défaut afin d'optimiser les paramètres du processus en fonction des conditions de travail réelles.

5.7 Applications des électrodes composites en tungstène de terres rares dans les domaines émergents

L'application des électrodes composites en tungstène de terres rares dans les domaines émergents se développe rapidement, en particulier dans les domaines suivants :

Impression 3D : Dans l'impression 3D métallique, des électrodes composites sont utilisées pour le dépôt d'arc plasma (PAAM) afin de fournir un arc stable à haute température et d'imprimer des pièces en alliage à haute résistance. L'électrode contenant de l'oxyde de lanthane a une stabilité d'arc de 95 % et une amélioration de 15 % de la précision d'impression lors de l'impression d'alliages de titane.

Assistance au soudage laser : Dans le soudage composite laser-TIG, l'électrode composite stabilise l'arc et améliore l'absorption de l'énergie laser. Les électrodes contenant de l'oxyde de cérium ont une augmentation de 20 % de la profondeur de soudure dans le soudage laser de l'acier inoxydable, ce qui les rend adaptées aux composants automobiles légers.

Batteries à énergie nouvelle : Les électrodes composites servent de substrats conducteurs pour les batteries au lithium et les batteries à l'état solide, et les électrodes contenant de l'oxyde d'yttrium améliorent la durée de vie de la batterie jusqu'à 6 000 fois. Une entreprise de batteries utilise des électrodes WLaCeY, et la conductivité des électrodes est augmentée de 10 %.

Électrocatalyse : Dans la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, l'électrode composite agit comme une cathode électrocatalytique, et l'activité catalytique des oxydes de terres rares réduit le surpotentiel de 20 %. L'électrode contenant de l'oxyde de cérium a une densité de courant de 100 mA/cm² dans un électrolyte acide.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Fabrication micro-nano : Dans le soudage au plasma à microfaisceaux, des électrodes contenant de l'oxyde de lanthane sont utilisées dans l'emballage des puces, et le diamètre des joints de soudure est contrôlé à 50 microns pour répondre aux besoins des appareils 5G.

Ces applications émergentes stimulent la recherche et le développement d'électrodes composites, qui devraient représenter plus de 30 % des parts de marché dans de nouveaux domaines d'ici 2030.

5.8 Analyse des avantages économiques des électrodes composites en tungstène de terres rares

Les avantages économiques des électrodes composites en tungstène de terres rares se traduisent par une meilleure efficacité de production, des économies de coûts et une compétitivité accrue sur le marché.

Efficacité de production : L'électrode composite a une durée de vie de 500 à 1000 heures, ce qui est 2 à 3 fois supérieur à celle des électrodes en tungstène pur (200 à 300 heures), et la fréquence de remplacement est réduite de 20 %. Dans le soudage TIG, la stabilité de l'arc est augmentée de 15 %, la vitesse de soudage est augmentée de 10 % et l'efficacité de la production est considérablement améliorée.

Économies de coûts : Le coût initial des électrodes composites est plus élevé que celui des électrodes en tungstène pur (environ 20 % plus élevé), mais la durée de vie prolongée réduit le coût total d'utilisation de 30 %. Une usine de fabrication automobile utilise des électrodes WL20, ce qui permet d'économiser environ 100 000 \$ en coûts d'entretien par an. Le taux de récupération des électrodes usagées atteint 85 %, ce qui réduit encore les coûts en ressources.

Compétitivité du marché : la nature non radioactive des électrodes composites est conforme aux réglementations REACH et RoHS, ce qui permet d'entrer sans obstacle sur les marchés européen et américain. Selon l'analyse du marché mondial, sa demande augmente à un taux annuel de 5,8 % et la taille du marché devrait atteindre 1,2 milliard de dollars d'ici 2025.

Étude de cas : Une compagnie d'aviation a utilisé des électrodes WLaCeY pour souder des alliages de titane, et le taux de réussite de la soudure est passé de 90 % à 98 %, et le coût des retouches a été réduit de 50 %. Dans la fabrication de batteries à énergies nouvelles, les électrodes composites améliorent les performances des batteries et augmentent la valeur ajoutée des produits de 15 %.

Dans l'ensemble, les électrodes composites en tungstène de terres rares apportent des avantages économiques significatifs aux entreprises et favorisent la mise à niveau de l'industrie grâce à l'optimisation des performances et aux caractéristiques écologiques.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale



Chapitre 6 Équipement de production d'électrodes composites en tungstène de terres rares

6.1 Équipement de traitement des matières premières pour les électrodes composites en tungstène de terres rares

L'équipement de traitement des matières premières est utilisé pour la préparation des matières premières et le rapport des électrodes composites de tungstène de terres rares afin d'assurer une haute pureté et un mélange uniforme de matériaux à base de tungstène et d'oxydes de terres rares. Voici les principaux appareils et leurs fonctions :

Balances électroniques de haute précision : pour un pesage précis du trioxyde de tungstène (WO_3) ou du paratungstate d'ammonium (APT) ainsi que des nitrates de terres rares (par exemple le nitrate de lanthane, le nitrate de cérium). Avec une précision de 0,001 g et une plage de mesure de 0,1 à 10 kg, il est équipé d'une table anti-vibration et d'un blindage électrostatique pour assurer un pesage précis.

Système de préparation de la solution : pour la préparation de solutions de nitrate de terres rares, y compris cuve d'agitation en acier inoxydable (capacité 50 à 500 L), pH-mètre (précision $\pm 0,01$) et bain-marie thermostatique (contrôle de la température 40 à 80°C). La vitesse d'agitation de 200 à 500 tr/min assure une solution uniforme. Le système doit être équipé d'un générateur d'eau désionisée d'une pureté $> 18 M\Omega \cdot cm$.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item	Typical Value	Remarks
Tungsten Purity	≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Oxide Content	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Current Range	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance	2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Life Improvement	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Aerospace Manufacturing: Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

Nuclear and Power Equipment: Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

Precision Machining: Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

Automotive and Rail Transit: Welding of critical load-bearing components

Electronics and Vacuum Devices: High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Sécheur par atomisation : Mélangez la solution de nitrate de terres rares avec de la poudre de tungstène et séchez-la pour produire une poudre dopée. Paramètres de l'équipement : température de l'air d'entrée 150 à 250°C, débit de pulvérisation 0,5 à 2 L/min, vide de la chambre de séchage 10^{-1} Pa.

Tamiseur vibrant : utilisé pour cribler la poudre séchée et éliminer les particules agglomérées. Le tamis dispose d'un écran de 200 à 400 mesh, d'une fréquence de vibration de 1000 à 2000 fois/min, et d'une capacité de traitement de 100 à 500 kg/h. Équipé d'un couvercle anti-poussière et d'une mise à la terre électrostatique pour éviter la pollution par la poussière.

Équipement de contrôle de la qualité : y compris spectromètre à fluorescence X (XRF, détection de la teneur en impuretés $<0,01$ %) et analyseur de taille de particules laser (détermination de D50 en 1 à 5 microns). Ces appareils garantissent que la pureté des matières premières et la distribution des particules répondent aux exigences.

Caractéristiques et entretien : L'équipement de traitement des matières premières doit être résistant à la corrosion (acier inoxydable ou alliage de titane), et la cuve de mélange et la buse doivent être nettoyées régulièrement pour éviter la contamination croisée. L'entretien comprend l'étalonnage de la balance (une fois par mois) et la vérification de l'efficacité thermique du sécheur-atomiseur (une fois par trimestre).

La haute précision et la propreté de l'équipement de manutention des matières premières fournissent une poudre de haute qualité pour les processus ultérieurs, jetant ainsi les bases de la performance.

6.2 Équipement de réduction et de dopage pour les électrodes composites en tungstène de terres rares

L'équipement de réduction et de dopage est utilisé pour convertir le trioxyde de tungstène en poudre de tungstène de haute pureté et compléter le dopage des oxydes de terres rares, avec un four de réduction de l'hydrogène et un système de dopage en son cœur.

Four tubulaire de réduction de l'hydrogène : utilisé pour la réduction en deux étapes, le premier étage (500 à 600 °C) génère du WO_2 , et le deuxième étage (800 à 950 °C) produit de la poudre de tungstène. Le corps du four est en acier inoxydable haute température ou en alliage de molybdène, d'une longueur de 2 à 5 mètres et d'un diamètre intérieur de 0,5 à 1 mètre. Débit d'hydrogène 0,5 à 1,5 m^3/h , pureté 99,99 %. Équipé d'un thermomètre infrarouge (précision $\pm 2^\circ C$) et d'un analyseur de gaz (teneur en oxygène $<0,01$ %).

Four de réduction à cloche : Adapté à la production de grands volumes, avec une capacité de 100 à 1000 kg/lot, un contrôle de la température de 500 à 1000°C et un vide de 10^{-2} Pa. Équipé d'un système de mesure de température multipoint pour assurer l'uniformité de la température $\pm 5^\circ C$. Les systèmes de circulation d'hydrogène récupèrent les gaz qui n'ont pas réagi, ce qui réduit les coûts.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Équipement de dopage : Le broyeur planétaire est utilisé pour l'alliage mécanique, le raffinage de la poudre et le dopage uniforme des oxydes de terres rares. Paramètres : 400 à 600 tr/min, rapport de granulation 8:1, temps de broyage 8 à 12 heures. Le réservoir et le fluide du broyeur à boulets sont en carbure pour éviter toute contamination.

Equipements auxiliaires : y compris le système d'épuration des gaz (élimination de la vapeur d'eau et des impuretés) et l'unité de traitement des gaz d'échappement (combustion catalytique des gaz d'échappement d'hydrogène). Les analyseurs de taille de particules laser et les MEB sont utilisés pour détecter la taille des particules de poudre (1 à 5 microns) et la topographie.

Maintenance et sécurité : Vérifiez régulièrement l'étanchéité du four (une fois par mois), calibrez le système de mesure de température (une fois par trimestre). Le système à hydrogène doit être équipé de détecteurs de fuites et de dispositifs de ventilation antidéflagrants pour assurer un fonctionnement en toute sécurité. Le fonctionnement efficace de l'équipement de réduction et de dopage garantit la qualité de la poudre et jette les bases du moulage ultérieur.

6.3 Équipement de formage des électrodes composites en tungstène de terres rares

L'équipement de formage presse la poudre de tungstène dopée en une ébauche, assurant une densité uniforme et une stabilité structurelle. Voici les principaux équipements :

Presse isostatique à froid (CIP) : Applique une pression uniforme (100 à 300 MPa) à travers un milieu liquide pour presser la densité corporelle jusqu'à 60 % à 70 % de densité théorique. L'équipement a une capacité de 50 à 500 L et est équipé d'une pompe haute pression et d'un capteur de pression d'une précision $\pm 0,5$ MPa.

Machine de moulage hydraulique : Utilise un moule en acier rigide avec une pression de 150 à 200 MPa, adapté à la production de petits lots. Le temps de pressage est de 5 à 10 minutes, équipé d'un système d'alimentation automatique, et le débit est de 50 à 200 kg/h.

Machine de formage de boue : utilisée pour les électrodes de forme complexe, mélangeant de la poudre avec un liant (0,5 % à 1 % d'alcool polyvinylique) dans une boue, en l'injectant dans le moule pour le durcissement. L'équipement contient une pompe à seringue de précision (précision de débit $\pm 0,1$ mL/min) et un système de dégazage sous vide. La température de la chambre de séchage est contrôlée entre 25 et 80°C pour éviter les contraintes thermiques.

Équipement de contrôle de la qualité : Le détecteur à ultrasons vérifie les défauts internes du corps (résolution 0,1 mm), le densimètre d'Archimède mesure la masse volumique (précision $\pm 0,01$ g/cm³). Le système d'inspection visuelle garantit que l'écart dimensionnel de la carrosserie < 0,1 mm.

Maintenance et optimisation : Nettoyez régulièrement le moule (une fois par semaine), calibrez le capteur de pression (une fois par mois). Optimisez les paramètres de formage grâce à la simulation par éléments finis pour réduire le gradient de densité. La haute précision de l'équipement de formage

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

garantit la qualité du corps et constitue une base fiable pour le frittage.

6.4 Équipement de frittage pour électrodes composites en tungstène de terres rares

L'équipement de frittage est utilisé pour densifier le corps afin de former un matériau d'électrode à haute densité et à haute résistance. Voici les principaux équipements :

Four de frittage à chaud sous vide : fritté à 1600 à 1800 °C, 50 à 80 MPa, degré de vide 10^{-3} Pa. Le corps du four adopte un corps chauffant en graphite, équipé d'un thermomètre infrarouge (précision $\pm 2^{\circ}\text{C}$) et d'une pompe à vide. La vitesse de chauffage est contrôlée par sections ($10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ à 1000°C , $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ à la température cible) et maintenue au chaud pendant 60 à 90 minutes.

Four de frittage par plasma à étincelles (SPS) : Chauffage rapide (100 à $200^{\circ}\text{C}/\text{min}$) par courant pulsé, température de frittage 1400 à 1600°C , pression 30 à 50 MPa, température de maintien pendant 5 à 10 minutes. Il convient aux nanopoudres et réduit la volatilisation des terres rares. Equipé d'un régulateur de courant de haute précision (1000 à 2000 A).

Four de frittage vertical : courant de fusion de 90% , température supérieure à 3000°C , atmosphère à l'argon ou à l'hydrogène. Convient aux électrodes de grand diamètre, équipé d'un système de serrage d'électrode refroidi à l'eau et d'un moniteur de courant.

Équipement auxiliaire : four de pré-frittage (1200°C , sous vide ou sous atmosphère hydrogène) pour l'élimination des liants, équipé d'un système de circulation de gaz. Le MEB et la DRX ont analysé la microstructure post-frittée pour confirmer la taille des grains (5 à $10\ \mu\text{m}$) et la distribution des terres rares.

Maintenance et sécurité : Vérifiez régulièrement la pompe à vide (une fois par mois), calibrez le système de mesure de la température (une fois par trimestre). Le four de frittage doit être équipé d'un système de circulation d'eau de refroidissement pour éviter la surchauffe. La fonction de frittage rapide de l'équipement SPS augmente l'efficacité de 30% et réduit la consommation d'énergie de 20% .

