

QuÉ Es Un Electrodo De Cobre Y Tungsteno

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Líder mundial en fabricación inteligente para las industrias de tungsteno, molibdeno y tierras raras

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

INTRODUCCIÓN A CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, una subsidiaria de propiedad absoluta con personalidad jurídica independiente establecida por CHINATUNGSTEN ONLINE, se dedica a promover el diseño y la fabricación inteligentes, integrados y flexibles de materiales de tungsteno y molibdeno en la era de Internet industrial. CHINATUNGSTEN ONLINE, fundada en 1997 con www.chinatungsten.com como punto de partida (el primer sitio web de productos de tungsteno de primer nivel de China), es la empresa de comercio electrónico pionera del país centrada en las industrias del tungsteno, el molibdeno y las tierras raras. Aprovechando casi tres décadas de profunda experiencia en los campos del tungsteno y el molibdeno, CTIA GROUP hereda las excepcionales capacidades de diseño y fabricación, los servicios superiores y la reputación comercial global de su empresa matriz, convirtiéndose en un proveedor integral de soluciones de aplicación en los campos de productos químicos de tungsteno, metales de tungsteno, carburos cementados, aleaciones de alta densidad, molibdeno y aleaciones de molibdeno.

En los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha creado más de 200 sitios web profesionales multilingües sobre tungsteno y molibdeno, disponibles en más de 20 idiomas, con más de un millón de páginas de noticias, precios y análisis de mercado relacionados con el tungsteno, el molibdeno y las tierras raras. Desde 2013, su cuenta oficial de WeChat, "CHINATUNGSTEN ONLINE", ha publicado más de 40.000 artículos, atendiendo a casi 100.000 seguidores y proporcionando información gratuita a diario a cientos de miles de profesionales del sector en todo el mundo. Con miles de millones de visitas acumuladas a su sitio web y cuenta oficial, se ha convertido en un centro de información global y de referencia para las industrias del tungsteno, el molibdeno y las tierras raras, ofreciendo noticias multilingües, rendimiento de productos, precios de mercado y servicios de tendencias del mercado 24/7.

Basándose en la tecnología y la experiencia de CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP se centra en satisfacer las necesidades personalizadas de los clientes. Utilizando tecnología de IA, diseña y produce en colaboración con los clientes productos de tungsteno y molibdeno con composiciones químicas y propiedades físicas específicas (como tamaño de partícula, densidad, dureza, resistencia, dimensiones y tolerancias). Ofrece servicios integrales de proceso completo que abarcan desde la apertura del molde y la producción de prueba hasta el acabado, el embalaje y la logística. Durante los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha proporcionado servicios de I+D, diseño y producción para más de 500.000 tipos de productos de tungsteno y molibdeno a más de 130.000 clientes en todo el mundo, sentando las bases para una fabricación personalizada, flexible e inteligente. Con esta base, CTIA GROUP profundiza aún más en la fabricación inteligente y la innovación integrada de materiales de tungsteno y molibdeno en la era del Internet Industrial.

El Dr. Hanns y su equipo en CTIA GROUP, con más de 30 años de experiencia en la industria, han escrito y publicado análisis de conocimiento, tecnología, precios del tungsteno y tendencias del mercado relacionados con el tungsteno, el molibdeno y las tierras raras, compartiéndolos libremente con la industria del tungsteno. El Dr. Han, con más de 30 años de experiencia desde la década de 1990 en el comercio electrónico y el comercio internacional de productos de tungsteno y molibdeno, así como en el diseño y la fabricación de carburos cementados y aleaciones de alta densidad, es un reconocido experto en productos de tungsteno y molibdeno tanto a nivel nacional como internacional. Fiel al principio de proporcionar información profesional y de alta calidad a la industria, el equipo de CTIA GROUP escribe continuamente documentos de investigación técnica, artículos e informes de la industria basados en las prácticas de producción y las necesidades de los clientes del mercado, obteniendo amplios elogios en la industria. Estos logros brindan un sólido respaldo a la innovación tecnológica, la promoción de productos y los intercambios industriales de CTIA GROUP, impulsándolo a convertirse en un líder en la fabricación de productos de tungsteno y molibdeno y en servicios de información a nivel mundial.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción

- 1.1 Definición de electrodo de cobre y tungsteno
- 1.2 Características básicas del electrodo de cobre y tungsteno
- 1.3 Historia del desarrollo del electrodo de cobre y tungsteno

Capítulo 2: Fundamentos del material de los electrodos de cobre y tungsteno

- 2.1 Características del tungsteno
- 2.2 Características del cobre
- 2.3 Mecanismo compuesto de tungsteno y cobre
 - 2.3.1 Compatibilidad física de los electrodos de cobre y tungsteno
 - 2.3.1.1 Compatibilidad estructural
 - 2.3.1.2 Compatibilidad térmica
 - 2.3.2 Sinergia de rendimiento de los electrodos de cobre y tungsteno
 - 2.3.2.1 Sinergia de conductividad eléctrica y térmica
 - 2.3.2.2 Sinergia entre la resistencia a altas temperaturas y la estabilidad estructural
- 2.4 Requisitos clave de materia prima para electrodos de cobre y tungsteno
 - 2.4.1 Requisitos del polvo de tungsteno
 - 2.4.2 Requisitos del polvo de cobre
 - 2.4.3 Normas de pretratamiento de materias primas

Capítulo 3: Propiedades físicas y químicas de los electrodos de cobre y tungsteno

- 3.1 Propiedades físicas de los electrodos de cobre y tungsteno
 - 3.1.1 Densidad del electrodo de cobre y tungsteno
 - 3.1.1.1 Método de cálculo de densidad
 - 3.1.1.2 Relación entre densidad y composición
 - 3.1.1.3 Impacto de la densidad en las aplicaciones
 - 3.1.2 Propiedades térmicas de los electrodos de cobre y tungsteno
 - 3.1.2.1 Conductividad térmica
 - 3.1.2.2 Coeficiente de expansión térmica
 - 3.1.2.3 Resistencia a altas temperaturas
- 3.2 Rendimiento funcional del electrodo de cobre y tungsteno
 - 3.2.1 Propiedades conductoras de los electrodos de cobre y tungsteno
 - 3.2.1.1 Conductividad
 - 3.2.1.2 Resistividad
 - 3.2.1.3 Capacidad de transporte de corriente
 - 3.2.2 Resistencia a la erosión por arco de los electrodos de cobre y tungsteno
 - 3.2.2.1 Mecanismo de erosión por arco
 - 3.2.2.2 Evaluación de la resistencia a la ablación
 - 3.2.2.3 Factores que afectan la resistencia a la ablación
- 3.3 Otras propiedades del electrodo de cobre y tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3.1 Dureza del electrodo de cobre y tungsteno
- 3.3.2 Resistencia del electrodo de cobre y tungsteno
- 3.3.3 Tenacidad del electrodo de cobre y tungsteno
- 3.3.4 Resistencia al desgaste del electrodo de cobre y tungsteno
- 3.3.5 Resistencia a la corrosión de los electrodos de cobre y tungsteno
- 3.3.6 Propiedades antisoldadura y antiadherencia de los electrodos de cobre-tungsteno
- 3.4 CTIA GROUP LTD Electrodo de cobre y tungsteno MSDS

Capítulo 4: Clasificación de los electrodos de cobre y tungsteno

- 4.1 Clasificación dominante de la relación de composición del electrodo de cobre y tungsteno
 - 4.1.1 Electrodos con alto contenido de tungsteno (80%-95% tungsteno)
 - 4.1.2 Electrodos con contenido medio de tungsteno (50%-80% tungsteno)
 - 4.1.3 Electrodos con bajo contenido de tungsteno (20%-50% tungsteno)
- 4.2 Clasificación de electrodos de cobre y tungsteno según escenarios de aplicación
 - 4.2.1 Electrodos para EDM
 - 4.2.2 Electrodos para aparatos eléctricos de alto voltaje
 - 4.2.3 Electrodos en el campo de soldadura
 - 4.2.4 Electrodos especiales para aplicaciones aeroespaciales y militares
- 4.3 Clasificación de las características morfológicas y estructurales de los electrodos de cobre-tungsteno
 - 4.3.1 Electrodos de bloque
 - 4.3.2 Electrodo de varilla
 - 4.3.3 Electrodo de lámina
 - 4.3.4 Electrodos de formas especiales
- 4.4 Clasificación basada en el rendimiento de los electrodos de cobre y tungsteno
 - 4.4.1 Electrodos altamente conductores
 - 4.4.2 Electrodos resistentes a la erosión por arco
 - 4.4.3 Electrodos de alta resistencia
 - 4.4.4 Electrodos de alta resistencia al calor
- 4.5 Clasificación de electrodos de cobre-tungsteno por microestructura
 - 4.5.1 Electrodos uniformemente dispersos
 - 4.5.2 Electrodos rellenos de esqueleto
 - 4.5.3 Electrodo de distribución de gradiente
- 4.6 Clasificación de electrodos de cobre y tungsteno según su forma física macroscópica
 - 4.6.1 Electrodo denso
 - 4.6.2 Electrodos porosos
 - 4.6.3 Electrodos de recubrimiento compuesto

Capítulo 5: Proceso de preparación del electrodo de cobre y tungsteno

- 5.1 Proceso de infiltración
 - 5.1.1 Prefabricación de esqueleto de tungsteno
 - 5.1.1.1 Moldeo de polvo de tungsteno
 - 5.1.1.2 Sinterización de esqueleto de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.1.1.3 Control de poros del esqueleto de tungsteno
- 5.1.2 Control de infiltración
 - 5.1.2.1 Preparación del material de cobre
 - 5.1.2.2 Control de temperatura de infiltración
 - 5.1.2.3 Control del tiempo de infiltración
- 5.2 Tecnología de posprocesamiento
 - 5.2.1 Corte
 - 5.2.2 Molienda
 - 5.2.3 Tratamiento de superficies
- Control de precisión dimensional

Capítulo 6: Escenarios de aplicación de los electrodos de cobre y tungsteno

- 6.1 Aplicación del electrodo de cobre y tungsteno en la electroerosión
 - 6.1.1 Aplicación en el procesamiento de moldes
 - 6.1.2 Aplicación en el procesamiento de materiales difíciles de procesar
 - 6.1.3 Ventajas de la aplicación en EDM
- 6.2 Aplicación de electrodos de cobre y tungsteno en aparatos eléctricos de alto voltaje
 - 6.2.1 Aplicación en interruptores de alto voltaje
 - 6.2.2 Aplicación en pararrayos
 - 6.2.3 Ventajas de aplicación en aparatos eléctricos de alto voltaje
- 6.3 Aplicación de electrodos de cobre y tungsteno en soldadura y soldadura fuerte
 - 6.3.1 Aplicaciones en soldadura por resistencia
 - 6.3.2 Aplicación en soldadura fuerte
 - 6.3.3 Ventajas de aplicación en el campo de la soldadura
- 6.4 Aplicación de electrodos de cobre y tungsteno en las industrias aeroespacial y militar
 - 6.4.1 Aplicación en componentes relacionados con motores de cohetes
 - 6.4.2 Aplicación en componentes de orientación
 - 6.4.3 Ventajas de aplicación en la industria aeroespacial y militar

Capítulo 7: Control de calidad y estándares de prueba para electrodos de cobre y tungsteno

- 7.1 Detección de indicadores clave del electrodo de cobre y tungsteno
 - 7.1.1 Prueba de propiedades físicas del electrodo de cobre y tungsteno
 - 7.1.1.1 Métodos y normas de prueba de densidad
 - 7.1.1.2 Métodos y normas de prueba de rendimiento térmico
 - 7.1.1.3 Métodos y normas de prueba de conductividad
 - 7.1.2 Propiedades químicas de los electrodos de cobre y tungsteno
 - 7.1.2.1 Método de análisis de composición
 - 7.1.2.2 Método de prueba de resistencia a la corrosión
 - 7.1.2.3 Normas de prueba del contenido de impurezas
 - 7.1.3 Propiedades mecánicas de los electrodos de cobre y tungsteno
 - 7.1.3.1 Métodos y normas de prueba de dureza
 - 7.1.3.2 Métodos y normas de pruebas de resistencia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.1.3.3 Métodos y normas de prueba de tenacidad
- 7.2 Inspección de la microestructura del electrodo de cobre y tungsteno
 - 7.2.1 Análisis metalográfico
 - 7.2.1.1 Preparación de muestras metalográficas
 - 7.2.1.2 Criterios de evaluación de la uniformidad de la distribución de fases
 - 7.2.1.3 Detección del tamaño de grano
 - 7.2.2 Detección de defectos en electrodos de cobre y tungsteno
 - 7.2.2.1 Método de detección de porosidad y rango admisible
 - 7.2.2.2 Métodos y criterios de detección de grietas
 - 7.2.2.3 Métodos de detección de inclusiones y estándares de control
- 7.3 Estándares de la industria para electrodos de cobre y tungsteno
 - 7.3.1 Normas nacionales pertinentes
 - 7.3.1.1 Disposiciones pertinentes de las normas chinas
 - 7.3.1.2 Requisitos estándar de la industria
 - 7.3.2 Normas internacionales pertinentes
 - 7.3.2.1 Normas internacionales para electrodos de cobre y tungsteno
 - 7.3.2.2 Estándares de electrodos de cobre y tungsteno en Europa, América, Japón, Corea del Sur y otros países

Capítulo 8: Tendencias del mercado y la tecnología de electrodos de cobre y tungsteno

- 8.1 Análisis de la cadena industrial de electrodos de cobre y tungsteno
 - 8.1.1 Suministro de materia prima aguas arriba
 - 8.1.2 Fabricación intermedia
 - 8.1.3 Mercado de aplicaciones descendentes
- 8.2 Dirección técnica del electrodo de cobre y tungsteno
 - 8.2.1 Optimización del proceso de preparación
 - 8.2.2 Ruta de mejora del rendimiento
 - 8.2.3 Exploración de expansión de aplicaciones

Apéndice:

- Glosario de electrodos de cobre y tungsteno
- Referencias



Electrodo de cobre y tungsteno CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 1: Introducción

1.1 Definición de electrodo de cobre y tungsteno

Un electrodo de tungsteno-cobre es un electrodo compuesto hecho de tungsteno (W) y cobre (Cu) mediante pulvimetalurgia o infiltración al vacío. Su definición abarca su composición, método de preparación y propiedades funcionales en aplicaciones específicas. Los electrodos de tungsteno-cobre suelen utilizar tungsteno como material de esqueleto principal y cobre como relleno. Los dos metales se combinan en proporciones variables (p. ej., WCu 70/30, WCu 80/20), lo que da como resultado un material con un alto punto de fusión, resistencia a altas temperaturas y excelente conductividad eléctrica. El alto punto de fusión del tungsteno de 3422 °C le da al electrodo una estabilidad térmica excepcional y resistencia a la erosión por arco, mientras que el cobre, con un punto de fusión de 1083 °C, posee una alta conductividad eléctrica y térmica, lo que garantiza una transferencia de corriente eficiente y una rápida disipación del calor. Las propiedades de este material compuesto lo hacen ampliamente utilizado en aplicaciones como el mecanizado por descarga eléctrica (EDM), la soldadura por resistencia y los contactos eléctricos. La definición de un electrodo de tungsteno-cobre también abarca su microestructura. Los electrodos se forman mezclando polvos de tungsteno y cobre a través de pulvimetalurgia, prensado y sinterización, o infiltrando cobre líquido en el esqueleto poroso de tungsteno a través de infiltración al vacío, lo que da como resultado una distribución de fase uniforme y una baja porosidad.

En aplicaciones prácticas, la definición de electrodos de tungsteno-cobre se expande aún más para abarcar sus propiedades funcionales, como su uso como electrodos de herramienta en el mecanizado por electrochispa (EDM) para eliminar material de la pieza de trabajo, o como electrodos en soldadura por resistencia, soportando altas corrientes y presiones. La relación y el proceso de preparación se pueden adaptar a necesidades específicas. Por ejemplo, los electrodos con un alto contenido de tungsteno son más adecuados para el desgaste y la resistencia al arco, mientras que los electrodos con un alto contenido de cobre optimizan la conductividad eléctrica. La definición de electrodos de tungsteno-cobre también abarca sus diferencias con los electrodos tradicionales de un solo metal. La ventaja de los materiales compuestos radica en sus propiedades equilibradas de tungsteno y cobre, superando las limitaciones de los materiales únicos, como el bajo punto de fusión del cobre puro o la baja conductividad eléctrica del tungsteno puro. En los últimos años, con los avances en la tecnología de fabricación, la definición de electrodos de tungsteno-cobre se ha expandido gradualmente a los campos de la fabricación aditiva y la nanotecnología, explorando microestructuras más refinadas y aplicaciones novedosas.

1.2 Características básicas del electrodo de cobre y tungsteno

de tungsteno -cobre se caracterizan por sus propiedades físicas, mecánicas y eléctricas únicas como material compuesto, lo que los hace especialmente adecuados para diversas aplicaciones. En primer lugar, la conductividad eléctrica es una característica fundamental de los electrodos de tungsteno-cobre. La alta conductividad eléctrica de la fase de cobre (aproximadamente $5,8 \times 10^7$ S/m) proporciona una ruta de transmisión de corriente eficiente. Si bien el tungsteno tiene una conductividad eléctrica menor (aproximadamente $1,8 \times 10^7$ S/m), al optimizar la distribución del cobre, la conductividad eléctrica de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

los electrodos de tungsteno-cobre puede alcanzar entre el 80 % y el 90 % de la de los electrodos de cobre tradicionales, cumpliendo así con los requisitos de la electroerosión y la soldadura. La conductividad térmica es otra característica clave. La combinación de la conductividad térmica del cobre y la conductividad térmica moderada del tungsteno (aproximadamente $174 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) da como resultado una aleación con una conductividad térmica entre $180\text{-}220 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, lo que permite una rápida disipación del calor generado durante el mecanizado o la soldadura, evitando el sobrecalentamiento localizado.

La resistencia a altas temperaturas es una ventaja significativa de los electrodos de tungsteno-cobre. El punto de fusión ultraalto del tungsteno garantiza la estabilidad en arcos y entornos de alta temperatura. La fase de cobre, después de fundirse, llena los poros, mejorando aún más la estabilidad térmica del material, haciéndolo adecuado para condiciones extremas de hasta $3000 \text{ }^\circ\text{C}$. La alta dureza del tungsteno (aproximadamente 3430 HV) y la resistencia al desgaste contribuyen a su resistencia a la erosión por arco. Esto reduce significativamente la ablación de la superficie del electrodo durante la electroerosión, extendiendo su vida útil. La resistencia mecánica y la dureza también son características importantes. Los electrodos de tungsteno-cobre cuentan con una resistencia a la compresión que supera los 1000 MPa y una dureza entre 200 y 300 HV , lo que les permite soportar altas presiones y acción mecánica frecuente. Mientras tanto, la fase de cobre proporciona tenacidad, reduciendo el riesgo de fractura frágil.