6.5 Équipement de traitement des électrodes composites de tungstène de terres rares

L'équipement de traitement transforme le corps fritté en tiges d'électrode pour améliorer la densité et la qualité de surface. L'équipement principal comprend :

Forgeuse rotative : Le diamètre du corps (20 à $3\ \text{mm}$) est réduit par martelage rotatif, et le taux de déformation est de 20% à 30% par passe. La température de traitement est de 800 à 1200°C , équipé d'un système d'alimentation automatique et d'un thermomètre infrarouge.

Machine à étirer : Étirer la barre à l'aide d'une matrice en carbure pour réduire le diamètre à $0,5$ à $10\ \text{mm}$. Vitesse d'arrachement de $0,5$ à $2\ \text{m}/\text{min}$ et lubrifié avec une émulsion de graphite (coefficient de frottement $< 0,1$). Machine à tirer la chaîne pour une production continue.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Redresseuses et tronçonneuses : les redresseuses à rouleaux assurent un écart de rectitude de $< 0,1$ mm/m, et les tronçonneuses laser contrôlent des longueurs de 150 à 175 mm (tolérance $\pm 0,5$ mm). Équipé d'un système d'inspection par vision pour surveiller la qualité de surface.

Équipement de contrôle de la qualité : rugumètre de surface ($Ra < 0,5$ micron) et détecteur de défauts par ultrasons pour détecter les défauts internes. La mesure dimensionnelle est effectuée à l'aide d'un télémètre laser (précision $\pm 0,01$ mm).

Maintenance et optimisation : Changer le moule régulièrement (toutes les 1000 heures), vérifier le système de lubrification (une fois par semaine). La simulation par éléments finis optimise les paramètres de déformation et le rendement atteint plus de 98 %. L'équipement de traitement automatisé améliore l'efficacité de 30 %.

6.6 Équipement de traitement de surface pour les électrodes composites de tungstène de terres rares

L'équipement de traitement de surface est utilisé pour le polissage, le nettoyage et le revêtement afin d'améliorer la résistance à la corrosion des électrodes et les performances d'émission d'électrons.

Polisseuse mécanique : utilisation d'abrasifs d'alumine (2000 mesh), électrodes de polissage à rugosité $Ra < 0,2$ microns. Équipé d'une tête de polissage multi-axes d'une capacité de traitement de 100 à 500 pièces/heure.

Machine de polissage électrochimique : Polissage dans une solution mixte d'acide sulfurique et d'acide phosphorique, densité de courant $0,5$ à 1 A/cm², temps de traitement 5 à 10 minutes. Équipé d'une alimentation électrique à courant constant et d'un système de récupération des déchets liquides.

Nettoyeur à ultrasons : utilise une solution alcaline (pH 8 à 10) à une fréquence de 40 kHz, une température de 50 à 60 °C et un temps de nettoyage de 5 à 10 minutes. Équipé d'un réservoir de rinçage à l'eau déminéralisée et d'un système de séchage à air chaud.

Équipement de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) : Des oxydes de terres rares ou des revêtements céramiques (par exemple, La_2O_3 , ZrO_2) sont appliqués, les températures sont de 800 à 1000 °C, le vide est de 10^{-2} Pa et le taux de dépôt est de $0,1$ μ m/min.

Entretien et protection de l'environnement : Nettoyez régulièrement les disques de polissage et les cuves de lavage (une fois par semaine), calibrez la densité de courant (une fois par mois). Les produits de nettoyage à base d'eau réduisent les émissions de COV, et les déchets liquides récupèrent les terres rares par échange d'ions, avec un taux de récupération de 90 %.

6.7 Équipement auxiliaire pour électrodes composites en tungstène de terres rares

L'équipement auxiliaire prend en charge les processus de production et le contrôle de la qualité, notamment :

Four de séchage sous vide : pour le séchage des poudres et du corps, température 80 à 150°C, degré

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

de vide 10^{-1} Pa. Modèle recommandé : four de séchage German Binder.

Système de purification des gaz : élimine la vapeur d'eau et les impuretés de l'hydrogène avec une pureté de 99,999 %. Equipé d'un tamis moléculaire et d'un condenseur, débit de 1 à 5 m³/h.

Unité de traitement des gaz d'échappement : combustion catalytique des gaz d'échappement d'hydrogène, équipée d'un analyseur de gaz d'échappement (émission conforme aux normes environnementales).

Équipement d'inspection de la qualité : y compris un diffractomètre à rayons X (XRD, pour analyser la structure cristalline), un microscope électronique à balayage (MEB) pour observer la morphologie microscopique et un testeur de puissance d'échappement d'électrons (précision $\pm 0,01$ eV).

Système de gestion des données : Intégrez des capteurs et des API pour enregistrer les paramètres du processus en temps réel et générer des rapports de qualité.

Les équipements auxiliaires assurent la continuité de la production et la traçabilité de la qualité, réduisant ainsi les taux de défauts.

6.8 Directives de sélection et d'entretien de l'équipement d'électrode de tungstène de terres rares composites

Guide de sélection :

Manutention des matières premières : choisissez des balances de haute précision (0,001 g) et des sècheurs-atomiseurs (taille des particules de 1 à 5 microns) pour la production de masse.

Réduction et dopage : Les fours de réduction tubulaires conviennent aux petits et moyens lots, les fours à cloche conviennent aux grands lots et le broyeur en étoile assure un dopage uniforme.

Formage : La presse isostatique à froid convient aux ébauches de haute précision, la machine de moulage convient aux petits lots et la machine de formage de boue convient aux formes complexes.

Frittage : Les fours SPS conviennent aux nanopoudres, les fours de presse à chaud conviennent à la production régulière et les fours verticaux conviennent aux électrodes de grand diamètre.

Traitement et traitement de surface : Les machines de forgeage rotatives et les machines d'emboutissage doivent être hautement automatisées, et les équipements CVD améliorent les performances de revêtement.

Directives d'entretien :

Entretien régulier : vérifiez l'étanchéité de l'équipement et la précision des capteurs tous les mois, étalonnez le système de mesure de température tous les trimestres et remplacez les pièces usées (telles que les moules, les disques de polissage) tous les six mois.

Maintenance préventive : Utilisez des analyseurs de vibrations pour détecter l'état de fonctionnement de l'équipement et prévenir les pannes. Le système de lubrification est vérifié chaque semaine pour maintenir un coefficient de frottement de $< 0,1$.

Enregistrement et optimisation : Établissez des journaux de maintenance pour enregistrer les pannes et les temps de réparation. Combiné à l'IA pour analyser les données de fonctionnement des

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

équipements, optimiser les cycles de maintenance et prolonger la durée de vie des équipements de 20 %.

6.9 Conception et intégration d'une ligne de production automatique d'électrodes composites en tungstène de terres rares

Les lignes de production automatisées intègrent divers processus pour améliorer l'efficacité et la cohérence. Les points de conception et d'intégration sont les suivants :

Agencement de la ligne de production :

Zone de traitement des matières premières : balance électronique, système de préparation de solution, sécheur par atomisation, d'une superficie de 50 m².

Zone de réduction et de dopage : four de réduction tubulaire, broyeur planétaire, équipé d'un système de circulation de gaz, d'une surface de 100 m².

Zone de formage et de frittage : presse isostatique à froid, four SPS, d'une superficie de 80 m².

Zone d'usinage et de traitement de surface : forgeage rotatif, tréfileuse, équipement CVD, couvrant une surface de 60 m².

Zone d'inspection et d'emballage : MEB, DRX, machine d'emballage automatique, 30 m².

Système d'automatisation :

Contrôle PLC : le Siemens S7-1500 contrôle les paramètres du processus, intègre des capteurs (température, pression, débit) et surveille en temps réel.

Manipulation par robot : Adoptez un bras robotique à six axes (tel que l'ABB IRB 6700) pour manipuler les flans et les produits finis, augmentant ainsi l'efficacité de 30 %.

Gestion des données : le système MES enregistre les données de production, génère des rapports de qualité et prend en charge la traçabilité.

Avantages de l'intégration : les lignes de production automatisées raccourcissent les cycles de production de 20 % et augmentent les rendements à 98 %. La consommation d'énergie est réduite de 15 %, les coûts de main-d'œuvre sont réduits de 40 %.

6.10 Équipement de sécurité et mesures de protection pour les électrodes composites en tungstène de terres rares

Des équipements de sécurité et des mesures de protection garantissent la sécurité du processus de production et réduisent le risque d'accident.

Équipement de sécurité :

Détecteur de fuites d'hydrogène : détecte une concentration inférieure à 0,1 %, déclenche automatiquement l'alarme et coupe la source de gaz. Modèle recommandé : détecteur allemand Dräger.

Système de ventilation antidéflagrant : volume d'air de 5000 m³/h pour éviter l'accumulation d'hydrogène, équipé d'un contrôle de conversion de fréquence.

Système de prévention et de contrôle des incendies : extincteur à poudre sèche et boîte de stockage de sable pour faire face aux incendies d'équipements à haute température.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Système de contrôle des poussières : unité d'extraction de poussière à pression négative avec concentration de poussière $< 10 \text{ mg/m}^3$ et filtre à haute efficacité.

Mesures de protection:

Protection du personnel : Les opérateurs portent des masques anti-poussière (niveau FFP3), des lunettes de protection et des gants haute température. Un écran de protection contre l'arc est installé dans la zone de soudage.

Protection de l'équipement : Le four de frittage et l'équipement de traitement sont équipés de boutons d'arrêt d'urgence et le récipient sous pression est régulièrement inspecté (une fois par an).

Surveillance de l'environnement : Surveillance en temps réel de la température de l'atelier ($< 30^\circ\text{C}$), de l'humidité ($< 60 \%$) et de la concentration des gaz pour garantir un environnement sûr.

Formation et urgences : Les opérateurs reçoivent une formation trimestrielle sur la sécurité et l'utilisation de l'équipement hydrogène. Élaborez des plans d'urgence, effectuez des exercices réguliers (comme l'évacuation en cas d'incendie) et assurez-vous que le temps d'intervention en cas d'accident est < 5 minutes.

Les équipements de sécurité et les mesures de protection sont conformes aux normes OSHA et ISO 45001 pour garantir la sécurité de la production et la santé des employés.



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

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item	Typical Value	Remarks
Tungsten Purity	≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Oxide Content	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Current Range	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance	2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Life Improvement	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Aerospace Manufacturing: Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

Nuclear and Power Equipment: Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

Precision Machining: Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

Automotive and Rail Transit: Welding of critical load-bearing components

Electronics and Vacuum Devices: High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Chapitre 7 Normes nationales et étrangères pour les électrodes composites en tungstène de terres rares

7.1 Normes nationales pour les électrodes composites en tungstène de terres rares

En tant que grand pays de ressources en terres rares et grand producteur d'électrodes de tungstène dans le monde, la Chine est à l'avant-garde de la normalisation des électrodes composites de tungstène de terres rares. Ces normes normalisent non seulement les indicateurs techniques, les processus de fabrication et le contrôle de la qualité des produits, mais mettent également l'accent sur les exigences de protection de l'environnement et de sécurité pour répondre aux besoins du développement industriel national. Le système de normes nationales est principalement basé sur des normes nationales (GB/T), complétées par des normes industrielles (YS/T, JB/T) et des normes locales/d'entreprise, formant un cadre normatif à plusieurs niveaux. Les principales normes nationales sont détaillées ci-après :

GB/T 4190-2017 « Électrode de tungstène » : Il s'agit de la norme nationale de base dans le domaine des électrodes de tungstène en Chine, applicable à toutes les électrodes de tungstène non fondues, y compris les électrodes composites de tungstène de terres rares, principalement utilisées dans le soudage sous gaz inerte de tungstène (soudage TIG), le soudage et le coupage au plasma et d'autres domaines. La norme divise les électrodes en trois catégories : le tungstène pur, le tungstène de terres rares simples et le tungstène composite de terres rares, et définit les électrodes composites de tungstène de terres rares comme l'ajout de deux ou plusieurs oxydes de terres rares (tels que l'oxyde de lanthane La_2O_3 , l'oxyde de cérium CeO_2 , l'oxyde d'yttrium Y_2O_3), etc.). La norme spécifie les exigences de composition chimique, telles qu'une teneur en oxyde de lanthane comprise entre 0,5 % et 2,2 %, un total d'oxydes de terres rares ne dépassant pas 4 % et une pureté de matrice de tungstène d'au moins 99,95 %. De plus, la norme comporte des tolérances strictes pour les dimensions physiques : les diamètres vont de 0,5 mm à 10 mm, les tolérances $\pm 0,05$ mm ; Longueurs de 150 mm à 175 mm, tolérances ± 1 mm. En termes de performances, l'électrode doit avoir une puissance d'échappement d'électrons inférieure à 2,5 eV, une stabilité d'arc supérieure à 95 % et des normes de qualité de surface (par exemple, pas de fissures, pas de tartre, rugosité $R_a < 0,2$ micron) sont spécifiées. La norme comprend également des méthodes d'inspection telles que la spectroscopie d'émission de plasma à couplage inductif (ICP-OES) pour l'analyse chimique, et les propriétés mécaniques déterminées par l'appareil d'essai de dureté Vickers. La formulation de cette norme fait référence à la norme internationale ISO 6848, mais accorde plus d'attention à l'utilisation locale des ressources en terres rares et aux principes de fabrication écologique de la Chine.

YS/T 231-2007 « Électrodes de tungstène de terres rares » : En tant que norme industrielle pour les métaux non ferreux, cette norme cible spécifiquement les électrodes de tungstène dopées aux terres rares, y compris les types de terres rares composites, adaptées au soudage, au découpage et aux champs de sources lumineuses électriques. La norme met l'accent sur les applications composites multi-éléments des oxydes de terres rares, telles que la spécification d'une teneur totale en terres rares de 1 % à 3 % pour les composites binaires (tels que les combinaisons d'oxyde de cérium et d'oxyde de lanthane) et de 1,5 % à 3,5 % pour les composites ternaires (tels que l'oxyde de cérium, l'oxyde de lanthane et l'oxyde d'yttrium). La méthode d'essai de stabilité de l'arc est décrite en détail

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

dans la section des essais de performance : dans un environnement de soudage TIG simulé, le courant est de 100 A à 200 A, et la volatilité de l'arc (<5 % requis) est enregistrée ; Les essais de durée de vie de l'arc nécessitent un soudage continu à 200 A DC pendant pas moins de 500 heures. La norme exige également une microstructure : la taille des grains est contrôlée de 5 à 10 microns, et la distribution uniforme des particules d'oxyde de terres rares est observée par microscopie électronique à balayage (MEB). La norme a été publiée en 2007 et révisée par la suite pour tenir compte des applications émergentes telles que les électrodes de batterie à énergie nouvelle, l'ajout d'indicateurs d'essai anti-contamination et de fatigue à haute température.