El bajo coeficiente de expansión térmica (aproximadamente $6\text{-}8 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) es una ventaja única de los electrodos de cobre y tungsteno. Coincide con los sustratos de silicio o cerámica, reduce la tensión durante los ciclos térmicos y es particularmente adecuado para el encapsulado microelectrónico. La resistencia a la corrosión se logra mediante la estabilidad química del tungsteno y el tratamiento de la superficie del cobre (como el niquelado), lo que lo hace adecuado para entornos húmedos o industriales. Microestructuralmente, la distribución de fase uniforme y la baja porosidad (normalmente inferior al 1%) del electrodo de cobre y tungsteno garantizan un rendimiento constante. Estas características básicas en conjunto constituyen la versatilidad de los electrodos de cobre y tungsteno, lo que les permite un buen rendimiento en el procesamiento de alta precisión, el contacto eléctrico y la gestión térmica. En el futuro, con el desarrollo de la nanotecnología y la modificación de la superficie, se espera que estas características se optimicen aún más.

1.3 Historia del desarrollo del electrodo de tungsteno-cobre

Los electrodos de tungsteno-cobre reflejan la evolución histórica de la ciencia de los materiales y las necesidades industriales, con orígenes que se remontan a mediados del siglo XX, con los avances en la pulvimetalurgia y el rápido desarrollo de la industria eléctrica. Inicialmente, la investigación y el desarrollo de electrodos de tungsteno-cobre comenzaron en la década de 1940, impulsados por las propiedades únicas del tungsteno y el cobre en aplicaciones militares e industriales. Las primeras investigaciones se centraron en los procesos de pulvimetalurgia y, en 1945, la American Society for Metals (ASM) informó por primera vez sobre la preparación de compuestos de tungsteno-cobre, explorando su aplicación en contactos eléctricos mediante la mezcla, el prensado y la sinterización de polvos de tungsteno y cobre. Los electrodos de tungsteno-cobre en esta etapa se utilizaban principalmente en equipos eléctricos de gama baja, con un rendimiento limitado, alta porosidad y margen de mejora en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la conductividad y la durabilidad.

Entre las décadas de 1950 y 1970, con la introducción de la tecnología de infiltración al vacío, el desarrollo de los electrodos de tungsteno-cobre experimentó un rápido crecimiento. En 1955, Siemens desarrolló con éxito el método de infiltración al vacío, que infiltraba cobre líquido en el esqueleto de tungsteno sinterizado, lo que reducía significativamente la porosidad y mejoraba la densidad y la conductividad del material. Este avance tecnológico permitió la aplicación de los electrodos de tungsteno-cobre en el mecanizado por descarga eléctrica (EDM), haciéndolos ideales para el mecanizado de materiales duros como el carburo de tungsteno. En la década de 1960, empresas japonesas y estadounidenses como Toshiba y General Electric optimizaron aún más la relación y la microestructura, lo que dio como resultado que WCu 70/30 y WCu 80/20 se convirtieran en estándares de la industria y se utilizaran ampliamente en interruptores de alta tensión y electrodos de soldadura.

Desde la década de 1980 hasta la década de 2000, las áreas de aplicación de los electrodos de tungsteno-cobre se expandieron a la microelectrónica y la industria aeroespacial, impulsando innovaciones en la tecnología de preparación. En 1985, se introdujo la tecnología de prensado isostático en caliente (HIP), que mejoró la uniformidad y la resistencia mecánica del material, satisfaciendo las necesidades de procesamiento de alta precisión. En la década de 1990, la introducción del polvo de nano-tungsteno aumentó el grado de refinamiento del grano, mejoró la resistencia al desgaste y la resistencia a la erosión por arco. Después del año 2000, con el auge de la fabricación aditiva y la tecnología de impresión 3D, la preparación de electrodos de tungsteno-cobre se inclinó hacia la personalización, y se hicieron posibles los electrodos con geometrías complejas. En la década de 2020, en combinación con la inteligencia artificial y la simulación de materiales, la investigación y el desarrollo de electrodos de tungsteno-cobre se centraron en materiales con gradientes funcionales y en la modificación de superficies para satisfacer las necesidades de los equipos 5G y los sensores de alta temperatura. Para 2025, los electrodos de tungsteno y cobre se habrán convertido en materiales fundamentales en el procesamiento y la electrónica de alto rendimiento, y su historial de desarrollo refleja la profunda integración de la innovación tecnológica y las necesidades de aplicación.



Electrodo de cobre y tungsteno CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

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

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

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

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

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

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

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

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

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 2: Base material del electrodo de tungsteno-cobre

2.1 Características del tungsteno

El tungsteno, componente clave de los electrodos de tungsteno-cobre, posee propiedades que proporcionan una base única para aplicaciones de alto rendimiento. El tungsteno es un metal con un punto de fusión alto, de 3422 °C, el más alto de todos los metales conocidos. Esta propiedad le permite mantener la estabilidad estructural en entornos de temperaturas extremadamente altas, lo que lo hace especialmente adecuado para resistir el arco eléctrico y los choques de alta temperatura que se producen en el mecanizado por electroerosión (EDM) o la soldadura por resistencia. Su densidad de 19,25 g/cm³ le confiere al electrodo una alta resistencia a la masa y a la deformación. Su resistencia a la compresión puede superar los 1000 MPa y su dureza es de aproximadamente 3430 HV, lo que demuestra una excelente resistencia al desgaste y a la resistencia mecánica. Estas propiedades le permiten soportar tensiones mecánicas frecuentes o la erosión por arco, prolongando así su vida útil. Si bien su conductividad térmica de aproximadamente 174 W/m·K es menor que la del cobre, su alto punto de fusión compensa esta desventaja, garantizando que mantenga su forma a altas temperaturas.

La estabilidad química del tungsteno es otra característica destacada. Es resistente a entornos ácidos, alcalinos y oxidantes, y particularmente resistente a la corrosión significativa en su superficie en entornos húmedos o industriales. Esto garantiza la aplicación de electrodos de tungsteno-cobre en exteriores o en condiciones adversas. Sin embargo, el tungsteno tiene una conductividad eléctrica relativamente baja (aproximadamente $1,8 \times 10^7$ S/m), lo que limita su uso como material aislado y requiere su combinación con otros materiales altamente conductores. Su coeficiente de expansión térmica es de aproximadamente 4,5 ppm/°C, similar al de muchos materiales cerámicos o semiconductores, lo que reduce la tensión durante los ciclos térmicos y proporciona una ventaja en el encapsulado microelectrónico. El tungsteno presenta baja maquinabilidad y debe prepararse mediante pulvimetalurgia o sinterización a alta temperatura, pero su estructura de grano fino puede mejorar el rendimiento mediante la optimización del proceso. En los últimos años, la introducción del polvo de nanotungsteno ha mejorado aún más la uniformidad y la resistencia del tungsteno, lo que le otorga un mayor potencial de aplicación en electrodos de alta precisión.

2.2 Características del cobre

El cobre, otro componente clave de los electrodos de tungsteno-cobre, posee propiedades que les confieren un rendimiento eléctrico y térmico excepcional. Si bien su punto de fusión de 1083 °C es inferior al del tungsteno, su alta conductividad eléctrica y térmica lo convierte en un material ideal para una transmisión de corriente y disipación de calor eficientes. En los electrodos de tungsteno-cobre, la fase de cobre se incorpora al esqueleto de tungsteno mediante pulvimetalurgia o infiltración al vacío, formando una red conductora continua que garantiza una transmisión de corriente estable durante la electroerosión o la soldadura. Con una densidad de 8,96 g/cm³, el cobre es más ligero que el tungsteno, pero su ductilidad y tenacidad le proporcionan una mayor flexibilidad mecánica, reduciendo el riesgo de fractura frágil bajo tensión mecánica.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La resistencia a la corrosión del cobre en estado puro es débil y se ve fácilmente afectada por la oxidación o la sulfuración. Sin embargo, en los compuestos de tungsteno-cobre, la estabilidad química del tungsteno proporciona protección, y la superficie del cobre puede recubrirse con un recubrimiento (como níquel u oro) para mejorar su resistencia a la intemperie. El cobre tiene un coeficiente de expansión térmica relativamente alto, de aproximadamente $17 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$, pero al combinarlo con tungsteno, se adapta a sustratos de silicio o cerámica, lo que lo hace adecuado para aplicaciones microelectrónicas. El cobre tiene una excelente maquinabilidad, lo que facilita el corte y el conformado de precisión, y facilita la fabricación de electrodos con formas complejas. Sin embargo, la tendencia del cobre a ablandarse a altas temperaturas limita su uso como material aislado, requiriendo tungsteno como soporte. En los últimos años, se ha adoptado ampliamente el cobre electrolítico de mayor pureza para reducir el impacto de las impurezas en la conductividad eléctrica y térmica.

2.3 Mecanismo compuesto de tungsteno y cobre

El mecanismo del compuesto de tungsteno-cobre es clave para comprender los fundamentos del rendimiento de los electrodos de tungsteno-cobre, que abarcan la interacción entre el tungsteno y el cobre a nivel microscópico y la optimización del proceso de preparación. Los materiales compuestos de tungsteno-cobre se obtienen mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío. El principio básico consiste en utilizar el alto punto de fusión del tungsteno como esqueleto y el bajo punto de fusión del cobre como fase de relleno para formar un sistema de rendimiento complementario. En la pulvimetalurgia, el polvo de tungsteno y el de cobre se mezclan en una proporción específica, se prensan en una pieza bruta y, a continuación, se sinterizan a alta temperatura. El cobre humedece las partículas de tungsteno en fase líquida, rellenando los poros y formando una estructura compuesta uniforme. La infiltración al vacío prepara primero un esqueleto de tungsteno poroso, que posteriormente se calienta por encima del punto de fusión del cobre en un entorno de vacío. El cobre líquido se infiltra y rellena la pieza bruta, aumentando la densidad del material.

El núcleo del mecanismo compuesto reside en la incompatibilidad física y química del tungsteno y el cobre. No se forman compuestos significativos entre ambos, y la interfaz está principalmente unida mecánicamente y parcialmente difundida, lo que minimiza las transiciones de fase o la formación de fases frágiles. El esqueleto de tungsteno proporciona soporte estructural y resistencia a altas temperaturas, mientras que la fase de cobre forma una red continua, optimizando la conductividad eléctrica y térmica. En la microestructura, las partículas de tungsteno se distribuyen típicamente como polígonos irregulares, con un tamaño que varía de 5 a 20 micras. El cobre llena los poros, y la porosidad se puede controlar por debajo del 1 %. El tratamiento térmico y los procesos asistidos por presión (como el prensado isostático en caliente) mejoran aún más la unión y la uniformidad de la interfaz. El mecanismo compuesto también implica la adaptación de la expansión térmica.

2.3.1 Compatibilidad física de los electrodos de tungsteno-cobre

La compatibilidad física de los electrodos de tungsteno-cobre es un componente importante de su mecanismo compuesto, que implica la coordinación de las propiedades térmicas, mecánicas y eléctricas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del tungsteno y el cobre. En primer lugar, la compatibilidad térmica se refleja en la correspondencia del coeficiente de expansión térmica (CTE). El tungsteno tiene un CTE de 4,5 ppm/°C, mientras que el cobre tiene un CTE de 17 ppm/°C. La diferencia es significativa cuando se usa solo, pero al ajustar la relación del compuesto (p. ej., WCu 85/15), el CTE final se puede controlar a 6-8 ppm/°C, cercano al de los sustratos de silicio o cerámica, lo que reduce la concentración de tensiones durante el ciclo térmico. Esta propiedad es particularmente importante en aplicaciones de encapsulado y sensores microelectrónicos para prevenir la deformación o fractura del encapsulado.

La compatibilidad mecánica se refleja en el equilibrio entre dureza y tenacidad. El tungsteno tiene una dureza de hasta 3430 HV, mientras que el cobre tiene una dureza de solo unos 70 HV. A través del compuesto, la dureza de los electrodos de tungsteno-cobre suele estar entre 200-300 HV, combinando resistencia al desgaste y ductilidad. El esqueleto de tungsteno proporciona soporte mecánico, mientras que la fase de cobre mejora la tenacidad, absorbe la energía del impacto y previene la fractura frágil, especialmente en EDM, donde se reduce el desgaste de la superficie del electrodo. La compatibilidad eléctrica es el núcleo. La alta conductividad del cobre y la menor conductividad del tungsteno (1.8×10^7 S/m) están coordinadas a través de una red continua de fases de cobre. La conductividad eléctrica es cercana al 80%-90% del cobre puro, satisfaciendo las necesidades de transmisión de alta corriente.

La compatibilidad física también implica la estabilidad interfacial. No se produce una reacción química significativa entre el tungsteno y el cobre; la interfaz está principalmente unida y difundida mecánicamente, lo que minimiza la formación de fases frágiles y mejora la estabilidad a largo plazo. El proceso de infiltración al vacío optimiza la humectación interfacial, reduce los poros vacíos y mejora la densidad. La conductividad térmica también refleja la compatibilidad, ya que la fase de cobre domina la conducción térmica y la fase de tungsteno proporciona estabilidad térmica. En el futuro, la nanotecnología o la modificación de superficies podrían mejorar aún más la compatibilidad y permitir aplicaciones en entornos más exigentes, como sensores de alta temperatura o dispositivos 5G.

2.3.1.1 Compatibilidad estructural

Los electrodos de tungsteno-cobre son un componente fundamental de su compatibilidad física. Esto implica la correspondencia geométrica y la estabilidad interfacial de las microestructuras de tungsteno y cobre, lo que influye directamente en las propiedades mecánicas y la fiabilidad a largo plazo del electrodo. La compatibilidad estructural se refleja principalmente en la coordinación entre la estructura de tungsteno y la fase de relleno de cobre, lograda mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío. En la pulvimetalurgia, el polvo de tungsteno (normalmente de 5 a 20 micras) y el polvo de cobre se mezclan en una proporción específica (p. ej., WCu 70/30) y se prensan hasta formar un cuerpo verde. Durante la sinterización, el cobre, en su fase líquida, humedece las partículas de tungsteno y rellena los poros, formando una estructura compuesta con el tungsteno como estructura continua y el cobre como fase dispersa. El proceso de infiltración al vacío crea primero una estructura porosa de tungsteno. A continuación, esta se calienta en un entorno de vacío a una temperatura superior al punto de fusión del cobre (1083 °C), lo que permite que el cobre líquido se infiltre y rellene los poros. Esto reduce significativamente la porosidad (normalmente por debajo del 1%) y mejora la densidad y la consistencia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del material. Las partículas de tungsteno se distribuyen en un patrón poligonal irregular, y el cobre rellena los huecos de manera uniforme. La interfaz está principalmente entrelazada y difundida mecánicamente, lo que minimiza el riesgo de microfisuras o delaminación. La compatibilidad estructural también se refleja en la uniformidad del tamaño del grano y la distribución de las fases. Los granos finos, conseguidos mediante la introducción de polvo de nanotungsteno, mejoran la resistencia mecánica y la resistencia al desgaste, alcanzando una resistencia a la compresión superior a 1000 MPa y una dureza de entre 200 y 300 HV. La red continua de fases de cobre mantiene la integridad de la trayectoria conductora, reduciendo la variabilidad de la resistencia. El análisis microscópico muestra que la distribución uniforme de las fases mejora la estabilidad general del electrodo. En el mecanizado por electrochispa (EDM), la uniformidad estructural reduce la variabilidad de la descarga, mejorando la precisión del mecanizado y la calidad de la superficie. En el encapsulado microelectrónico, la compatibilidad estructural garantiza una unión de baja tensión con sustratos de silicio (CET de aproximadamente 2,6 ppm/°C) o cerámicos, lo que evita la deformación o fractura durante los ciclos térmicos. Las pruebas mecánicas y la microscopía electrónica de barrido han demostrado que la estabilidad de la unión interfacial es clave para la compatibilidad estructural, reduciendo los fallos causados por tensiones térmicas o mecánicas.

Además, el proceso de fabricación es crucial para la compatibilidad estructural. El proceso de prensado isostático en caliente (HIP) utiliza presión omnidireccional a altas temperaturas para comprimir aún más los poros, mejorar la unión interfacial entre el tungsteno y el cobre y aumentar la resistencia a la fatiga del material. Los polvos ultrafinos introducidos mediante nanotecnología mejoran la resistencia del límite de grano, lo que los hace adecuados para electrodos de alta precisión. Optimizar la compatibilidad estructural también implica controlar el tamaño de las partículas de polvo y ajustar los parámetros de sinterización. Las futuras innovaciones en simulación dinámica y procesos refinarán aún más la distribución del grano y reducirán la porosidad por debajo del 0,5 %, lo que permitirá aplicaciones con geometrías complejas o alta durabilidad, como componentes aeroespaciales o electrodos para dispositivos 5G.

2.3.1.2 Compatibilidad térmica

La compatibilidad térmica de los electrodos de tungsteno-cobre es un componente clave de su compatibilidad física. Esto implica la coordinación de la expansión térmica y la conductividad térmica entre el tungsteno y el cobre, lo que afecta la estabilidad y confiabilidad del electrodo durante el ciclado térmico y los entornos de alta temperatura. El coeficiente de expansión térmica (CTE) del tungsteno es de 4,5 ppm/°C, mientras que el del cobre es de 17 ppm/°C. Si bien la diferencia es significativa cuando se usa solo, al ajustar la relación compuesta, el CTE de los electrodos de tungsteno-cobre se puede controlar a 6-8 ppm/°C. Este valor es similar al de los sustratos de silicio (aproximadamente 2,6 ppm/°C) o cerámica de alúmina (aproximadamente 7 ppm/°C). Esto reduce la concentración de tensión durante el ciclado térmico, lo que previene la deformación o fractura del paquete, y es particularmente eficaz en el empaquetado microelectrónico y aplicaciones de sensores de alta temperatura. Lograr la compatibilidad térmica se basa en optimizar la relación de tungsteno a cobre. Por ejemplo, una relación 85/15 WCu ofrece un buen rendimiento a altas temperaturas. Las simulaciones térmicas han verificado sus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

propiedades de baja tensión, con una expansión térmica que coincide con el sustrato de silicio en un 10 %.

La conductividad térmica es otro aspecto clave de la compatibilidad térmica. El cobre tiene una conductividad térmica de aproximadamente $400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, superior a los $174 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ del tungsteno. La conductividad térmica de un electrodo compuesto de tungsteno y cobre varía de 180 a $220 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. La fase de cobre domina la conducción del calor, mientras que la fase de tungsteno proporciona estabilidad térmica. En la electroerosión, la alta conductividad térmica dispersa rápidamente el calor de descarga (alcanzando instantáneamente temperaturas de miles de $^{\circ}\text{C}$), lo que evita el sobrecalentamiento localizado del electrodo que podría provocar deformaciones o quemaduras en la pieza de trabajo y mejora la calidad de la superficie. En la soldadura por resistencia, la distribución uniforme del calor reduce la zona afectada por el calor (ZAT), lo que mejora la resistencia y la durabilidad de la junta soldada. La compatibilidad térmica también implica diferencias en los puntos de fusión. El punto de fusión del tungsteno de 3422°C y el punto de fusión del cobre de 1083°C se armonizan mediante la sinterización en fase líquida. El cobre llena el esqueleto de tungsteno a altas temperaturas, lo que mejora la estabilidad térmica. Datos experimentales demuestran que la conductividad térmica del WCu 70/30 permite un funcionamiento estable a una corriente de 200 A y una temperatura de 300°C . La introducción de granos finos mediante nanotecnología optimiza aún más la conducción térmica, reduciendo la resistencia térmica en aproximadamente un 15 %.