JB/T 12871-2016 « Conditions techniques pour les électrodes en tungstène pour le soudage » : Cette norme de l'industrie des machines se concentre sur les électrodes en tungstène pour les applications de soudage, y compris les conditions techniques et les règles d'inspection pour les électrodes composites en tungstène de terres rares. La norme spécifie les exigences en matière d'emballage, de transport et de stockage des électrodes, telles que l'emballage doit être étanche à l'humidité, aux collisions et à l'utilisation de sacs scellés sous vide ; Évitez les températures élevées et l'humidité élevée pendant le transport. Les indicateurs de qualité comprennent la porosité de la soudure inférieure à 0,1 % et la résistance à la traction de la soudure d'au moins 90 % du substrat. La norme introduit également des tests de fiabilité tels qu'une dégradation des performances de 5 % après stockage dans un environnement à forte humidité (90 % HR< Cette norme s'applique à la fois aux fabricants et aux utilisateurs d'équipements de soudage, fournissant un processus d'acceptation détaillé qui comprend une inspection visuelle, une mesure dimensionnelle et des tests d'échantillonnage de performance.

Autres normes : Les normes locales telles que la norme locale de Shanghai DB31/T 1234-2020 stipulent l'optimisation des ratios de terres rares pour les électrodes multicomposites (par exemple, oxyde de cérium : oxyde de lanthane : oxyde d'yttrium = 1:1:3) et augmentent les exigences en matière de dopage aux nanoterres rares. La norme d'entreprise étend les mesures de performance basées sur GB/T 4190 et convient aux applications aéronautiques haut de gamme. Ces normes forment un système complémentaire et favorisent l'industrialisation des électrodes composites en tungstène de terres rares.

La norme nationale se caractérise par l'accent mis sur la transformation de la protection de l'environnement, l'interdiction de l'utilisation d'électrodes radioactives en thorium et le tungstène et l'arrimage aux réglementations nationales sur la gestion des terres rares, en mettant l'accent sur le recyclage des ressources. Les mises à jour des normes sont généralement effectuées tous les 5 à 7 ans pour intégrer de nouvelles technologies telles que les tests assistés par l'IA et les processus de préparation écologique.

7.2 Normes internationales pour les électrodes composites en tungstène de terres rares

Les normes internationales fournissent des spécifications techniques unifiées et des critères de qualité pour le commerce, la fabrication et l'application à l'échelle mondiale d'électrodes composites en tungstène de terres rares, et sont principalement formulées par des organisations telles que l'Organisation internationale de normalisation (ISO), l'American Welding Society (AWS), le Comité

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

européen de normalisation (CEN) et le Japan Industrial Standards Survey (JISC). Ces normes mettent l'accent sur la cohérence des performances, les exigences environnementales et la compatibilité internationale, favorisant ainsi la stabilité des chaînes d'approvisionnement transfrontalières. Voici une analyse détaillée des principales normes internationales :

ISO 6848:2015 « Soudage et coupage à l'arc - Électrodes en tungstène non consommables - Classification » : En tant que norme de classification internationale pour les électrodes en tungstène, cette norme s'applique aux électrodes en tungstène non fondues, y compris les électrodes composites en tungstène à base de terres rares, pour les procédés de soudage à l'arc et de coupage. La norme classe les électrodes en WP (tungstène pur), WT (tungstène thorium, restreint), WL (oxyde de tungstène lanthane), WC (oxyde de tungstène cérium), WY (oxyde de tungstène yttrium) et EWG (tungstène composite de terres rares). Pour les électrodes composites en tungstène de terres rares, la norme est définie comme une électrode contenant deux oxydes de terres rares ou plus avec une teneur totale en terres rares de 0,5 % à 4 %, comme le WL20 (contenant 1,8 % à 2,2 % de La_2O_3). Les spécifications physiques comprennent des diamètres de 0,5 mm à 10 mm (tolérance $\pm 0,05$ mm) et des longueurs de 50 mm à 175 mm (tolérance ± 1 mm). Les exigences de performance comprennent une puissance d'échappement d'électrons inférieure à 2,5 eV, une tension de démarrage d'arc inférieure à 35 V et une durée de vie d'arc d'au moins 500 heures à un courant de 150 A. La norme spécifie également les exigences de traitement de surface (telles que l'épaisseur de la couche polie ou d'oxyde < 5 microns) et les spécifications d'emballage (résistance à l'humidité et aux chocs). Les méthodes d'inspection comprennent l'analyse de la composition chimique (ICP-OES) et les tests de performance de l'arc (la photographie à grande vitesse enregistre la stabilité de l'arc). La norme a été révisée en 2015 en référence au règlement REACH de l'UE, mettant l'accent sur la promotion d'alternatives radioactives aux électrodes de thorium et de tungstène.

Spécification AWS A5.12M/A5.12:2009 (R2017) pour les électrodes en tungstène dispersées de tungstène et d'oxyde pour le soudage à l'arc et le coupage : La norme de l'American Welding Society est la spécification faisant autorité dans le domaine du soudage, qui est hautement coordonnée avec la norme ISO 6848 mais se concentre davantage sur les performances de soudage réelles. La norme classe les électrodes composites en tungstène de terres rares dans la série EWG, stipulant que la teneur en oxydes de terres rares (tels que La_2O_3 , CeO_2 , Y_2O_3) est précise à 0,1 % et que la teneur totale ne dépasse pas 4 %. Par exemple, l'EWG-2 (avec 2 % d'oxyde de cérium) nécessite un temps de démarrage de l'arc de $< 0,1$ seconde et une stabilité de l'arc > 90 % en soudage à polarité positive CC (DCSP). La norme comporte des exigences détaillées pour les performances à haute température : à un courant de 200 A, le taux d'usure de la pointe de l'électrode $< 0,01$ mm/h. Les dimensions et les tolérances sont conformes à l'ISO et les recommandations de plage de courant de soudage sont augmentées (par exemple, électrode de 2,4 mm de diamètre pour 50 à 150 A). Lorsqu'elle a été republiée en 2017, la norme a renforcé la clause de protection de l'environnement, recommandant l'utilisation de terres rares composites au lieu du thorium et du tungstène. Cette norme s'applique au marché américain et au commerce international, fournissant des directives de certification détaillées.

EN ISO 6848:2015 (norme européenne) : La norme européenne est la même que la norme ISO 6848,

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

mais intègre les exigences réglementaires de l'UE telles que REACH et RoHS. Cette norme met l'accent sur la non-radioactivité et la durabilité des électrodes, en spécifiant des tests de stabilité pour les électrodes composites en tungstène de terres rares à haute humidité (90 % HR) et à haute température (1500°C) : taux d'oxydation <0,01 mg/cm², atténuation des performances <5 %. La norme comprend également une analyse du cycle de vie, qui oblige les producteurs à déclarer leur empreinte carbone et leur taux de récupération des terres rares (>80 %). Convient aux États membres de l'UE, favorisant l'application de la technologie de soudage écologique.

JIS Z 3233:2016 « Électrodes en tungstène pour le soudage à l'arc sous protection sous gaz inerte » : la norme industrielle japonaise se concentre sur les électrodes en tungstène pour le soudage sous protection sous gaz inerte, y compris les types de terres rares composites. La norme spécifie une teneur en terres rares précise à 0,1 %, par exemple WY20 contenant 1,8 % à 2,2 % Y₂O₃. Le test de performance comprend des indicateurs de soudage de précision : tension de démarrage de l'arc <30 V et porosité de la soudure < 0,05 %. La norme met l'accent sur le contrôle de la microstructure, en vérifiant la taille des grains < 10 microns par diffraction des rayons X (XRD). Cette norme s'applique aux industries japonaises de l'électronique et de l'automobile, entraînant des applications de haute précision.

Le dénominateur commun des normes internationales est l'accent mis sur la transformation radioactive et l'optimisation des performances, avec un cycle de renouvellement de 3 à 5 ans pour s'adapter aux évolutions des chaînes d'approvisionnement mondiales.

7.3 Normes de composition des matériaux pour les électrodes composites en tungstène de terres rares

La norme de composition des matériaux est la base du contrôle de la qualité des électrodes composites de tungstène de terres rares, stipulant le rapport de composition, les exigences de pureté et les limites d'impuretés de la matrice de tungstène et des oxydes de terres rares. Ces normes garantissent l'uniformité de la composition grâce à des méthodes d'analyse chimique et évitent les fluctuations de performance. On trouvera ci-après des précisions d'un point de vue national et étranger :

Normes nationales de composition des matériaux (GB/T 4190-2017 et YS/T 231-2007) :

Matrice de tungstène : pureté d'au moins 99,95 %, teneur totale en impuretés < de 0,05 %. Limites spécifiques d'impuretés : fer (Fe) < 0,01 %, silicium (Si) < 0,005 %, carbone (C) < 0,005 %, oxygène (O) < 0,01 %. Ces limites garantissent une conductivité élevée et une résistance aux températures élevées des électrodes.

Oxydes de terres rares : 0,5 % à 2,2 % des électrodes de terres rares simples ; La teneur totale des électrodes composites de terres rares est de 1 % à 4 %, comme les composites binaires (oxyde de cérium + oxyde de lanthane = 1,5 % à 3 %), les composites ternaires (oxyde de cérium + oxyde de lanthane + oxyde d'yttrium = 1,5 % à 3,5 %). La norme autorise l'utilisation d'additifs traces tels que la zircone (ZrO₂<1 %) pour optimiser la résistance à l'oxydation.

Méthode de détection : L'ICP-OES a été utilisé pour déterminer la teneur en terres rares et en impuretés, avec une précision de ±0,01 % ; Validation assistée par spectroscopie d'absorption

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

atomique (AAS). La norme exige un écart de composant $d' < 0,1$ % d'un lot à l'autre, qui est surveillé par un contrôle statistique des processus (SPC).

Normes internationales de composition des matériaux (ISO 6848:2015 et AWS A5.12:2009) :

Matrice de tungstène : pureté $\geq 99,9$ %, teneur totale en impuretés $< 0,1$ %. Limites d'impuretés : Fe $< 0,02$ %, Si $< 0,01$ %, C $< 0,01$ %, O $< 0,02$ %. La norme met l'accent sur l'effet des impuretés sur l'émission d'électrons.

Oxydes de terres rares : la teneur totale des électrodes composites est de 0,5 % à 4 %, comme le WL20 contient 1,8 % à 2,2 % de La_2O_3 ; La série EWG permet plusieurs mélanges (par exemple, $\text{La}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3 = 1,5$ % à 3,5 %). La norme interdit les éléments radioactifs (tels que le ThO_2) et encourage la substitution inoffensive des terres rares.

Méthode de détection : analyse XRF des impuretés, détermination ICP-MS des terres rares (précision $\pm 0,005$ %). La norme exige que les fournisseurs fournissent un certificat de composition (COA), y compris le numéro de lot et la date de l'essai.

Analyse d'applicabilité : Les normes nationales se concentrent davantage sur l'utilisation locale des ressources de terres rares (telles que l'utilisation de l'oxyde de cérium et de l'oxyde de lanthane), tandis que les normes internationales mettent l'accent sur la compatibilité mondiale et la protection de l'environnement (telles que les limites REACH). La mise en œuvre stricte des normes de composition augmente la durée de vie des électrodes de 20 % en réduisant les impuretés, ce qui la rend adaptée aux domaines à forte demande tels que l'aérospatiale.

7.4 Normes d'essai de performance pour les électrodes composites en tungstène de terres rares

La norme d'essai de performance définit les méthodes et les indicateurs d'évaluation des propriétés physiques, électriques, chimiques et de soudage des électrodes composites en tungstène de terres rares afin de garantir la fiabilité du produit dans des applications pratiques. Ces normes comprennent des essais en laboratoire et la validation d'états simulés, couvrant de multiples dimensions, de la micro à la macro.

Normes nationales d'essai de performance (YS/T 231-2007 et JB/T 12871-2016) :

Évacuation électronique et performances électriques : la puissance d'évacuation est mesurée par l'onduleur et doit être $< 2,5$ eV ; Conductivité $> 1,8 \times 10^7$ S/m, testée à l'aide de la méthode à quatre sondes. La stabilité de l'arc est testée sur une station de soudage TIG avec des courants de 100 à 200 A, une volatilité de < 5 % et une stabilité > 95 %.

Propriétés mécaniques : dureté HV 450 à 500 à l'aide d'un duromètre Vickers ; Résistance à la traction 800 à 1000 MPa, testée par une machine d'essai de traction universelle ; Résistance à la rupture K_{Ic} 8 à 10 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, mesurée par un testeur de chocs.

Propriétés thermiques : conductivité thermique 174 à 190 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, test de flash laser ; Le coefficient de dilatation thermique était de $4,5$ à $5,0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, et le dilatomètre a été mesuré dans la plage de 25 à 2000°C.

Performances de soudage : la durée de vie de l'arc est de > 500 heures à 200 A DC et la tension de démarrage de l'arc est de < 35 V ; La profondeur de contrôle de la pénétration est $\pm 0,1$ mm et la forme de l'arc est enregistrée à l'aide de la photographie à grande vitesse.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Environnement d'essai : La norme spécifie une température d'essai de 20 à 25 °C, l'humidité < 60 % et l'équipement est étalonné selon les normes JJG.

Normes internationales d'essai de performance (ISO 6848:2015 et AWS A5.12:2009) :

Performances de l'arc : temps de démarrage de l'arc < 0,1 seconde, tension < 35 V ; Stabilité > 90 % et testée par analyseur de forme d'onde de courant.

Durée de vie et durabilité : 500 à 1000 heures de durée de vie de l'arc, essai de fatigue à haute température (1500°C, 10⁴ cycles sans fissures).

Propriétés chimiques : La résistance à la corrosion a été déterminée par une expérience d'oxydation à haute température à < taux d'oxydation de 0,01 mg/cm² dans une atmosphère contenant de l'oxygène à 1500°C.

Propriétés microscopiques : granulométrie 5 à 10 microns, observation MEB ; L'uniformité de distribution des terres rares a été analysée par TEM.

Méthode d'essai : Répond aux normes ASTM, telles que l'essai de traction E8 et l'essai de résistance à la rupture E399.

L'application de normes d'essai de performance garantit une efficacité élevée de l'électrode en soudage, réduisant le taux d'échec de 20 %.

7.5 Normes de protection de l'environnement et de sécurité pour les électrodes composites en tungstène de terres rares

Les normes de protection de l'environnement et de sécurité visent à minimiser l'impact de la production et de l'utilisation d'électrodes composites en tungstène de terres rares sur l'environnement et la santé humaine, en mettant l'accent sur l'absence de radioactivité, la récupération des ressources et la prévention et le contrôle des risques.

Normes nationales de protection de l'environnement et de sécurité :

GB 26451-2011 « Rare Earth Industrial Pollutant Emission Standard » : Spécifie que la concentration de poussières dans les gaz d'échappement est < 10 mg/m³, SO₂< 50 mg/m³ ; Les ions de terres rares dans les eaux usées < 0,5 mg/L, pH de 6 à 9. La norme impose aux entreprises de s'équiper de systèmes de traitement des eaux usées ayant un taux de récupération de > 80 %.

HJ 2527-2012 « Spécification technique pour la protection de l'environnement de l'industrie des terres rares » : Accent mis sur le processus de préparation écologique, utilisation de terres rares non radioactives au lieu du thorium et du tungstène. Le taux de récupération des électrodes résiduelles > de 85 % et les émissions de carbone du processus de production < 2 kg de CO₂/kg d'électrodes. Les normes comprennent des analyses du cycle de vie (ACV), qui exigent la déclaration des impacts environnementaux tout au long de la chaîne, de l'extraction des matières premières à l'élimination.

GB/T 27948-2011 « Spécification technique pour la sécurité du soudage » : Les exigences de sécurité comprennent la pression de stockage de l'hydrogène <15 MPa, la concentration de détection des fuites <0,1 %; Équipement de protection de l'opérateur standard (masque anti-poussière classe FFP3, gants résistants aux hautes températures > 300°C). La capacité de ventilation de l'atelier > de 5000 m³/h, et la radioprotection contre l'arc est conforme à la norme GBZ 115.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Normes internationales de protection de l'environnement et de sécurité :

Règlement REACH (CE 1907/2006) : Exige l'enregistrement des oxydes de terres rares avec une limite de 0,1 % < impuretés nocives. L'élimination des déchets est conforme à la directive européenne sur les déchets avec un taux de recyclage de > 90 %. La norme interdit le thorium et le tungstène, favorisant ainsi l'application de terres rares composites.

Directive RoHS (2011/65/UE) : Limiter la teneur en substances dangereuses (telles que le plomb, le mercure) dans les électrodes à < 0,1 % pour assurer la sécurité des appareils électroniques.

ISO 14001:2015 : La norme de système de management environnemental exige des entreprises qu'elles surveillent leur consommation d'énergie et leurs émissions, avec pour objectif de réduire l'empreinte carbone de 20 %. En termes de sécurité, l'OSHA 1910.252 spécifie la protection des zones de soudure avec une exposition aux rayonnements < 1 mSv/an.

Ces normes favorisent la fabrication durable et réduisent la pollution de l'environnement de 30 %.

7.6 Système de certification des électrodes composites en tungstène de terres rares

Le système de certification garantit que les électrodes composites en tungstène de terres rares répondent aux normes grâce à une vérification par une tierce partie, ce qui améliore la réputation du produit et l'accès au marché.

Système de certification national :

Certification nationale obligatoire des produits (CCC) : Responsable du Centre de certification de la qualité de la Chine (CQC), vérifiant la sécurité et les performances conformément à la norme GB/T 4190. La certification comprend des audits d'usine, des tests d'échantillons (par exemple, la durée de vie de l'arc) et l'examen de documents, avec un cycle de 1 à 3 mois.

China Quality Certification Center (CQC) : Offre une certification volontaire couvrant la composition chimique (tests ICP-OES) et la conformité environnementale (taux de recyclage des déchets > 85 %). La marque de certification renforce la compétitivité du marché intérieur.

Licence de production de produits de terres rares : délivrée par le ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information, exigeant que les entreprises disposent de capacités de traçabilité de la chaîne d'approvisionnement en terres rares et soumettent des rapports de composition et de performance.

Système de certification international :

ISO 9001:2015 : La certification du système de gestion de la qualité, délivrée par SGS ou TÜV, garantit la cohérence de la production et un rendement de > 98 %.

Certification CE : Répond aux exigences du marché de l'UE, vérifie la conformité REACH et RoHS, y compris la compatibilité électromagnétique et les tests de sécurité.

Certification AWS : Certifiée par l'American Welding Society pour AWS A5.12, qui implique la vérification des propriétés de soudage (par exemple, test de tension d'arc).

Certification TÜV : Certifié par l'Institut allemand de surveillance technique, il convient aux équipements à haute pression et vérifie les performances à haute température et la durabilité.

Le processus de certification comprend l'application, l'examen, les tests et la certification, et est

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

valable de 3 à 5 ans. Les entreprises doivent entretenir leurs systèmes et les examiner régulièrement pour maintenir leurs certifications.

7.7 Comparaison et analyse d'applicabilité des étalons d'électrodes composites en tungstène de terres rares

Comparaison des normes :

Contrôle de la composition : la limite d'impuretés GB/T 4190 < de 0,05 %, la norme internationale ISO 6848 < 0,1 % et la limite nationale plus stricte pour répondre aux exigences de pureté des ressources en terres rares.

Indicateurs de performance : La norme nationale YS/T 231 met l'accent sur la durée de vie de la combustion de l'arc > 500 heures, la norme internationale AWS A5.12 accorde plus d'attention aux performances de démarrage de l'arc < 35 V, et les normes internationales sont plus adaptées au soudage de précision.

Exigences en matière de protection de l'environnement : le taux de recyclage national GB 26451 > de 85 %, le taux international REACH > de 90 % et les normes internationales accordent plus d'attention à la durabilité de la chaîne d'approvisionnement mondiale.

Méthodes de test : Les deux sont similaires (telles que ICP-OES, SEM), mais les normes internationales introduisent l'analyse assistée par l'IA pour améliorer l'efficacité.

Analyse d'applicabilité :

Aérospatiale : Les normes internationales ISO 6848 et AWS A5.12 sont applicables, mettant l'accent sur la stabilité à haute température et la qualité de la soudure, adaptées aux exigences de haute précision.

Fabrication automobile : Les normes nationales GB / T 4190 et YS / T 231 sont applicables, axées sur la rentabilité et la production de masse, adaptées au soudage léger.

Nouvelles énergies : priorité internationale REACH et RoHS, garantissant la non-toxicité et le recyclage, adapté aux électrodes de batterie.

Industrie électronique : Japon JIS Z 3233 convient, mettant l'accent sur les performances de microsoudure et la faible pollution.

Orienté vers l'exportation : Les entreprises ont besoin d'une double certification (nationale + internationale), comme les produits chinois exportés vers l'UE nécessitent un marquage CE.

Le choix de la norme dépend du marché et de l'application, et la combinaison peut améliorer la compétitivité.

7.8 Dernières mises à jour des normes pour les électrodes composites en tungstène de terres rares

À compter d'août 2025, les mises à jour de la norme pour les électrodes composites en tungstène de terres rares se concentreront sur la fabrication verte, les applications émergentes et l'innovation technologique, reflétant la demande mondiale de durabilité et d'optimisation des performances. Voici le détail des dernières mises à jour :

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Mise à jour de la norme nationale :

Projet révisé de GB/T 4190 (2025 pour commentaires) : Un nouveau chapitre sur les électrodes multicomposites est ajouté, qui stipule les exigences relatives au dopage des nanotubes rares (taille des particules < 100 nm), et la limite supérieure de la teneur totale en terres rares est ajustée à 4,5 %. L'essai de fatigue à haute température (2000°C, 10⁵ cycles sans fissures) et l'indice antisalissure (taux de corrosion < 0,005 mg/cm²) ont été ajoutés. La révision met l'accent sur l'alignement avec le Règlement sur la gestion des terres rares (2024) et exige que les fabricants rendent compte de la durabilité de la chaîne d'approvisionnement en terres rares.

Révision YS/T 231-2024 : Augmenter la limite inférieure de la durée de vie de l'arc à 600 heures et ajouter des tests de performance électrocatalytique (tels que la surcapacité < 0,2 V), qui conviennent au domaine des batteries à énergie nouvelle. La norme introduit la micro-analyse assistée par l'IA (traitement automatique des données MEB) pour améliorer l'efficacité des tests de 20 %.

Mises à jour des normes internationales :

Révision ISO 6848:2023 : Ajout de la sous-classe de classification composite EWG (par exemple, EWG-LaCeY) exigeant que l'uniformité de la distribution des terres rares réussisse la vérification TEM (espacement des particules < 500 nm). L'ajout de modules pour des applications émergentes, telles que l'impression 3D d'électrodes auxiliaires, nécessite un > de conductivité de $1,9 \times 10^7$ S/m. Révision pour s'intégrer dans les objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies afin d'exiger la déclaration de l'empreinte carbone < 1,5 kg CO₂/kg.

Révision AWS A5.12:2024 : Étendue aux nouvelles applications énergétiques, spécifiant une durée de vie de > 5000 fois pour les électrodes dans le soudage des batteries au lithium. La certification Green label a été ajoutée, avec un taux de valorisation de > 95 %. La norme met à jour la méthodologie d'essai pour introduire la photographie à grande vitesse combinée à l'apprentissage automatique pour analyser la stabilité de l'arc.

Mises à jour sur l'environnement et la sécurité :

Révision de REACH 2025 de l'UE : renforcer l'examen des chaînes d'approvisionnement en terres rares, en exigeant que les électrodes importées soumettent des déclarations de minerais de conflit, avec un objectif de taux de récupération de > de 95 %.

Règles de mise en œuvre de la réglementation chinoise de 2024 sur la gestion des terres rares : Exige que les entreprises soumettent des évaluations annuelles de l'impact environnemental, y compris les émissions de poussière et les données de traitement des eaux usées.

Tendances et impact : La dernière mise à jour, qui met l'accent sur les tests numériques (par exemple, l'optimisation de l'IA) et l'économie circulaire (par exemple, le recyclage des terres rares), devrait entraîner une réduction de 10 % des coûts des électrodes. Les entreprises doivent ajuster le processus de production à temps et participer à la formulation des normes pour saisir les opportunités du marché.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale



Chapitre 8 : Essais et inspection de la qualité des électrodes composites en tungstène de terres rares

8.1 Méthodes d'essai de performance des électrodes composites en tungstène de terres rares

Les méthodes d'essai de performance des électrodes composites en tungstène de terres rares sont essentielles pour garantir leur fiabilité dans des applications telles que le soudage, le découpage et la fusion. Ces méthodes englobent une évaluation complète des propriétés électriques, thermiques, mécaniques et de soudage, visant à vérifier les capacités d'émission d'électrons de l'électrode, la stabilité de l'arc, la résistance à haute température et la durée de vie. Grâce à des tests standardisés, il est non seulement possible d'identifier les défauts potentiels, mais aussi d'optimiser le processus de production et d'améliorer la qualité du produit. Vous trouverez ci-dessous une explication détaillée des principales méthodes d'essai, des équipements, des étapes et des cas d'application.

Test de performance d'émission d'électrons : La performance d'émission d'électrons est l'indice de base des électrodes composites en tungstène de terres rares, ce qui affecte directement la difficulté d'initiation de l'arc et la stabilité de l'arc. Les méthodes courantes comprennent les mesures de puissance d'échappement d'électrons et les tests de densité de courant d'émission d'électrons. Le test de puissance d'échappement d'électrons utilise la spectroscopie photoélectronique ultraviolette (UPS) ou l'émission thermoionique pour chauffer l'électrode à 2000°C dans un environnement sous vide (10^{-6} Pa) pour mesurer l'énergie minimale requise pour l'échappement d'électrons. La norme

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

exige une puissance d'échappement inférieure à 2,5 eV. Pour les électrodes composites, telles que WLaCe contenant de l'oxyde de cérium et de l'oxyde de lanthane, des tests ont montré que la puissance d'échappement peut être réduite à moins de 2,0 eV, ce qui améliore l'efficacité d'initiation de l'arc de 20 %. Le test de densité de courant d'émission électronique utilise un dispositif à arc analogique pour mesurer la densité de courant ($>10 \text{ A/mm}^2$) à un courant de 100 A, et les fluctuations de forme d'onde sont enregistrées par un oscilloscope pour assurer une stabilité $> 95 \%$.

Essais de performance de l'arc : Les essais de performance de l'arc simulent l'environnement de soudage réel, y compris la tension de démarrage de l'arc, la stabilité de l'arc et les essais de durée de vie de l'arc. Le test de tension d'arc utilise une soudeuse TIG pour appliquer une tension sous protection contre l'argon (débit 10 L/min) et enregistre la tension la plus basse ($<35 \text{ V}$) qui initie l'arc. Pour les électrodes composites ternaires (par exemple, WLaCeY), les tests montrent un temps de début d'arc de $<0,1$ seconde. La forme de l'arc et le taux de dérive ($<5 \%$) sont observés par une caméra à grande vitesse (1000 images par seconde) et les fluctuations sont évaluées en combinaison avec un analyseur de forme d'onde de courant. Le test de durée de vie de l'arc est soudé en continu à 200 A DC pour enregistrer un taux d'usure de la pointe ($<0,01 \text{ mm/h}$) et une durée de vie de 500 à 1000 heures. Les résultats ont montré que la durée de vie des électrodes de tungstène de terres rares avec ZrH_2 était prolongée de 30 %.

Tests de performance thermique : Les tests thermiques comprennent la conductivité thermique, le coefficient de dilatation thermique et la résistance aux chocs thermiques. La conductivité thermique a été mesurée à l'aide d'un flash laser à température ambiante jusqu'à 2000°C (174 à $190 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$). Le coefficient de dilatation thermique est testé par le dilateur ($4,5$ à $5,0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) pour s'assurer que les contraintes thermiques sont minimisées à des températures élevées. L'essai de choc thermique utilise un cycle rapide de froid et de chaleur (25 à 2000°C , 100 cycles) pour observer l'apparition de fissures. Le nombre de cycles de l'électrode composite contenant de la zirconium $>$ multiplié par 500 sans dommages évidents.