La compatibilidad térmica también se ve influenciada por la microestructura. La baja porosidad y la distribución uniforme de las fases reducen la dispersión durante la conducción del calor, mientras que el prensado isostático en caliente (HIP) mejora la conductividad térmica de la interfaz. Las pruebas de fatiga térmica muestran que la tasa de deformación de los electrodos de tungsteno-cobre durante el ciclo térmico de -50°C a 300°C es inferior al 0,1 %, lo que demuestra su excelente estabilidad térmica. En el futuro, mediante el diseño de gradiente funcional (donde el contenido de tungsteno disminuye gradualmente desde el interior hacia la superficie) o la introducción de fases intermedias (como el molibdeno), la compatibilidad térmica se puede optimizar aún más para adaptarse a diferencias de temperatura aún mayores o requisitos complejos de gestión térmica, como en sensores de presión de alta temperatura o equipos de potencia.

2.3.2 Sinergia de rendimiento de los electrodos de tungsteno-cobre

El rendimiento sinérgico de los electrodos de tungsteno-cobre es la máxima expresión de su mecanismo compuesto. Esta sinergia se basa en los efectos complementarios del tungsteno y el cobre en la conductividad eléctrica, la conductividad térmica, la resistencia mecánica y la durabilidad, mejorando en conjunto el rendimiento general del electrodo en diversas aplicaciones. Este rendimiento sinérgico se basa en procesos de fabricación optimizados, como la pulvimetalurgia y la infiltración al vacío, para garantizar una distribución uniforme y la estabilidad interfacial entre el esqueleto de tungsteno y el relleno de cobre. El alto punto de fusión del tungsteno (3422°C) proporciona resistencia a las altas temperaturas y a la erosión por arco, mientras que la alta conductividad eléctrica y térmica del cobre optimiza el rendimiento de la gestión eléctrica y térmica. El electrodo compuesto de tungsteno-cobre logra un equilibrio entre un coeficiente de expansión térmica de $6-8 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ y una conductividad térmica

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de 180-220 W/ m· K , cumpliendo con los requisitos del encapsulado microelectrónico y los sensores de alta temperatura. La baja porosidad y el tamaño de grano fino de la microestructura mejoran la resistencia mecánica y la resistencia al desgaste, dando como resultado una resistencia a la compresión superior a 1000 MPa y una dureza entre 200 y 300 HV.

2.3.2.1 Sinergia de conductividad eléctrica y térmica

Los electrodos de tungsteno-cobre son una manifestación esencial de su rendimiento sinérgico. Esta sinergia se deriva de las propiedades eléctricas y térmicas complementarias del tungsteno y el cobre, lo que mejora directamente la eficiencia del electrodo en aplicaciones de electroerosión, soldadura y microelectrónica. La conductividad eléctrica proviene principalmente de la fase de cobre, que presenta una alta conductividad de $5,8 \times 10^7$ S/m, formando una red conductora continua que garantiza una transmisión eficiente de la corriente. A pesar de la menor conductividad del tungsteno en los electrodos de tungsteno-cobre, al optimizar la proporción de cobre (p. ej., WCu 70/30), la conductividad puede alcanzar entre el 80 % y el 90 % de la del cobre puro, satisfaciendo así las altas demandas de corriente de la electroerosión y los requisitos de baja resistencia de la soldadura. La distribución uniforme de la fase de cobre en la microestructura reduce las irregularidades de la resistencia y mejora la estabilidad de la descarga, especialmente en aplicaciones de mecanizado de precisión como los micromoldes . Los datos experimentales demuestran que el WCu 70/30 alcanza una conductividad eléctrica cercana a la del cobre puro en condiciones de alta corriente, lo que permite un mecanizado de alta precisión y eficiencia.

La sinergia de la conductividad térmica está estrechamente relacionada con la conductividad eléctrica. El cobre tiene una conductividad térmica de aproximadamente 400 W/ m· K , significativamente mayor que los 174 W/ m· K del tungsteno . La conductividad térmica del electrodo compuesto de tungsteno-cobre varía de 180 a 220 W/ m· K . La fase de cobre domina la transferencia de calor, mientras que la fase de tungsteno proporciona estabilidad térmica. En la electroerosión, la conductividad térmica dispersa rápidamente el calor de descarga al exterior del electrodo, evitando el sobrecalentamiento localizado que podría provocar deformaciones o quemaduras en la pieza de trabajo. En la soldadura por resistencia, la distribución del calor reduce uniformemente la zona afectada por el calor (ZAT), mejorando la resistencia y la durabilidad de la unión soldada y manteniendo la ZAT dentro de 0,1 mm. El alto punto de fusión del tungsteno (3422 °C) garantiza la integridad estructural en condiciones de arco de alta temperatura, mientras que el bajo punto de fusión del cobre (1083 °C) mejora la continuidad de la ruta de conducción del calor a través del llenado de la fase líquida. La conductividad térmica de una relación 85/15 WCu permite un funcionamiento estable a 300 °C.

Este rendimiento sinérgico también se refleja en la combinación de un bajo coeficiente de expansión térmica y conductividad térmica, que reduce el estrés térmico y mejora la estabilidad a largo plazo. La nanotecnología introduce granos finos (<5 micras), optimizando aún más la red de conductividad eléctrica y térmica, reduciendo la resistencia térmica y la resistencia eléctrica en aproximadamente un 15% y un 10%, respectivamente, lo que la hace adecuada para la disipación de calor de chips de alta potencia. En aplicaciones prácticas, el rendimiento sinérgico de los electrodos de tungsteno-cobre sobresale en contactos de interruptores de alto voltaje y equipos 5G, como el mantenimiento de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estabilidad conductiva y la eficiencia de la gestión térmica a una corriente de 500 A. En el futuro, al ajustar la relación tungsteno-cobre, introducir una fase intermedia (como el molibdeno) o modificar la superficie, se puede mejorar el efecto sinérgico para acomodar corrientes más altas o requisitos complejos de gestión térmica, como en sensores de alta temperatura o equipos de transmisión de potencia.

2.3.2.2 Sinergia entre la resistencia a altas temperaturas y la estabilidad estructural

Los electrodos de tungsteno-cobre son una manifestación clave de su sinergia de rendimiento. Esta sinergia se deriva de los efectos complementarios del tungsteno y el cobre en entornos de alta temperatura, lo que garantiza la fiabilidad y la larga vida útil del electrodo en condiciones extremas. La resistencia del tungsteno a altas temperaturas se debe principalmente al tungsteno, cuyo punto de fusión es de 3422 °C, el más alto de todos los metales. Esta propiedad permite que los electrodos de tungsteno-cobre resistan choques de arco de hasta 3000 °C durante el mecanizado por electroerosión (EDM) o la soldadura por resistencia sin fusión ni deformación significativas. En estructuras compuestas, el tungsteno actúa como material esquelético, formando una red de alta resistencia y térmicamente estable que resiste las tensiones térmicas a altas temperaturas. En aplicaciones prácticas, como el mecanizado de materiales de alta dureza o la desconexión por alta corriente, la resistencia del tungsteno a altas temperaturas garantiza la integridad de la superficie del electrodo, reduciendo la ablación y la pérdida de material.

La sinergia de la estabilidad estructural depende del relleno de cobre y la optimización de la microestructura. El cobre tiene un punto de fusión de 1083 °C. Durante la sinterización o la infiltración al vacío, rellena el esqueleto de tungsteno en forma líquida, aumentando la densidad del material. La porosidad suele controlarse por debajo del 1%. Esta estructura de baja porosidad reduce el riesgo de microfisuras durante los ciclos térmicos. La ductilidad de la fase de cobre absorbe aún más la tensión térmica y previene la fractura frágil. En la microestructura, la distribución uniforme de las partículas de tungsteno y cobre se logra mediante pulvimetalurgia o procesos de prensado isostático en caliente.

La sinergia entre la resistencia a altas temperaturas y la estabilidad estructural también se refleja en la adaptación a la expansión térmica. El bajo coeficiente de expansión térmica del tungsteno se ajusta proporcionalmente al alto coeficiente de expansión térmica del cobre, lo que resulta en un CTE compuesto de 6-8 ppm/°C, similar al del silicio (2,6 ppm/°C) o los sustratos cerámicos, lo que reduce la concentración de tensión térmica. En el encapsulado microelectrónico, esta propiedad previene la deformación entre el chip y los electrodos; en los sensores de alta temperatura, facilita el funcionamiento a alta temperatura a largo plazo. Los tratamientos superficiales (como el niquelado) mejoran aún más la resistencia a la oxidación y prolongan la vida útil en entornos húmedos o industriales.

2.4 Requisitos de las materias primas clave para los electrodos de cobre y tungsteno

Requisitos de pureza de la materia prima

Como material clave ampliamente utilizado en diversos campos de alta tecnología, el rendimiento de los electrodos de tungsteno-cobre está estrechamente relacionado con la calidad de las materias primas clave

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

utilizadas: polvo de tungsteno y polvo de cobre. Unas materias primas de alta pureza son fundamentales para garantizar el excelente rendimiento de los electrodos de tungsteno-cobre. Al preparar electrodos de tungsteno-cobre, se suele requerir que la pureza del polvo de tungsteno supere el 99,9 %. Incluso en aplicaciones con requisitos de rendimiento extremadamente altos, como el mecanizado por electrochispa de ultraprecisión, la pureza debe ser mayor. Esto se debe a que la presencia de impurezas, incluso en cantidades traza, puede generar defectos en el electrodo y afectar la uniformidad de la estructura del material. Por ejemplo, si el polvo de tungsteno contiene impurezas como hierro y níquel, estas pueden reaccionar con el tungsteno y el cobre durante la sinterización a alta temperatura y formar fases frágiles, lo que reduce la resistencia y la tenacidad del electrodo y lo hace propenso a agrietarse o incluso romperse durante el uso.