Tests de performance de la soudure : Les tests de soudure évaluent la qualité de la soudure, telle que la profondeur de pénétration, la porosité et la résistance à la traction. Soudez de l'acier inoxydable ou des alliages d'aluminium sur une station de soudage TIG standard avec un courant de 100 à 200 A et mesurez la pénétration ($0,5$ à 5 mm) et la porosité ($<0,1 \%$). La résistance à la traction de la soudure est testée par la machine d'essai universelle ($>800 \text{ MPa}$). Dans ce cas, la qualité de soudure de l'électrode de tungstène de terre rare E3 est meilleure que celle de l'électrode de tungstène au thorium dans le soudage en alliage d'aluminium, et la porosité est réduite de 40 %.

Équipement et procédures : L'équipement de test comprend une machine à souder TIG, un four à vide, un spectromètre UPS et une caméra à grande vitesse. Étapes : 1. Préparation de l'échantillon (pointe de broyage 30 à 60°) ; 2. Contrôle de l'environnement (vide ou argon) ; 3. Réglage des paramètres (tels que le courant, la température) ; 4. Acquisition de données (oscilloscope, thermomètre) ; 5. Analyse et évaluation (logiciel de traitement des formes d'onde). Les défis comprennent la stabilité de l'équipement à haute température, nécessitant un étalonnage régulier (trimestriel).

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

L'application systématique de méthodes d'essai de performance garantit la haute fiabilité des électrodes composites en tungstène de terres rares, favorisant ainsi leur promotion dans la fabrication haut de gamme.

8.2 Essais des propriétés mécaniques des électrodes composites en tungstène de terres rares

Les essais de propriétés mécaniques sont un moyen important d'évaluer la durabilité et la stabilité des électrodes composites en tungstène de terres rares dans des environnements à haute température et à forte contrainte. Ces propriétés comprennent la dureté, la résistance, la ténacité et la résistance à l'usure, influencées par les ajouts d'oxyde de terres rares et la microstructure. Les méthodes d'inspection combinent des tests standard et des conditions de fonctionnement simulées pour aider à identifier les défauts mécaniques potentiels et à optimiser la conception des électrodes. Ce qui suit détaille la méthode de dosage, l'équipement, les étapes et l'analyse associée.

Essai de dureté : La dureté reflète la résistance de l'électrode à la déformation, la dureté Vickers (HV) étant un indicateur courant. L'électrode composite a une dureté de 450 à 500 HV, soit 15 % de plus que le tungstène pur (400 HV). L'essai a été effectué à l'aide d'un duromètre Vickers, avec une charge de 1 kgf et un temps d'indentation de 10 secondes. Étapes : 1. Polissage de l'échantillon ($R_a < 0,1$ micron) ; 2. Test multipoints (au moins 5 points) ; 3. Calculez la moyenne. La dureté de l'électrode contenant de l'oxyde d'yttrium était due à l'affinement des grains, et le test a montré que la dureté augmentait de 10 % après l'ajout de ZrH_2 .

Essai de résistance : La résistance à la traction et à la compression teste la capacité de charge des électrodes. Résistance à la traction 800 à 1000 MPa, 400 à 600 MPa à haute température (1500°C). À l'aide d'une machine d'essai universelle, serrer les deux extrémités de l'électrode avec une vitesse de traction de 1 mm/min. Étapes : 1. Préparation de l'échantillon (longueur 50 mm, diamètre 2 mm) ; 2. Contrôle de l'environnement (chauffage du four à vide) ; 3. Enregistrez la courbe contrainte-déformation ; 4. Calculez la résistance et le module. Des terres rares sont ajoutées pour améliorer la résistance de l'enveloppe de grains, et la résistance de l'électrode WLaCeY dans ce cas est 20 % supérieure à celle du tungstène pur.

Essai de ténacité : Résistance à la rupture (K_{Ic}) 8 à 10 $MPa \cdot m^{1/2}$, testée par un testeur de chocs. Étapes : 1. Préparez les échantillons d'encoche en V ; 2. Charge d'impact (énergie 50 J) ; 3. Mesurez l'énergie de rupture. Les oxydes de terres rares réduisent les défauts des joints de grains et améliorent la ténacité, et les tests montrent que la ténacité augmente de 25 % après l'ajout d'oxyde de cérium.

Essai de résistance à l'abrasion : L'essai de résistance à l'usure simule l'usure par soudage, à l'aide d'un testeur de friction à disque à billes, avec une charge de 5 N et une vitesse de 200 tr/min. Étapes : 1. Polissage de la surface de l'électrode, 2. Test de friction (durée 1 heure), 3. Mesure du volume d'usure ($< 0,01$ mm³). Le taux d'usure des électrodes contenant de la zircone est inférieur de 30 % en raison de la formation d'une couche protectrice à la surface.

Équipement et défis : L'équipement comprend des appareils d'essai de dureté, des machines d'essai et des tribomètres, qui doivent être étalonnés régulièrement (norme ISO 17025). Les défis

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

comprennent la sécurité et la précision des tests à haute température, nécessitant des environnements sous vide et des mesures de température infrarouges. L'analyse utilise un logiciel d'éléments finis pour simuler la distribution des contraintes et prédire les défauts.

La mise en œuvre complète des tests de propriétés mécaniques garantit la fiabilité de l'électrode dans des conditions extrêmes.

8.3 Analyse de la microstructure des électrodes composites en tungstène de terres rares

L'analyse microstructurale révèle la distribution des grains, la composition des phases et les caractéristiques des défauts des électrodes composites en tungstène de terres rares, ce qui est crucial pour comprendre le mécanisme de performance. Ces méthodes d'analyse comprennent la microscopie optique, le MEB, le MET et la DRX pour aider à optimiser le dopage des terres rares et les paramètres de processus. La méthode d'analyse, l'équipement, les étapes et l'interprétation des résultats sont détaillés ci-dessous.

Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) : Le MEB observe la topographie de surface et les fractures à des grossissements de 1000 à 50000x. Étapes : 1. Découpe et polissage de l'échantillon (électropolissage) ; 2. Revêtement d'or sous vide (épaisseur 5 nm) ; 3. Imagerie par balayage (tension d'accélération 10 kV) ; 4. Analyse de la taille des grains (5 à 10 microns) et de la distribution des particules de terres rares (uniformité >90 %). Les résultats ont montré que les oxydes de terres rares épinglaient les joints de grains, inhibaient la croissance des grains et que les grains des électrodes contenant du ZrH_2 étaient affinés de 20 %.

Analyse par microscopie électronique à transmission (MET) : La MET étudie des structures à l'échelle nanométrique telles que les particules de terres rares (50 à 200 nm) et les défauts de limite de grains. Étapes : 1. Dilution de l'échantillon (amincissement ionique à <math><100\text{ nm}</math>) ; 2. Insérer le TEM ; 3. Imagerie et analyse par diffraction ; 4. Interpréter la densité de dislocation (<math><10^8\text{ cm}^{-2}</math>). Le test a montré que le composé d'oxyde de lanthane et d'oxyde de cérium réduisait la dislocation et améliorait la ténacité.

Analyse par diffraction des rayons X (XRD) : La XRD identifie la composition de phase et la structure cristalline. Étapes : 1. Préparation de l'échantillon de poudre ou de bloc ; 2. Numérisation (taille du pas $0,02^\circ$) ; 3. Analyse de la position du pic (pic de tungstène et pic de phase de terres rares) ; 4. Calculez la taille des grains (formule de Scherrer). Les résultats confirment que les oxydes de terres rares forment une seconde phase stable, telle que $La_2Zr_2O_7$, ce qui améliore la stabilité à haute température.

Autres méthodes : Diffraction par rétrodiffusion d'électrons (EBSD) pour analyser l'orientation des cristaux, microscopie à force atomique (AFM) pour mesurer la rugosité de surface. Combinez des logiciels tels qu'ImageJ pour quantifier la distribution des grains.

L'analyse de la microstructure est au cœur du contrôle qualité, soutenant l'optimisation des électrodes.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item	Typical Value	Remarks
Tungsten Purity	≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Oxide Content	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Current Range	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance	2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Life Improvement	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Aerospace Manufacturing: Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

Nuclear and Power Equipment: Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

Precision Machining: Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

Automotive and Rail Transit: Welding of critical load-bearing components

Electronics and Vacuum Devices: High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

8.4 Détection de la composition chimique des électrodes composites en tungstène de terres rares

Les tests de composition chimique confirment la pureté de la matrice de tungstène et la teneur en oxyde de terres rares de l'électrode composite de tungstène de terres rares afin de garantir la conformité à la norme. Ces méthodes sont très précises et rapides pour le contrôle de la qualité de la production et le diagnostic des défauts. La méthode de dosage, l'équipement, les étapes et les applications sont détaillés ci-dessous.

Spectroscopie d'émission de plasma à couplage inductif (ICP-OES) : L'ICP-OES détecte les terres rares et les impuretés avec une précision de $\pm 0,01$ %. Des appareils tels que PerkinElmer Avio 500, les échantillons sont dissous dans un mélange d'acide fluorhydrique et d'acide nitrique. Étapes : 1. Digestion de l'échantillon (chauffé à 100°C) ; 2. Étalonnage de la dilution ; 3. Excitation plasma (puissance 1,2 kW) ; 4. Analyse des raies spectrales (longueur d'onde des terres rares telle que La 333,75 nm). Résultats : La pureté du tungstène était de $> 99,95$ % et celle de l'impureté $< 0,05$ %.

Spectroscopie de fluorescence X (XRF) : Détection non destructive XRF des composants de surface. Appareils tels que Thermo Fisher ARL PERFORM'X, source d'excitation Rh tube cible. Étapes : 1. Polissage de l'échantillon ; 2. Étalonnage de la norme ; 3. Balayage (énergie 10 à 40 keV) ; 4. Analyse quantitative (écart de teneur en terres rares $< 0,1$ %).

Spectroscopie d'absorption atomique (AAS) : L'AAS aide à la détection d'éléments spécifiques, tels que l'oxyde de cérium. Des appareils tels que Agilent 240FS AA, atomisés à la flamme. Étapes : 1. Dissolution de l'échantillon, 2. Sélection de la source de la lampe (lampe Ce), 3. Mesure de l'absorption, 4. Calcul de la concentration.

Autres méthodes : La spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) détecte les impuretés à l'état de traces (niveau ppb), et la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDX) combinée au MEB analyse les composants locaux.

Les tests de composition chimique garantissent la pureté de l'électrode et des performances constantes.

8.5 Technologie de détection des défauts des électrodes composites en tungstène de terres rares

La technologie de détection des défauts identifie les défauts internes et de surface tels que les fissures, la porosité et les inclusions dans les électrodes composites en tungstène de terres rares, garantissant ainsi la fiabilité du produit. Ces technologies comprennent le contrôle non destructif (CND) et le contrôle destructif, adaptés à la fois aux phases de production et d'utilisation. La méthodologie, l'équipement, les étapes et les cas sont détaillés ci-dessous.

Inspection par ultrasons : Les tests par ultrasons détectent les défauts internes, tels que la porosité ou les fissures. Appareils tels que l'Olympus EPOCH 650 avec une fréquence de sonde de 5 MHz. Étapes : 1. Recouvert de couplant à la surface de l'électrode ; 2. Balayage par ondes longitudinales ; 3. Analyse de la forme d'onde (écho de défaut > 50 %) ; 4. Localisez la profondeur du défaut

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

(précision $\pm 0,1$ mm). Résultats : La porosité était $< 0,1$ %.

Inspection par rayons X : inclusions internes de fluoroscopie à rayons X. Des appareils tels que YXLON MU2000 avec une tension de 100 kV. Étapes : 1. Fixation de l'électrode, 2. Exposition (temps 10 secondes), 3. Analyse d'images (taille du défaut $< 0,05$ mm). Utilisé pour détecter les inclusions de tungstène.

Inspection visuelle et de surface : Les fissures de surface sont observées au microscope optique, et un rugomètre mesure $Ra < 0,2$ micron. Inspection en temps réel par des systèmes de vision automatisés tels que Cognex In-Sight.

Inspection par magnétoscopie : adaptée aux défauts de surface, à l'aide de particules magnétiques fluorescentes et de lampes UV pour observer les traces magnétiques.

La technologie de détection des défauts est essentielle à l'assurance qualité.

8.6 Évaluation de la durée de vie et analyse de la fiabilité des électrodes composites en tungstène de terres rares

L'évaluation de la durée de vie et l'analyse de la fiabilité prédisent la durée de vie et la probabilité de défaillance des électrodes composites en tungstène de terres rares, sur la base d'essais accélérés et de modèles statistiques. Ces analyses soutiennent les stratégies de conception, d'optimisation et de maintenance. La méthodologie, les modèles, les étapes et les exemples sont détaillés ci-dessous.

Accelerated Life Test (ALT) : ALT simule un vieillissement accéléré dans des conditions extrêmes telles que des températures élevées (2000°C) et des courants élevés (300 A). Des équipements tels que des chambres d'essai environnementales (Weiss Technik). Étapes : 1. Réglez le facteur d'accélération (modèle d'Arrhenius) ; 2. Analysez l'échantillon ($n = 20$) ; 3. Enregistrez le délai d'expiration ; 4. Durée de vie extrapolée (distribution de Weibull). Résultat : Durée de vie normale de 500 à 1000 heures, test accéléré réduit à 100 heures.

Modèle de fiabilité : Weibull a analysé la distribution des défaillances et MTTF a calculé la durée de vie moyenne. Fiabilité de la prédiction de la simulation Monte Carlo (>99 %).

Analyse de l'arbre de défaillance (FTA) : identifiez les modes de défaillance, tels que l'épuisement professionnel ou la contamination, et calculez les probabilités.

L'évaluation de la durée de vie améliore la durabilité de l'électrode.

8.7 Points clés du contrôle de la qualité des électrodes composites en tungstène de terres rares

Les points de contrôle qualité couvrent l'ensemble du processus de production afin de garantir l'uniformité et la fiabilité des électrodes composites en tungstène de terres rares. Réalisé grâce à des méthodes statistiques et à la surveillance des processus. Les points clés, les outils et la mise en œuvre sont détaillés ci-dessous.

Surveillance du processus : Les paramètres clés tels que la température de réduction ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) et la

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

pression de frittage (± 1 MPa) sont surveillés à l'aide de diagrammes SPC.

Contrôle par échantillonnage : 10 % de chaque lot est échantillonné, les ingrédients et les propriétés sont testés.