De manera similar, la pureza del polvo de cobre también es crucial. La pureza del polvo de cobre de alta calidad generalmente no debe ser inferior al 99,95 %. El polvo de cobre impuro puede contener óxidos, humedad u otras impurezas, lo que afectará seriamente la conductividad y ductilidad del cobre. En electrodos de tungsteno-cobre, el cobre contribuye principalmente a una buena conductividad eléctrica y térmica. Si el polvo de cobre es impuro, la eficiencia de conductividad eléctrica y térmica del electrodo se reducirá considerablemente. Por ejemplo, cuando hay mucho óxido de cobre en el polvo de cobre, la resistividad del óxido de cobre es mucho mayor que la del cobre puro, lo que aumentará significativamente la resistencia del electrodo, lo que resultará en una disminución en la eficiencia de conversión de energía eléctrica en energía térmica en aplicaciones como el mecanizado por electrochispa. Esto no solo afecta la eficiencia del procesamiento, sino que también puede causar sobrecalentamiento local del electrodo y acelerar la pérdida del electrodo.

Control del tamaño de partículas y distribución del tamaño de partículas

Además de la pureza, el tamaño y la distribución de las partículas de polvo de tungsteno y cobre son factores clave que afectan el rendimiento de los electrodos de tungsteno-cobre. El tamaño de partícula debe seleccionarse con precisión en función de los diferentes procesos de preparación y las aplicaciones finales. En el proceso de pulvimetalurgia convencional para la preparación de electrodos de tungsteno-cobre, el tamaño de partícula del polvo de tungsteno se controla generalmente entre 1 y 10 μm . Un polvo de tungsteno más fino puede aumentar el área de contacto entre el tungsteno y el cobre, promover la difusión y la fusión entre elementos durante el proceso de sinterización y facilitar la formación de una microestructura más uniforme y densa, mejorando así la resistencia y la dureza del electrodo, haciéndolo más adecuado para el procesamiento de materiales de alta dureza. Sin embargo, un polvo de tungsteno demasiado fino también puede presentar problemas, como una baja fluidez, que dificulta su distribución uniforme durante el proceso de mezcla y moldeo, y que puede provocar una densidad irregular en el cuerpo verde. Si bien el polvo de tungsteno más grueso tiene mejor fluidez, aumenta el tamaño de los poros internos del electrodo sinterizado, lo que reduce la densidad y afecta al rendimiento general del electrodo.

El polvo de cobre suele tener un tamaño de partícula relativamente fino. Esto se debe a que el cobre tiene un punto de fusión más bajo, lo que facilita el llenado de los espacios entre las partículas de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durante el proceso de sinterización. Un polvo de cobre con el tamaño de partícula adecuado garantiza una buena humectabilidad y forma una interfaz estable con el tungsteno. Por ejemplo, en electrodos de electroerosión, si el tamaño de partícula del polvo de cobre es adecuado, cuando el electrodo se calienta localmente durante la descarga, el cobre puede disipar rápidamente el calor, evitando así el desgaste excesivo del electrodo por sobrecalentamiento local.

Además, la uniformidad de la distribución del tamaño de partícula también es crucial. Idealmente, tanto los polvos de tungsteno como los de cobre deberían tener un rango estrecho de distribución del tamaño de partícula. Si la distribución del tamaño de partícula es demasiado amplia, las partículas de diferentes tamaños pueden segregarse fácilmente durante el proceso de mezcla, lo que resulta en una composición y un rendimiento desiguales del material del electrodo final. Por ejemplo, las zonas donde se concentran partículas grandes de polvo de tungsteno pueden presentar una dureza alta, pero una tenacidad insuficiente, mientras que las zonas donde se concentran partículas pequeñas pueden presentar una densidad baja, lo que resulta en un rendimiento deficiente durante el uso.

Influencia integral de las características de la materia prima en el rendimiento del electrodo

Las propiedades inherentes del tungsteno y el cobre son decisivas en el rendimiento de los electrodos de tungsteno-cobre. El punto de fusión extremadamente alto del tungsteno (3410 °C) y su dureza confieren a los electrodos de tungsteno-cobre una excelente resistencia a altas temperaturas y al desgaste. En entornos de alta temperatura, como el funcionamiento de electrodos de tubo de descarga de alta tensión, donde la temperatura instantánea del material de contacto puede alcanzar miles de grados Celsius, el tungsteno mantiene la forma básica y la integridad estructural del electrodo, evitando el ablandamiento y la deformación debidos a las altas temperaturas. Además, su alta dureza reduce la susceptibilidad al desgaste del electrodo durante el mecanizado de piezas de alta dureza, como en la electroerosión de moldes de carburo, lo que garantiza la precisión del mecanizado.

El cobre, con su excelente conductividad eléctrica y térmica, proporciona a los electrodos de tungsteno-cobre las ventajas de una rápida disipación del calor y una conducción eléctrica eficiente. Durante la electroerosión, las descargas frecuentes entre el electrodo y la pieza de trabajo generan una gran cantidad de calor. El cobre puede disipar rápidamente este calor, reduciendo la temperatura del electrodo, la deformación térmica y la fatiga térmica, y prolongando su vida útil. Una buena conductividad eléctrica garantiza un proceso de descarga estable y mejora la eficiencia del mecanizado. Cuando el polvo de tungsteno y el polvo de cobre se combinan en una proporción determinada, ambos se complementan y sinergizan para determinar el rendimiento del electrodo de tungsteno-cobre. Una proporción adecuada de tungsteno-cobre garantiza un equilibrio óptimo entre resistencia, dureza, conductividad eléctrica y térmica, y resistencia a la ablación. Por ejemplo, los electrodos de soldadura por resistencia generalmente requieren mayor dureza y conductividad, y el contenido de tungsteno puede aumentarse adecuadamente.

2.4.1 Requisitos del polvo de tungsteno

Los electrodos de tungsteno-cobre son cruciales para garantizar la estabilidad estructural y el rendimiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durante el proceso de compuestos. Estos requisitos incluyen pureza, tamaño de partícula y morfología. La pureza es fundamental, requiriendo impurezas inferiores al 0,1 %, en particular las de oxígeno, carbono y hierro. Un exceso de impurezas puede debilitar los límites de grano y reducir la conductividad, lo que afecta al rendimiento del electrodo. Normas internacionales como la ASTM B702 estipulan que el polvo de tungsteno de alta pureza debe producirse mediante reducción de hidrógeno o precipitación química, con un contenido de oxígeno inferior al 0,05 %. El tamaño de partícula es otro parámetro clave. Este tamaño suele oscilar entre 1 y 20 micras. Las partículas finas se introducen mediante nanotecnología para mejorar la uniformidad del grano y la resistencia mecánica, mientras que las partículas gruesas (>20 micras) se utilizan para el procesamiento de electrodos rugosos. La elección del tamaño de partícula depende de la aplicación. La morfología requiere polvo de tungsteno esférico o casi esférico para reducir la porosidad y aumentar la densidad de sinterización. El análisis por microscopía electrónica de barrido muestra que los polvos esféricos tienen mejor fluidez que los polvos irregulares y mejoran la eficiencia de llenado en aproximadamente un 15%. La estabilidad química requiere que el polvo de tungsteno resista entornos ácidos y alcalinos para evitar la oxidación durante el proceso de preparación, y el espesor de la capa de óxido superficial debe controlarse por debajo de 10 nm. La fluidez, medida por el método de caudal de efecto Hall, es mejor que 20 s/50 g, lo que garantiza una mezcla uniforme del polvo. La densidad aparente del polvo de tungsteno afecta la compactación y debe coincidir con la del polvo de cobre para reducir el riesgo de delaminación. Los procesos de preparación como la esferoidización por plasma o la aleación mecánica pueden optimizar la distribución del tamaño de partícula. En el futuro, los polvos de nanotungsteno de alta pureza pueden mejorar la consistencia microestructural de los electrodos, haciéndolos adecuados para aplicaciones de alta precisión como el encapsulado microelectrónico y los dispositivos 5G.

2.4.2 Requisitos del polvo de cobre

Los electrodos de tungsteno-cobre se centran en su conductividad y propiedades de relleno, lo que garantiza la capacidad de gestión eléctrica y térmica del material compuesto. La pureza es un requisito fundamental. El contenido de impurezas del polvo de cobre debe ser inferior al 0,05 % y el contenido de oxígeno debe controlarse por debajo del 0,03 %. El exceso de oxígeno puede provocar la formación de óxido de cobre, lo que reduce la conductividad y la humectabilidad. El polvo de cobre electrolítico o polvo de cobre atomizado se prepara atomizando un electrolito de alta pureza o un gas inerte y cumple con la norma ASTM B413. El tamaño de partícula suele estar entre 5 y 15 micras. El tamaño de partícula fino mejora la eficiencia de relleno, mientras que el tamaño de partícula grueso es adecuado para una sinterización rápida. Debe coincidir con el tamaño de partícula del polvo de tungsteno y la relación de tamaño de partícula debe controlarse entre 1:2 y 1:3 para optimizar la distribución de fases.

El polvo de cobre debe tener forma esférica o casi esférica para minimizar la porosidad y mejorar la fluidez. El caudal por efecto Hall debe ser mejor que 15 s/50 g, la densidad aparente debe ser de aproximadamente 4-6 g/cm³ y el polvo debe compactarse de manera coordinada con el polvo de tungsteno. La estabilidad química requiere una capa de óxido superficial de menos de 5 nm de espesor para evitar la formación de poros durante la sinterización. El tratamiento de la superficie (como el recubrimiento orgánico) puede mejorar la resistencia a la oxidación. La conductividad eléctrica debe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aproximarse a la del cobre puro ($5,8 \times 10^7$ S/m) y la conductividad térmica debe ser de aproximadamente 400 W/ m·K para soportar el rendimiento del electrodo. Los procesos de preparación, como la atomización de agua o la atomización de gas, pueden influir en las propiedades del polvo. Los esfuerzos futuros, como el uso de polvos de cobre ultrafinos o aleaciones (p. ej., Cu-Ag), pueden mejorar la mojabilidad y la estabilidad conductiva, haciéndolos adecuados para aplicaciones de alta corriente.

2.4.3 Normas de pretratamiento de materias primas

Los electrodos de tungsteno-cobre están diseñados para garantizar una mezcla uniforme del polvo y procesos de preparación controlables, lo cual influye directamente en la calidad del material compuesto. El secado es un paso crítico. Los polvos de tungsteno y cobre deben secarse al vacío o en un entorno de gas inerte (como argón) para evitar la formación de poros durante la sinterización. La uniformidad de la mezcla se consigue mediante un molino de bolas o un mezclador en V. La distribución del tamaño de partícula tras la mezcla se controla con una precisión de $\pm 5\%$, y la difracción de rayos X (DRX) verifica la consistencia de la fase.

La clasificación del tamaño de partícula se realiza mediante tamizado, ajustándose el tamaño del tamiz a los requisitos de tamaño de partícula para eliminar partículas de gran tamaño o ultrafinas, con una desviación estándar de la distribución del tamaño de partícula inferior al 10%. El tratamiento superficial incluye desoxidación o recubrimiento, y la capa de óxido se elimina mediante reducción de hidrógeno. La fluidez del polvo se comprueba mediante el método de caudal Hall, con un valor superior a 20 s/50 g, lo que garantiza un prensado uniforme. El almacenamiento y el transporte requieren un embalaje sellado, protegido de la luz y la humedad, para evitar la oxidación. Las normas de pretratamiento deben cumplir con las normas ISO 13320 y ASTM B214. En el futuro, la clasificación automatizada y la monitorización en tiempo real mejorarán la precisión del pretratamiento y optimizarán el rendimiento del electrodo.



Electrodo de cobre y tungsteno CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

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

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

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

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

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

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

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

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

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 3: Propiedades físicas y químicas de los electrodos de tungsteno-cobre

Las propiedades físicas y químicas de los electrodos de tungsteno-cobre se derivan del efecto sinérgico del tungsteno y el cobre, que integra las ventajas fundamentales de ambos metales. En cuanto a las propiedades físicas, su densidad aumenta con el aumento del contenido de tungsteno y se mantiene en un nivel general alto; el punto de fusión se mantiene alto gracias a las características de alto punto de fusión del tungsteno, que es muy superior al del cobre puro, y puede resistir choques térmicos instantáneos en entornos de alta temperatura sin deformarse fácilmente. Su conductividad eléctrica y térmica es excepcional, lo que permite una conducción eficiente de la corriente y una rápida disipación del calor generado durante el trabajo, evitando eficazmente las pérdidas por sobrecalentamiento local. En cuanto a las propiedades mecánicas, presenta una dureza moderada y una alta resistencia a la compresión, considerando un cierto grado de tenacidad, y no es fácil de romper al ser sometido a choques mecánicos. Además, su coeficiente de expansión lineal es bajo y su estabilidad térmica es excelente. Incluso en entornos con grandes cambios de temperatura, el tamaño se mantiene estable, lo que lo hace adecuado para mecanizados de precisión con estrictos requisitos de precisión.

3.1 Propiedades físicas del electrodo de cobre y tungsteno

Los electrodos de tungsteno-cobre, que abarcan densidad, coeficiente de expansión térmica, conductividad eléctrica y conductividad térmica, constituyen la base de su rendimiento superior en una amplia gama de aplicaciones. Estas propiedades inciden directamente en la estabilidad y eficiencia del electrodo en electroerosión, soldadura y encapsulado microelectrónico. Las propiedades físicas de los electrodos de tungsteno-cobre se derivan de las propiedades combinadas del tungsteno y el cobre: el tungsteno proporciona un alto punto de fusión y resistencia mecánica, mientras que el cobre aporta una alta conductividad eléctrica y térmica. La optimización de la microestructura mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío da como resultado una distribución de fase uniforme y una baja porosidad. Este rendimiento combinado permite que los electrodos de tungsteno-cobre mantengan su fiabilidad en entornos complejos, con altas temperaturas y corrientes elevadas.

3.1.1 Densidad del electrodo de cobre y tungsteno

Los electrodos de tungsteno-cobre son un indicador importante de sus propiedades físicas. Reflejan la densidad y la porosidad internas del material e influyen directamente en la resistencia mecánica, la conductividad eléctrica y la conductividad térmica. Las características de densidad se derivan de la proporción de tungsteno y cobre en la composición y de la optimización del proceso de preparación. La alta densidad del tungsteno y la baja densidad del cobre se equilibran mediante una proporción específica para formar un material compuesto con propiedades específicas de masa y volumen. La densidad determina la resistencia al desgaste y a la deformación del electrodo durante el procesamiento. En aplicaciones de microelectrónica, una densidad adecuada ayuda a adaptarse al sustrato y a reducir la concentración de tensiones. Los procesos de preparación, como la pulvimetalurgia y la infiltración al vacío, influyen significativamente en la uniformidad de la densidad final al controlar la temperatura y la presión de sinterización. Una menor porosidad suele corresponder a valores de densidad más altos, lo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que mejora el rendimiento general del material.

La medición y el control de la densidad son cruciales en la producción de electrodos de tungsteno-cobre, lo que afecta su rendimiento en aplicaciones prácticas, como la tasa de remoción de material en el mecanizado por electrochispa o la eficiencia de la gestión térmica en la soldadura. Diferentes escenarios de aplicación pueden requerir el ajuste de la relación tungsteno-cobre para optimizar las características de densidad. Por ejemplo, los electrodos de alta densidad son más adecuados para escenarios que requieren alta durabilidad, mientras que los de menor densidad pueden utilizarse para diseños ligeros. La distribución de fases y la compacidad en la microestructura son factores clave en el rendimiento de la densidad, y la investigación futura podría mejorar aún más la controlabilidad de la densidad mediante nuevos procesos. Esta sección profundizará en los métodos de cálculo de densidad y analizará su papel en la optimización del rendimiento.

3.1.1.1 Método de cálculo de densidad

El cálculo de la densidad es un enfoque científico para determinar la densidad de los electrodos de tungsteno-cobre. Implica tanto mediciones experimentales como derivaciones teóricas, con el objetivo de evaluar con precisión la compacidad interna y la porosidad del material. Un método comúnmente utilizado es el método de Arquímedes, que mide la diferencia de masa entre el electrodo en el aire y el líquido y la combina con el volumen para calcular la densidad. Este método explota la flotabilidad de un objeto en un líquido. Primero se pesa la masa seca del electrodo, luego se sumerge en un líquido específico (como agua destilada). Se mide la diferencia de masa después de la inmersión y el volumen se calcula indirectamente utilizando la fórmula de flotabilidad. Luego se calcula la densidad como la relación entre la masa y el volumen. Este método es adecuado para muestras de electrodos con formas irregulares. Es importante asegurarse de que el líquido no reaccione químicamente con el material y controlar la temperatura para minimizar los errores.

Otro enfoque es el cálculo teórico, que utiliza reglas de mezcla para estimar la densidad total del material compuesto a partir de las fracciones de volumen y las densidades respectivas del tungsteno y el cobre. Este método requiere datos precisos sobre la proporción de los componentes y asume que el tungsteno y el cobre no experimentan cambios significativos de volumen durante el proceso del compuesto. La densidad es un promedio ponderado de las densidades de los componentes. El cálculo debe tener en cuenta la uniformidad de la distribución de fases. Los valores medidos reales pueden diferir de los valores teóricos debido a la porosidad o defectos microscópicos, lo que requiere corrección mediante análisis microscópico. Los cálculos teóricos son adecuados para el diseño preliminar y la optimización del proceso, pero los resultados experimentales deben verificarse.

Además, la tomografía de rayos X (XCT) o el análisis de penetración de mercurio pueden utilizarse para ensayos no destructivos de la porosidad y la distribución de la densidad de los electrodos. Estos métodos evalúan la densidad de la estructura interna mediante la reconstrucción de imágenes o el análisis de penetración por presión y son adecuados para electrodos con geometrías complejas. La elección del método de cálculo depende de las condiciones experimentales y los requisitos de precisión, y a menudo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

se combinan varios métodos para mejorar la fiabilidad.

3.1.1.2 Relación entre densidad y composición

La relación entre la densidad y la composición es clave para comprender las propiedades físicas de los electrodos de tungsteno-cobre, lo que refleja la influencia de la proporción de tungsteno a cobre en la densidad y la distribución de masa del material. La densidad de los electrodos de tungsteno-cobre se determina principalmente por la proporción de sus componentes. El tungsteno tiene mayor densidad que el cobre. Un aumento en el contenido de tungsteno suele conllevar un aumento de la densidad total, mientras que la menor densidad del cobre desempeña un papel diluyente en proporciones altas de cobre. La proporción de la composición se controla con precisión mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío. Por ejemplo, en las proporciones comunes de WCu 70/30 y WCu 80/20, predominan las características de alta densidad del tungsteno, mientras que el efecto de relleno del cobre optimiza la uniformidad de la microestructura. Los cambios de composición afectan directamente la distribución de fases. El tungsteno proporciona soporte estructural como material de esqueleto, y el cobre rellena los poros en forma de fase líquida. Ajustar la proporción modifica la porosidad y la densidad del material, lo que afecta el rendimiento de la densidad.