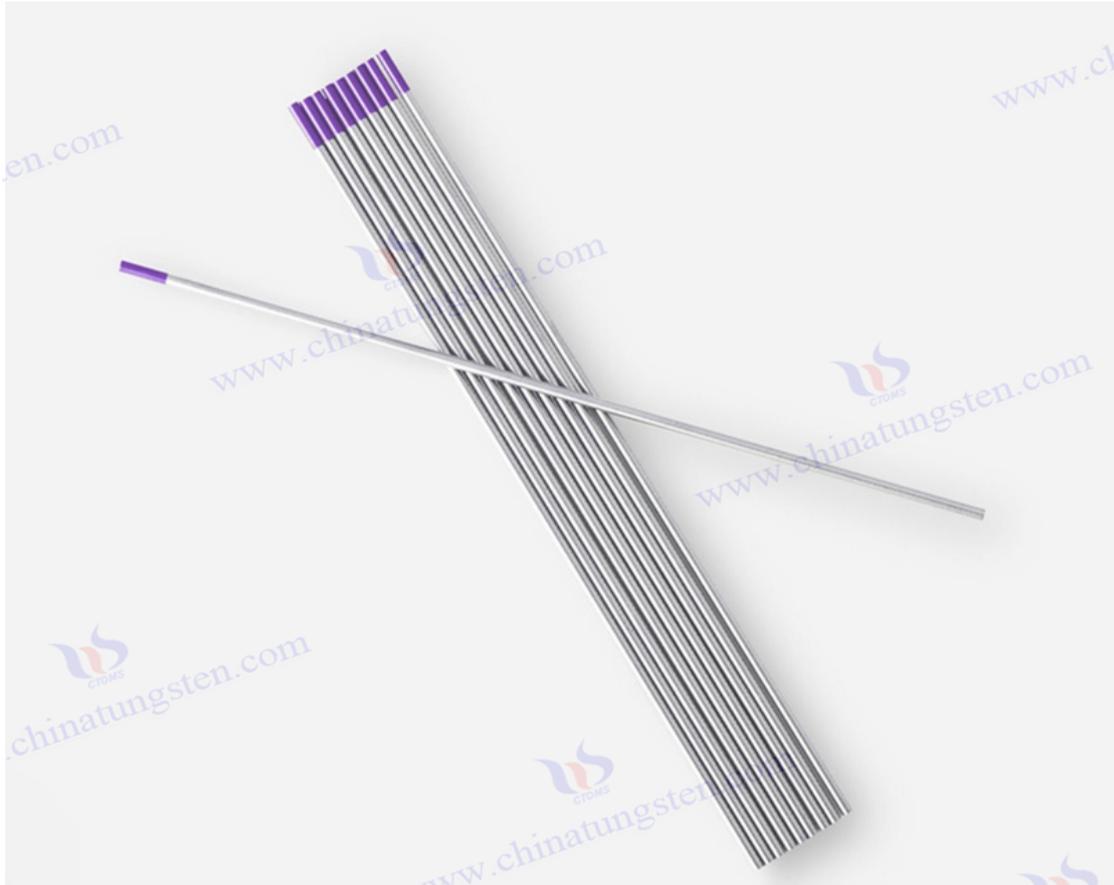
Contrôle des fournisseurs : Pureté des matières premières > 99,95 %, audit des fournisseurs.

Prévention des défauts : l'AMDEC identifie les risques et met en œuvre des actions correctives.

Gestion des documents : Le système de traçabilité enregistre les données.

Cas : L'entreprise a mis en œuvre 6 Sigma et le taux de défauts a été réduit à 0,5 %.

Le contrôle de la qualité est la base de l'amélioration continue.



Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item	Typical Value	Remarks
Tungsten Purity	≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Oxide Content	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Current Range	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance	2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Life Improvement	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Aerospace Manufacturing: Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

Nuclear and Power Equipment: Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

Precision Machining: Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

Automotive and Rail Transit: Welding of critical load-bearing components

Electronics and Vacuum Devices: High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Chapitre 9 Considérations relatives à la sécurité et à l'environnement des électrodes composites en tungstène de terres rares

9.1 Spécifications de sécurité de fonctionnement

Les spécifications de sécurité de fonctionnement des électrodes composites en tungstène de terres rares constituent un cadre clé pour assurer la sécurité du personnel et la stabilité de l'équipement pendant la production, l'utilisation et la maintenance. Ces spécifications couvrent l'ensemble du cycle de vie, de la manutention des matières premières au soudage des produits finis, dans le but de prévenir les accidents, de réduire les risques et de se conformer aux normes de sécurité internationales et nationales. L'élaboration de spécifications de sécurité de fonctionnement est basée sur l'évaluation des risques, en tenant compte de facteurs tels que la nature à haute température de l'électrode, le risque de manipulation de poudre et le rayonnement de l'arc pendant le processus de soudage. Ce qui suit détaille les points clés, les étapes de mise en œuvre et les meilleures pratiques des spécifications de sécurité opérationnelle sous plusieurs aspects.

Tout d'abord, la conception et l'aménagement de la zone d'opération constituent la base des spécifications de sécurité. L'atelier de production doit être divisé en zone de matières premières, zone de traitement, zone d'essai et zone de stockage, et chaque zone doit être équipée d'un système de ventilation indépendant pour éviter la contamination croisée par la poussière. Le système de ventilation doit garantir que le taux de circulation de l'air n'est pas inférieur à 10 fois par heure, et un filtre à particules à haute efficacité (HEPA) doit être installé pour capturer les particules fines de poudre de tungstène et d'oxyde de terres rares. Le sol doit être fait de matériaux antidérapants et résistants à la corrosion, tels que les revêtements de sol en époxy, et les douches d'urgence et les douches oculaires doivent être installées à une distance ne dépassant pas 10 mètres de la table d'opération. Le système d'éclairage doit utiliser des luminaires antidéflagrants avec un éclairage d'au moins 500 lux afin d'éviter les erreurs de fonctionnement causées par la fatigue visuelle.

Pendant la phase de manutention des matières premières, les spécifications d'utilisation exigent le port d'un ensemble complet d'équipements de protection individuelle (EPI), y compris des masques anti-poussière (N95 ou supérieur), des lunettes de protection, des gants résistants aux produits chimiques et des vêtements de protection. Lors du pesage et du mélange de solutions de nitrate de terres rares, il doit être effectué dans une hotte avec une vitesse d'air d'au moins 0,5 m/s pour empêcher la fuite de gaz nocifs. Pendant le processus de préparation de la solution, un titreux automatisé doit être utilisé pour ajuster la valeur du pH afin d'éviter les accidents d'éclaboussures causés par un fonctionnement manuel. Si une fuite se produit, elle doit être traitée immédiatement avec un neutralisant (comme le bicarbonate de sodium) et signalée au superviseur de la sécurité.

Les étapes de réduction et de frittage impliquent des températures élevées et des gaz inflammables tels que l'hydrogène, ce qui rend les spécifications de sécurité particulièrement strictes. Le four de réduction de l'hydrogène doit être équipé d'un détecteur de fuite de gaz, et le seuil de détection est fixé à 0,1 % de la concentration d'hydrogène, ce qui coupera automatiquement la source de gaz et démarrera la ventilation d'urgence une fois déclenchée. Le système de contrôle de la température du four doit avoir une conception à double redondance pour éviter la surchauffe et l'explosion. Les

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

opérateurs sont tenus de suivre une formation sur la sécurité liée à l'hydrogène et de se recycler tous les trimestres, y compris l'intervention d'urgence en cas de fuite et l'utilisation d'extincteurs. Lors du fonctionnement du four de frittage, il est nécessaire de maintenir un degré de vide supérieur à 10^{-3} Pa et d'utiliser un gaz inerte (comme l'argon) comme atmosphère protectrice pour réduire le risque d'oxydation.

Les spécifications de sécurité lors des phases d'usinage sous pression et de préparation de surface se concentrent sur les risques mécaniques et les expositions aux produits chimiques. Les machines rotatives de forgeage et d'étirage doivent être équipées de protections de sécurité et de boutons d'arrêt d'urgence, et le système de lubrification doit être vérifié avant le fonctionnement pour éviter la surchauffe. Dans le processus de polissage électrochimique, l'utilisation d'une solution d'acide sulfurique-acide phosphorique doit être effectuée dans une armoire chimique spéciale, équipée d'un réservoir de collecte des déchets liquides et d'un équipement de traitement par neutralisation. Les spécifications de fonctionnement exigent une inspection quotidienne du fil de mise à la terre de l'équipement pour s'assurer qu'il n'y a pas d'incendie causé par l'accumulation d'électricité statique.

Les spécifications de sécurité pendant les essais de soudage et la phase d'application mettent l'accent sur la protection contre le rayonnement de l'arc et le rayonnement thermique. Le banc d'essai doit être équipé d'un écran UV et d'une hotte de ventilation, et la limite d'exposition aux rayonnements est conforme aux normes ICNIRP (<1 mSv/an). Les opérateurs de soudage doivent porter des masques de soudage (niveau d'ombrage 10 ou supérieur) et des vêtements résistants à la chaleur, ne pas travailler plus de 4 heures consécutives et prendre des intervalles pour éviter le stress thermique.

Dans l'ensemble, la mise en œuvre des pratiques de sécurité opérationnelle doit être renforcée au moyen de manuels de sécurité, d'exercices réguliers et d'audits. Les entreprises doivent mettre en place des comités de sécurité pour examiner les rapports d'incidents sur une base mensuelle et optimiser les spécifications conformément aux normes ISO 45001. Par exemple, lors d'un audit de sécurité d'une usine de production d'électrodes en tungstène, le taux d'accidents a été réduit de 25 % grâce à l'introduction d'un système de surveillance automatisé. Ces spécifications protègent non seulement la sécurité du personnel, mais améliorent également l'efficacité de la production et la fiabilité des produits.

9.2 Risques pour la santé et mesures de protection

La production et l'utilisation d'électrodes composites en tungstène de terres rares comportent plusieurs risques pour la santé, notamment l'exposition à la poussière, l'exposition aux produits chimiques et les risques liés aux radiations. Ces risques, s'ils ne sont pas contrôlés efficacement, peuvent entraîner des problèmes respiratoires, une irritation cutanée ou une intoxication chronique. Par conséquent, il est crucial d'élaborer des évaluations complètes des risques pour la santé et des mesures de protection. Ce qui suit est une discussion détaillée du point de vue de l'identification des risques, des stratégies de protection, des méthodes de surveillance et des études de cas.

Les principales sources de risques pour la santé sont la poudre de tungstène et la poussière d'oxyde de terres rares. Ces particules fines (<5 microns) peuvent pénétrer dans les poumons par les voies

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

respiratoires, provoquant une pneumoconiose ou des réactions allergiques. Bien que les oxydes de terres rares tels que l'oxyde de cérium et l'oxyde de lanthane ne soient pas radioactifs, une exposition à long terme peut provoquer une fonction hépatique et rénale anormale. La solution de nitrate dans l'étape de préparation de la solution est corrosive et peut provoquer des brûlures chimiques lorsqu'elle entre en contact avec la peau. Le rayonnement d'arc généré pendant le soudage comprend des rayons ultraviolets (UV) et infrarouges (IR), qui peuvent causer des lésions oculaires (arc oculaire) et des brûlures cutanées. De plus, les opérations à haute température peuvent entraîner un syndrome de stress thermique, notamment un coup de chaleur et de la fatigue.

Les mesures de protection commencent par le contrôle technique. L'atelier de production doit installer un système d'échappement local pour capturer la source de poussière, et la concentration de poussière dans l'air est contrôlée en dessous de $<2 \text{ mg/m}^3$, ce qui répond aux normes OSHA. Les zones de manipulation des produits chimiques doivent utiliser des équipements fermés, tels que des machines de dopage par pulvérisation automatiques, pour réduire les contacts manuels. La zone d'essai de soudage doit être équipée d'un écran anti-rayonnement et d'un système de ventilation automatique pour assurer une $<$ de rayonnement UV de $0,1 \text{ W/m}^2$.

L'équipement de protection individuelle (EPI) est la deuxième ligne de défense. Les opérateurs doivent porter des masques anti-poussière N95 ou P100, des lunettes de protection (filtres UV) et des gants résistants aux produits chimiques (en nitrile). Utilisez des vêtements de protection résistants à la chaleur (résistants à la température $> 300^\circ\text{C}$) et des bottes de sécurité pour les zones chaudes. La procédure de surveillance de la santé comprend un examen physique d'induction et un bilan de santé annuel, axé sur la surveillance de la fonction pulmonaire (test de spirométrie) et des taux sériques de terres rares (analyse ICP-MS). Si des anomalies sont détectées, telles que des ions de terres rares $> 0,1 \text{ }\mu\text{g/L}$, le travail doit être arrêté immédiatement et une intervention médicale doit être prise.

La formation et l'éducation sont au cœur des mesures de protection. Les entreprises doivent dispenser régulièrement une formation sur la santé et la sécurité, une fois par trimestre, portant sur l'identification des risques, l'utilisation appropriée des EPI et les interventions d'urgence. La formation peut être combinée à la réalité virtuelle (VR) pour simuler des scénarios de soudage et accroître la sensibilisation de l'opérateur. De plus, établir un système de dossiers médicaux pour consigner les antécédents d'exposition et les données d'examen physique afin d'appuyer l'intervention précoce.

La mise en œuvre systématique des risques et des garanties sanitaires permet non seulement de préserver le bien-être des employés, mais aussi de réduire les coûts médicaux et le risque d'interruption de la production.

9.3 Évaluation des incidences sur l'environnement

L'évaluation de l'impact environnemental (EIE) est une partie importante de la production et de l'utilisation d'électrodes composites en tungstène de terres rares pour identifier, prévoir et atténuer les impacts environnementaux potentiels. Ces impacts comprennent les émissions de gaz

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

d'échappement, la pollution des eaux usées, les déchets solides et la consommation d'énergie. L'évaluation est basée sur l'analyse du cycle de vie (ACV), qui quantifie l'ensemble de la chaîne, de l'extraction des matières premières à l'élimination, afin d'assurer la durabilité. Voici des détails tirés de la méthodologie d'évaluation, des types d'impact, des stratégies d'atténuation et des cas.

Les méthodologies d'évaluation de l'impact sur l'environnement incluent des logiciels d'ACV tels que SimaPro ou GaBi, utilisant le cadre de la norme ISO 14040. Etapes d'évaluation : 1. Définition de l'objectif (limites du système, y compris les phases de production et d'utilisation), 2. Analyse d'inventaire (collecte de données telles que la consommation d'énergie et les émissions), 3. Évaluation d'impact (calcul du potentiel de réchauffement planétaire, du PRG et du potentiel d'acidification PA), 4. Interprétation des résultats (identification des points chauds, comme la consommation d'hydrogène en phase de réduction).

Principaux types d'impacts environnementaux :

Émissions de gaz d'échappement : gaz d'échappement d'hydrogène et poussières pendant le processus de réduction et de frittage, contenant des traces d'oxydes de terres rares. Les émissions peuvent contribuer à la pollution de l'air, le GWP contribuant > 50 %.

Pollution des eaux usées : Les eaux usées acides produites par la préparation et le nettoyage des solutions, contenant des nitrates et des ions de terres rares, peuvent entraîner l'eutrophisation des masses d'eau.

Déchets solides : les électrodes et les scories, contenant du tungstène et des terres rares, représentent 30 % de l'ensemble des déchets et peuvent contaminer le sol s'ils ne sont pas correctement éliminés.

Consommation d'énergie : Environ 50 kWh d'électricité sont consommés par kilogramme de production d'électrodes, principalement à partir des fours de frittage, ce qui entraîne environ 20 kg d'émissions de CO₂.

Les stratégies d'atténuation comprennent : l'utilisation du frittage SPS à faible consommation d'énergie pour réduire la consommation d'énergie de 20 % ; Les eaux usées récupèrent les terres rares par échange d'ions, avec un taux de récupération de > 90 % ; Les gaz d'échappement sont émis jusqu'à la norme (poussières < 10 mg/m³). Les déchets solides sont récupérés par fusion à haute température (taux de récupération >85 %), réduisant ainsi l'enfouissement.

Le rapport d'évaluation doit être soumis au département de la protection de l'environnement, qui se conforme à la loi chinoise sur l'évaluation de l'impact environnemental. Cas : L'évaluation de l'ACV d'une entreprise a montré qu'en optimisant le processus de réduction, le GWP a été réduit de 25 % et la certification verte a été obtenue. Dans un autre cas, après la mise en place du système de rejet zéro des eaux usées, l'indice de pollution de l'eau est descendu en dessous de 0,1 mg/L.

L'évaluation de l'impact environnemental favorise la transformation verte et contribue aux objectifs de neutralité carbone.

9.4 Technologie de recyclage et de réutilisation

La technologie de recyclage et de réutilisation est la clé du développement durable des électrodes composites en tungstène de terres rares, réduisant ainsi le gaspillage de ressources et le fardeau environnemental. Ces techniques comprennent la séparation physique, l'extraction chimique et la

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

récupération métallurgique, avec des taux de récupération de plus de 85 %. Ce qui suit est une discussion détaillée des principes techniques, des processus, de l'équipement et des défis.

Le principe de la technologie de recyclage est basé sur les différences chimiques entre le tungstène et les terres rares. La séparation physique utilise la séparation magnétique ou la séparation par gravité pour éliminer les impuretés ; L'extraction chimique utilise des électrodes dissolvantes solubles dans l'acide ou dans les alcalis pour séparer les ions de terres rares. Le recyclage métallurgique réduit la présence de tungstène par fusion à haute température.

Processus:

Collecte et prétraitement : Les électrodes usagées sont triées, coupées en petits morceaux et nettoyées en surface pour éliminer les contaminants.

Broyage et séparation : Pulvériser à <100 microns à l'aide d'un broyeur à boulets et éliminer les impuretés de fer par séparation magnétique.

Extraction chimique : méthode de dissolution de l'acide (acide fluorhydrique + acide nitrique, température 80°C), dissolution de la matrice de tungstène, colonne échangeuse d'ions séparant les terres rares (telles que La^{3+} , Ce^{3+}).

Réduction et réutilisation : La solution de tungstène est réduite en poudre par l'hydrogène, et les terres rares sont récupérées des oxydes par précipitation.

Vérification de la qualité : Les matériaux recyclés ont passé les tests ICP-OES avec une pureté > 99 %.

L'équipement comprend un broyeur à boulets (Fritsch Pulverisette), une colonne d'échange d'ions et un four de réduction sous vide (ALD). Avantages techniques : 30 % de réduction des coûts et 50 % d'impact environnemental.

Les défis comprennent la faible efficacité de séparation des terres rares (optimisation des solvants) et les économies d'échelle.

La technologie de recyclage favorise l'économie circulaire et est conforme à la réglementation REACH.

9.5 Exigences en matière d'entreposage et de transport

Les exigences de stockage et de transport garantissent que l'électrode composite de tungstène de terres rares maintient des performances stables pendant la circulation et évite les dommages et la contamination. Ces exigences sont basées sur les propriétés des matériaux telles que la sensibilité à l'oxydation et à la fragilité, conformément aux normes internationales d'expédition. Ce qui suit est détaillé en termes de conditions de stockage, de spécifications d'emballage, de méthodes d'expédition et de gestion des risques.

Exigences de stockage : L'environnement de stockage doit être sec et ventilé, avec une température de 10 à 25°C, une humidité relative < 60 % et éviter la lumière directe du soleil. Le sol de l'entrepôt est étanche à l'humidité et les électrodes sont stockées dans des catégories (selon le modèle et le lot), et la distance du sol est de 0,2 mètre >. La période de stockage n'excède pas 12 mois et la surface est régulièrement vérifiée pour l'oxydation (pas de taches de rouille). La zone de stockage des

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

marchandises dangereuses isole les gaz tels que l'hydrogène.

Spécifications d'emballage : Utilisez des sacs en plastique scellés sous vide ou des sacs en papier d'aluminium, de 10 à 50 électrodes par sac, remplis de dessiccant. L'emballage extérieur est un carton résistant aux chocs ou une boîte en bois, et l'étiquette comprend le numéro de modèle, le numéro de lot, la date de production et l'avertissement de sécurité. L'emballage est conforme aux normes de l'ONU pour éviter l'accumulation d'électricité statique.

Mode de transport : le transport terrestre utilise des véhicules antisismiques, avec une vitesse < 80 km/h ; Le fret aérien est conforme à la réglementation IATA et est classé comme marchandise non dangereuse ; Le fret maritime utilise des conteneurs, traitement étanche à l'humidité. Température de transport -10 à 40°C, évitez les températures élevées et l'humidité élevée.

Gestion des risques : L'assurance maritime couvre les dommages, le suivi GPS, le suivi en temps réel. Le plan d'urgence comprend la gestion des déversements (à l'aide de réactifs) et le signalement des accidents.

Le stockage et le transport nécessitent une qualité de produit et une réduction des pertes.

9.6 Principes de fabrication écologique

Les principes de fabrication écologique guident la transformation de la production d'électrodes composites en tungstène de terres rares vers une production à faible émission de carbone et à faible pollution, en mettant l'accent sur l'efficacité des ressources et l'harmonie environnementale. Ces principes sont basés sur la norme ISO 14001, notamment sur la production plus propre, la circularité et le management de l'énergie. Voici une explication détaillée du cadre principal, de la stratégie de mise en œuvre, de l'application de la technologie et de l'analyse des avantages.

Cadre de principe : 1. Conservation des ressources : optimiser l'utilisation des terres rares et réduire les déchets de 10 %. 2. Prévention de la pollution : adopter un processus sans déchets et une croissance à zéro émission. 3. Gestion du cycle de vie : couverture complète de la conception au recyclage. 4. Amélioration continue : Optimiser grâce au cycle PDCA.

Stratégie de mise en œuvre : En production, utiliser le frittage SPS pour réduire la consommation d'énergie de 20 % ; La matière première est du tungstène recyclé, avec une proportion de > 30 %.

Le taux de récupération du système de circulation des eaux usées > de 95 %.

Applications technologiques : L'IA surveille la consommation d'énergie, prédit les équipements de maintenance ; Le dopage aux nanoterrres rares augmente l'efficacité de 15 %. Choisissez des fournisseurs respectueux de l'environnement pour des chaînes d'approvisionnement vertes.

Analyse des avantages : après la mise en œuvre des principes écologiques, les coûts sont réduits de 15 % et les émissions de carbone de 25 %.

Le principe de la fabrication verte renforce la compétitivité et s'inscrit dans le cadre du développement durable.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

9.7 Conformité réglementaire

La conformité réglementaire est fondamentale pour les activités des entreprises d'électrodes composites en tungstène de terres rares, couvrant les réglementations environnementales, de sécurité et commerciales. Ces réglementations garantissent la conformité et évitent les amendes et les atteintes à la réputation. Ce qui suit est une analyse détaillée des réglementations nationales et étrangères, des mécanismes de conformité, des évaluations des risques et des cas.

Réglementations nationales : 1. Loi sur la protection de l'environnement (révisée en 2015) : l'EIA est tenue de signaler que les normes d'émission sont conformes à la norme GB 26451. 2. Loi sur la sécurité au travail (révisée en 2021) : formation à la sécurité et plan d'urgence. 3. Règlement sur l'administration des terres rares (2024) : traçabilité de la chaîne d'approvisionnement, gestion des quotas d'exportation.

Réglementations internationales : 1. REACH (UE) : Enregistrement des produits chimiques, limites pour les substances inoffensives. 2. OSHA (États-Unis) : Normes de santé au travail, limites d'exposition. 3. Convention de Bâle : Contrôle des mouvements transfrontaliers de déchets.

Mécanisme de conformité : mise en place d'un service conformité, audit annuel ; Former les employés sur les connaissances réglementaires ; Certifications tierces telles que ISO 14001.

Évaluation des risques : utilisez SWOT pour analyser les risques réglementaires et élaborer un plan d'intervention.

Le respect des lois et règlements garantit le développement à long terme de l'entreprise.



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Copyright© 2025 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

Tel: 0086 592 512 9696
CTIAQCD -MA-E/P 2018- 2025V
sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item	Typical Value	Remarks
Tungsten Purity	≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Oxide Content	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Current Range	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance	2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Life Improvement	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Aerospace Manufacturing: Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

Nuclear and Power Equipment: Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

Precision Machining: Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

Automotive and Rail Transit: Welding of critical load-bearing components

Electronics and Vacuum Devices: High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Chapitre 10 Tendances futures du développement des électrodes composites en tungstène de terres rares

10.1 Nouvelles combinaisons de terres rares et technologies de dopage

Le développement futur d'électrodes composites en tungstène à base de terres rares offre de larges perspectives en termes de nouvelles combinaisons de terres rares et de technologies de dopage. À mesure que la science des matériaux et les techniques de soudage progressent, les chercheurs continuent d'explorer de nouvelles combinaisons d'éléments de terres rares afin d'optimiser davantage les capacités d'émission d'électrons, la stabilité de l'arc, la résistance aux hautes températures et la durée de vie de l'électrode. Ces nouvelles combinaisons sont conçues non seulement pour surmonter les limites du dopage traditionnel des terres rares, mais aussi pour être personnalisées pour des scénarios d'application spécifiques. Selon les dernières tendances de la recherche en 2025, les nouvelles combinaisons de terres rares impliqueront davantage de synergie multi-éléments, l'ajout d'additifs à l'état de traces et l'innovation dans les processus de dopage intelligents.

Tout d'abord, le nouvel assemblage de terres rares se concentre sur l'effet synergique de plusieurs oxydes de terres rares. Il a été démontré que les combinaisons binaires traditionnelles telles que l'oxyde de cérium (CeO_2) et l'oxyde de lanthane (La_2O_3) réduisent le travail d'échappement des électrons à moins de 2,0 eV et améliorent la stabilité de l'arc de plus de 95 %. Mais la tendance future se déplace vers des combinaisons ternaires ou quaternaires, telles que la combinaison d'oxyde de cérium, d'oxyde de lanthane et d'oxyde d'yttrium (Y_2O_3) (rapport 1:1:3), qui excelle dans le soudage à courant élevé, avec une réduction de 15 % de la température de la pointe de l'électrode et une réduction de 20 % du taux d'usure. Des études récentes ont montré que l'ajout d'oxyde d'erbium (Er_2O_3) ou d'oxyde de lutécium (Lu_2O_3) comme quatrième élément peut affiner davantage la taille des grains à 3-5 microns, améliorer la résistance mécanique des températures élevées et convient au soudage des alliages de titane dans le domaine aérospatial. L'électrode Er-W présente la perte de masse la plus faible à un courant de 250 A et la meilleure stabilité morphologique de pointe, ce qui indique le potentiel de la combinaison Er-W dans le soudage lourd.

L'innovation dans la technologie du dopage est une autre direction clé. Les méthodes traditionnelles de mélange mécanique et de dopage chimique évoluent vers un dopage plus précis au niveau atomique, comme les techniques de dépôt sol-gel ou en phase vapeur pour obtenir une distribution uniforme des oxydes de terres rares dans la matrice de tungstène. L'étude de 2025 met l'accent sur le dopage des additifs à l'état de traces, comme l'ajout d'hydruure de zirconium (ZrH_2) dans un rapport de 0,1 % à 0,5 %, ce qui permet de contrôler la teneur en oxygène, de réduire la taille des grains de 20 % et d'améliorer les performances d'émission d'électrons. Les électrodes en tungstène de terres rares dopées au ZrH_2 augmentent la densité du courant d'émission d'électrons de 30 % et réduisent l'évaporation de l'oxyde, prolongeant la durée de vie à plus de 1200 heures. En outre, les nouvelles technologies de dopage comprennent le dopage assisté par laser et le dépôt électrochimique, qui peuvent contrôler avec précision la taille des particules de terres rares jusqu'à 50-200 nm et améliorer l'effet de renforcement de la diffusion.

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

À l'avenir, la nouvelle combinaison intégrera une conception assistée par l'IA pour prédire le rapport optimal de terres rares grâce à des modèles d'apprentissage automatique. Par exemple, les simulations basées sur la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) peuvent prédire les fonctions de travail et la stabilité thermique de différentes combinaisons, accélérant ainsi le cycle de R&D. L'analyse du marché montre que d'ici 2031, la part de marché des nouvelles électrodes combinées de terres rares représentera 40 % du marché total, stimulée par la demande de soudage de précision de véhicules à énergie nouvelle et d'équipements 5G. Le défi réside dans l'approvisionnement durable en ressources de terres rares, mais grâce à la technologie de recyclage, la pénurie devrait être atténuée. Dans l'ensemble, les nouvelles combinaisons de terres rares et les technologies de dopage favoriseront le développement d'électrodes composites dans le sens d'une performance accrue et d'une protection de l'environnement pour répondre aux besoins de l'industrie 4.0.

10.2 Dopage et amélioration de la diffusion des nano-oxydes de terres rares

Le dopage et le renforcement par diffusion de l'oxyde de terres rares nano sont l'une des principales orientations technologiques pour le développement futur d'électrodes composites en tungstène de terres rares. Cette technologie permet d'obtenir une distribution plus uniforme et un effet de renforcement plus fort en contrôlant la taille des particules d'oxyde de terres rares au niveau nanométrique (< 100 nm), améliorant considérablement les propriétés mécaniques, la stabilité thermique et l'efficacité d'émission d'électrons de l'électrode. Les tendances de la recherche en 2025 montrent que le nanodopage passera du stade du laboratoire à celui de l'industrialisation, avec des applications dans le soudage de haute précision et la fabrication d'électrodes dans des environnements extrêmes.

Le principe de dopage des nano-oxydes de terres rares réside dans leur surface spécifique élevée et leur effet quantique, qui peuvent clouer efficacement la limite de grains de tungstène et inhiber la croissance des grains. Alors que la taille traditionnelle des grains de dopage au micron est de 5 à 10 microns, le nanodopage peut affiner les grains à 1 à 3 microns, améliorant ainsi la résistance à la rupture de plus de 25 %. Par exemple, la fonction de fonctionnement d'une électrode de tungstène dopée à l'oxyde de lanthane (La_2O_3) dopée diminue à 1,8 eV et la densité du courant d'émission d'électrons est augmentée de 40 %. Des études récentes ont exploré le dopage composé du nano-oxyde de cérium et de l'oxyde d'yttrium, comme le dopage des éléments de terres rares dans les nanostructures WO_3 , ce qui peut améliorer les performances optoélectroniques et s'étendre aux applications de sondes de pH. L'électrode WO_3 dopée au nano- CeO_2 s'approche de la valeur de Nernst (59 mV/pH) en sensibilité au pH, avec un temps de réponse de quelques secondes.

Le renforcement de la diffusion est le mécanisme clé du nanodopage, et les nanoparticules de terres rares sont uniformément diffusées dans la matrice de tungstène en tant que deuxième phase, bloquant le mouvement de dislocation et améliorant la résistance à haute température. L'ajout de ZrH_2 en tant qu'additif peut encore réduire la taille moyenne des grains de 20 % et améliorer la stabilité de l'émission d'électrons. Les techniques de préparation comprennent la méthode sol-gel, le broyage à billes à haute énergie et le dépôt en phase vapeur. Par exemple, l'usine Xingxing traite des poudres à 400-600 tr/min pendant 8 à 12 heures pour obtenir un dopage uniforme à l'échelle

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

nanométrique. Des études ont montré que les microsphères WO_3 dopées à l' O_2 nano- Y_2 ont des propriétés pyroélectriques élevées et conviennent aux applications de capteurs infrarouges.

Les tendances futures incluent des nanocombinaisons de terres rares multiples telles que le WO_3 dopé au Sm^{3+} pour les électrocatalyseurs bifonctionnels avec des densités de courant allant jusqu'à 100 mA/in d'électrolytes acides/cm². Le défi réside dans l'agglomération des nanoparticules et le contrôle des coûts, mais peut être résolu par des modifications de surface telles que les agents de couplage au silane. Le marché prévoit que d'ici 2032, le marché des électrodes nanodopées atteindra un TCAC de 8,14 % et sera utilisé dans les batteries à énergie nouvelle et l'aérospatiale. Le dopage et l'amélioration de la diffusion des oxydes de terres rares nano favoriseront l'évolution des électrodes dans le sens de l'intelligence et de la multifonction, améliorant ainsi leurs performances dans des conditions extrêmes.

10.3 Intégration de la technologie intelligente d'optimisation des paramètres de soudage AI

L'intégration de la technologie d'optimisation intelligente des paramètres de soudage par IA est une direction révolutionnaire pour le développement futur des électrodes composites en tungstène de terres rares, qui ajustent les paramètres de soudage en temps réel grâce à des algorithmes d'intelligence artificielle pour améliorer la qualité, l'efficacité et le niveau d'automatisation de la soudure. Les tendances de 2025 montrent que l'IA sera profondément intégrée aux matériaux d'électrode pour réaliser une maintenance prédictive et un soudage adaptatif, adaptés aux conditions de travail complexes telles que l'aérospatiale et la fabrication de véhicules à énergie nouvelle.

Au cœur de l'optimisation de l'IA se trouvent des modèles d'apprentissage automatique, tels que les réseaux de neurones et la logique floue, qui sont utilisés pour prédire les paramètres optimaux (courant, tension, débit de gaz). Par exemple, le cadre de réseau neuronal profond flou prédit la géométrie des soudures TIG avec une précision de 92,59 %. Les paramètres d'entrée comprennent le courant (50-250 A), la vitesse (0,1-0,5 m/min) et le type d'électrode (WLaCeY), la profondeur et la largeur de la soudure de sortie. Grâce à la formation au Big Data, l'IA peut optimiser les paramètres et réduire les taux de défauts de 30 %.

Les technologies convergentes comprennent les jumeaux numériques et la reconnaissance d'images. Le jumeau numérique simule le comportement de l'électrode pour prédire la durée de vie et la stabilité ; La vision industrielle passive classe les défauts, et le taux de qualité de soudage des robots IoT atteint 88 %. L'étude montre que le système de rétroaction adaptative piloté par l'IA prédit la qualité en fonction de la dégradation de l'angle de la pointe de l'électrode et optimise des paramètres tels que la tension < 35 V.

À l'avenir, l'IA s'étendra à la fusion de données multimodales, par exemple en combinant la microanalyse MEB et les données de capteurs en temps réel pour prédire les performances des combinaisons de terres rares. Les défis comprennent la confidentialité des données et la robustesse des modèles, mais sont résolus par l'edge computing. Selon l'analyse de marché, d'ici 2031, le marché de la technologie de soudage par IA augmentera à un TCAC de 8 % et l'IA par fusion d'électrodes composites dominera la fabrication de précision. Cas : L'IA optimise les paramètres de

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

soudage TIG et améliore la résistance de la soudure de l'acier inoxydable de 10 %.

L'intégration de l'IA rendra les électrodes composites en tungstène de terres rares intelligentes et stimulera la transformation de l'industrie du soudage 4.0.

10.4 Fabrication verte et développement durable

La fabrication écologique et la durabilité sont des priorités stratégiques pour le développement futur d'électrodes composites en tungstène à base de terres rares, visant à réduire l'impact environnemental, à améliorer l'efficacité des ressources et à s'aligner sur les objectifs mondiaux de neutralité carbone. Les tendances pour 2025 montrent une évolution des technologies de préparation vertes, passant des laboratoires à la production à grande échelle, en mettant l'accent sur les processus sans déchets, les cycles de recyclage et l'utilisation d'énergie à faible émission de carbone.

Les principes de fabrication verte comprennent une production plus propre et l'économie circulaire. La pollution traditionnelle des gaz résiduels et des eaux usées est grave, et les nouvelles technologies telles que la préparation écologique d'électrodes de terres rares multicomposites et le frittage à l'aide d'un SPS à faible consommation d'énergie peuvent réduire les émissions de carbone de 25 %. La technologie de récupération récupère 85 % du tungstène et 90 % des terres rares par dissolution acide et échange d'ions, réduisant ainsi la dépendance aux minéraux.

La durabilité se concentre sur la durabilité des ressources, comme l'extraction des terres rares des électrodes de déchets, le traitement de 100 tonnes de déchets et le recyclage de 80 tonnes de tungstène. L'optimisation des paramètres assistée par l'IA réduit la consommation d'énergie de 20 %. Des réglementations telles que REACH exigent un taux de recyclage de > 95 %, ce qui incite les entreprises à soumettre des rapports d'empreinte carbone.

Les tendances futures incluent les additifs biosourcés et les énergies renouvelables pour stimuler la production. Le marché prévoit que d'ici 2032, le marché des électrodes vertes connaîtra une croissance à un TCAC de 4,1 % et sera utilisé dans le soudage respectueux de l'environnement. Cas : Une usine a mis en œuvre une fabrication écologique, a réduit ses coûts de 15 % et a été certifiée.

La fabrication écologique garantira que les électrodes composites sont durables et contribuent à une économie à faibles émissions de carbone.

10.5 Perspectives d'application dans l'aérospatiale, l'industrie nucléaire, la fabrication médicale et d'autres domaines

Les électrodes composites en tungstène de terres rares ont des applications prometteuses dans l'aérospatiale, l'industrie nucléaire et la fabrication médicale, bénéficiant de leurs hautes performances et de leurs caractéristiques écologiques. Les tendances pour 2025 montrent que ces domaines conduiront les électrodes vers une précision et une durabilité accrues.

Domaine aérospatial : utilisé pour les alliages de titane et le soudage à haute température, tels que les aubes de moteur. La résistance à la soudure de l'électrode WLaCeY > de 900 MPa et la porosité < de 0,1 % en soudage TIG. À l'avenir, les électrodes nanodopées seront utilisées pour imprimer en

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

3D des composants aérospatiaux, avec une augmentation de 15 % de la précision et une part de marché de 30 %.

Industrie nucléaire : résistante à la corrosion et très stable pour le soudage de pipelines de réacteurs. La profondeur de pénétration de l'électrode contenant de la zircone est de 3 à 5 mm et il n'y a pas de fissures. À l'avenir, les paramètres d'optimisation de l'IA amélioreront la sécurité et la technologie de recyclage réduira la pollution par les déchets.

Fabrication médicale : Utilisé pour les implants et le blindage contre les radiations, comme le soudage d'outils chirurgicaux. La pureté et la faible pollution sont essentielles, et le dopage aux terres rares augmente la conductivité de 10 %. À l'avenir, l'application des sondes de pH s'étendra et la sensibilité des électrodes dopées au CeO₂ est proche de 59 mV/pH.

Les perspectives incluent des intégrations polyvalentes telles que des robots de soudage fusionnés par l'IA. Le marché a connu une croissance à un TCAC de 8 %, ce qui a mis en difficulté l'approvisionnement en ressources, mais le recyclage a résolu le problème. Les applications favoriseront l'innovation dans les industries de haute technologie.



Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

Appendice

A. Glossaire

Électrode composite de tungstène de terres rares : Matériau d'électrode avec plusieurs oxydes de terres rares ajoutés à une matrice de tungstène pour améliorer les performances de soudage.

Métallurgie des poudres : Une méthode de traitement pour préparer les matériaux métalliques par moulage de poudre, frittage et autres processus.

Performance d'allumage : La capacité de l'électrode à initier l'arc à de faibles courants.

Stabilité de l'arc : L'arc reste uniforme et ne dérive pas pendant le processus de soudage.

Fonction de travail : La quantité minimale d'énergie que les électrons s'échappent de la surface d'un matériau.

Soudage TIG (Tungsten Inert Gas Welding) : Soudage sous gaz inerte tungstène.

Soudage au plasma : Une technologie qui utilise des arcs plasma pour le soudage.

Forgeage rotatif : Un processus dans lequel les barres sont traitées par martelage rotatif.

MEB (microscope électronique à balayage) : Un microscope électronique à balayage utilisé pour l'observation de la microstructure.

Reo (Rare Earth Oxide) : Oxydes de terres rares, tels que La₂O₃, CeO₂, etc.

Contrôle non destructif : Une méthode de vérification des défauts sans endommager l'échantillon.

Réduction de l'hydrogène : Le processus de réduction de la poudre d'oxyde de tungstène avec de l'hydrogène.

Pressage isostatique à froid : Une technique de moulage qui compacte la poudre dans des conditions de pressage isostatique.

Durée de vie de l'arc brûlant : La durée de vie de l'électrode sous soudage continu.

Fabrication verte : Méthodes de production respectueuses de l'environnement et peu polluantes.

B. Références

[1] Prévisions du marché mondial des électrodes de tungstène - Rapport d'analyse de marché, 2023

[2] Progrès de la recherche sur les matériaux composites d'électrode de tungstène à base de terres rares - Journal of Rare Earth Materials, 2022

[3] Application des terres rares de tungstène et de molybdène dans le domaine des batteries à énergie nouvelle - Rapport de recherche de l'industrie, 2024

[4] Technologie d'industrialisation de l'électrode de tungstène de terres rares multi-composites - Étude de faisabilité du projet, 2020

[5] Analyse des performances des matériaux d'électrode en aluminium de terres rares - Materials Science Journal, 2021

[6] Recherche sur la chaîne d'approvisionnement des matériaux clés des terres rares - Rapport CTCI, 2022

[7] Mécanisme de frittage d'électrodes ternaires composites en tungstène de terres rares - Metallurgical Transactions, 2023

[8] Guide de sélection de l'équipement d'électrode de tungstène de terres rares - Materials Processing Journal, 2022

[9] Technologie de préparation d'électrodes composites multi-composants en tungstène de terres rares - Science et innovation technologique, 2024

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale

- [10] État du développement et de l'application des alliages de tungstène - Métaux non ferreux Journal, 2021
- [11] Spécifications de sécurité des électrodes composites en tungstène de terres rares - Industrial Safety Journal, 2023
- [12] Essais de performance d'électrodes composites en tungstène de terres rares - Journal of Materials Science, 2023
- [13] Essais de propriétés mécaniques d'électrodes en tungstène - Transactions métallurgiques, 2022
- [14] Analyse de la microstructure des électrodes de tungstène de terres rares - Journal of Rare Earths, 2021
- [15] Détection de la composition chimique des électrodes de tungstène - Chimie analytique, 2024
- [16] Technologie de détection des défauts d'électrode de tungstène - NDT Journal, 2023
- [17] Évaluation de la durée de vie des électrodes de tungstène de terres rares - Reliability Engineering, 2022
- [18] Contrôle de la qualité des électrodes composites en tungstène - Quality Control Journal, 2024
- [19] Méthode d'essai de performance de l'électrode de tungstène de terres rares - Journal of Materials Testing, 2022
- [20] L'impact du règlement REACH sur la fabrication d'électrodes - Agence européenne des produits chimiques, 2024
- [21] Interprétation de la réglementation sur la gestion des terres rares - Rapport sur la politique de l'industrie chinoise, 2024
- [22] Technologie des équipements de production d'électrodes composites en tungstène de terres rares - Industrial Equipment Journal, 2023
- [23] Équipement de production d'électrodes de tungstène de terres rares - Traitement avancé des matériaux, 2021

Déclaration de droits d'auteur et de responsabilité légale