La dependencia de la composición de la densidad también está estrechamente relacionada con el proceso de preparación. En la metalurgia de polvos, la relación del tamaño de partícula y la uniformidad de la mezcla del polvo de tungsteno y el polvo de cobre determinan la uniformidad de la distribución de los componentes. La temperatura y la presión de sinterización afectan además el efecto de humectación y relleno del cobre, lo que afecta la densidad final. En la infiltración al vacío, la porosidad del esqueleto de tungsteno y la profundidad de penetración del cobre están directamente relacionadas con la relación de la composición. Un alto contenido de tungsteno puede provocar un relleno de poros insuficiente y reducir la densidad, mientras que un alto contenido de cobre mejora la eficiencia del relleno. El análisis microestructural muestra que pequeños cambios en la relación de la composición provocarán diferencias en el área de la interfaz de fase, lo que afecta la densidad general del material. En teoría, la relación entre la densidad y la composición se puede derivar a través de un modelo de promedio ponderado, donde la contribución de la densidad de cada componente se pondera por la fracción de volumen, pero el valor real se ve afectado por la porosidad y la unión de la interfaz y debe verificarse en combinación con experimentos.

Además, la relación entre la composición y la densidad también se ve afectada por las impurezas y los aditivos. Pequeñas cantidades de impurezas pueden alterar las propiedades interfaciales y afectar la estabilidad de la densidad. Las diferentes aplicaciones tienen diferentes requisitos de composición y densidad. Por ejemplo, los electrodos de alta densidad son más adecuados para aplicaciones resistentes al desgaste, mientras que los de baja densidad se utilizan para diseños ligeros.

3.1.1.3 Impacto de la densidad en las aplicaciones

La densidad es uno de los parámetros de rendimiento fundamentales de los electrodos de tungsteno-cobre.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Su nivel y distribución determinan directamente la aplicabilidad, estabilidad y eficiencia del electrodo en diferentes escenarios de aplicación. Especialmente en campos de alta tecnología como la electroerosión, la soldadura y el empaquetado microelectrónico, pequeñas diferencias de densidad pueden causar fluctuaciones significativas en el rendimiento, afectando así el efecto general del proceso.

1. La relación entre la densidad y las propiedades mecánicas y su impacto en la aplicación.

Los electrodos de cobre-tungsteno tienen una correlación positiva con su resistencia mecánica y al desgaste. Los electrodos de alta densidad presentan una porosidad interna extremadamente baja, y las partículas de tungsteno y las fases de cobre están estrechamente unidas para formar una microestructura densa. Esto permite que el material distribuya uniformemente la tensión al ser sometido a fuerzas externas o choques térmicos, lo que reduce la probabilidad de fractura o deformación local. Esta característica es especialmente crítica en la electroerosión (EDM): la descarga de alta frecuencia entre el electrodo y la pieza de trabajo genera choques térmicos y mecánicos instantáneos. Los electrodos de alta densidad, con su mayor resistencia a la compresión y a la deformación, pueden soportar eficazmente la fuerza de impacto durante el proceso de descarga, reducir las marcas de ablación superficial y el riesgo de colapso local debido a la desprendimiento de la estructura. Por ejemplo, en el mecanizado de precisión de materiales de alta resistencia, como el acero para moldes, los electrodos de cobre-tungsteno de alta densidad pueden mantener una precisión de forma estable y garantizar una separación de descarga uniforme, mejorando así el acabado superficial y la precisión dimensional de la pieza de trabajo, y prolongando la vida útil de un solo electrodo.

Por el contrario, los electrodos de baja densidad presentan más poros en su interior, lo que reduce el área de interfaz entre el tungsteno y el cobre, y reduce la resistencia general al desgaste del material. Este tipo de electrodo es más aplicable en tareas de procesamiento de baja carga y ciclo corto, como el procesamiento EDM de pequeñas piezas de plástico, que tiene requisitos relativamente bajos de precisión y durabilidad, y la ventaja de costo de los electrodos de baja densidad se puede reflejar. Sin embargo, en escenarios de procesamiento de alta energía y a largo plazo, los poros de los electrodos de baja densidad se convertirán en puntos de concentración de tensión. A medida que aumenta el tiempo de procesamiento, es probable que se formen microfisuras alrededor de los poros, lo que eventualmente provoca fallas del electrodo, aumentando la frecuencia de reemplazo y los costos de producción.

2. Impacto de la densidad en la conductividad térmica y la optimización del proceso

La densidad es el factor clave que afecta la conductividad térmica de los electrodos de cobre y tungsteno. Una alta densidad suele corresponder a una mejor eficiencia de conductividad térmica. Dentro del material, la fase de cobre actúa como el principal conductor térmico, y la continuidad de su distribución depende directamente de la densidad del material: en electrodos de alta densidad, la fase de cobre puede rellenar de forma más uniforme los huecos entre las partículas de tungsteno, formando una red continua de conductividad térmica. Esto permite que el calor generado en el área de procesamiento (como la alta temperatura instantánea durante la descarga de chispa eléctrica) se difunda rápidamente al interior del electrodo y se conduzca al exterior a través del soporte del equipo, reduciendo así el riesgo de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sobrecalentamiento local. Esta eficiente capacidad de disipación del calor es crucial para la precisión del procesamiento: si el calor se acumula en la superficie del electrodo, provocará un aumento repentino de la temperatura local, que no solo puede fundir o evaporar el material de la superficie del electrodo, lo que provoca una pérdida de tamaño, sino que también afecta a la estabilidad de la descarga y provoca defectos como quemaduras y grietas en la superficie de la pieza de trabajo. Por ejemplo, en el procesamiento de precisión de superficies curvas complejas como las palas de los motores de aeronaves, las características de disipación de calor eficientes de los electrodos de cobre de tungsteno de alta densidad pueden garantizar la estabilidad de la temperatura durante el procesamiento a largo plazo, mantener la consistencia de los parámetros de descarga y, en última instancia, lograr un conformado de alta precisión de la pieza de trabajo.

Los electrodos de baja densidad presentan una distribución discontinua de la fase de cobre, y sus poros dificultan la conducción térmica, formando una "zona de resistencia térmica" y reduciendo la eficiencia de disipación. En procesos de baja potencia, este defecto puede no ser evidente, pero en la electroerosión de alta energía (como el mecanizado de desbaste de moldes grandes), la acumulación de calor aumenta significativamente el desgaste del electrodo, obligando al proceso a reducir la energía de descarga para evitar el sobrecalentamiento, lo que reduce indirectamente la eficiencia del proceso. Por lo tanto, en aplicaciones con requisitos estrictos de disipación térmica, los electrodos de alta densidad son una opción clave para mejorar la estabilidad del proceso.

3. Múltiples funciones de la densidad en aplicaciones de soldadura

En el campo de la soldadura, la densidad de los electrodos de cobre-tungsteno determina directamente la calidad y la eficiencia de la soldadura al afectar la conductividad eléctrica y la capacidad de gestión térmica. Los electrodos de alta densidad presentan una distribución continua de las fases de cobre y valores de resistencia más bajos, lo que proporciona una trayectoria de transmisión de corriente estable para el proceso de soldadura y reduce el calor generado por una resistencia excesiva. Este calor adicional no solo desperdicia energía, sino que también puede provocar el sobrecalentamiento y la deformación del electrodo, lo que afecta la estabilidad del contacto entre el electrodo y la pieza de trabajo. Por ejemplo, en la soldadura por puntos de resistencia de carrocerías de automóviles, los electrodos de cobre-tungsteno de alta densidad mantienen una salida de corriente estable a altas corrientes, lo que garantiza la concentración de calor y la formación de pepitas en el punto de soldadura, evitando defectos como soldaduras frías o penetraciones. En procesos de soldadura continua, como la soldadura por costura, su excelente conductividad eléctrica también reduce las fluctuaciones de corriente y garantiza la uniformidad de la soldadura.

La relación entre la densidad y el peso del electrodo también afecta al equipo de soldadura. Los electrodos de alta densidad son más pesados y son adecuados para equipos de soldadura automatizados fijos: los brazos robóticos o las fijaciones de estos equipos tienen una gran capacidad de carga, y los contrapesos se pueden ajustar para asegurar un contacto preciso entre el electrodo y la pieza de trabajo. Sin embargo, en equipos de soldadura portátiles (como las pistolas de soldadura por puntos portátiles), los electrodos excesivamente pesados aumentan la carga de trabajo del operador. En este caso, la ventaja de la ligereza

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de los electrodos de baja densidad es más evidente. Su diseño debe equilibrar el peso y el rendimiento, generalmente optimizando la relación tungsteno-cobre para reducir la densidad y preservar al máximo la conductividad eléctrica y térmica del núcleo.

Además, los ciclos térmicos durante la soldadura imponen exigencias especiales a la densidad del electrodo. Los electrodos de alta densidad, gracias a su estructura densa y a una expansión térmica más uniforme, son menos susceptibles al agrietamiento por la concentración de tensiones internas durante el calentamiento y enfriamiento repetidos, lo que los hace adecuados para soldaduras de alta frecuencia (como la soldadura por lotes en líneas de producción de electrodomésticos). Sin embargo, los electrodos de baja densidad pueden presentar desprendimiento superficial tras ciclos térmicos prolongados debido a la concentración de tensiones alrededor de los poros, lo que acorta su vida útil.

4. La relación entre la densidad y la fiabilidad en el encapsulado microelectrónico

El empaquetado microelectrónico impone exigencias aún más estrictas a la densidad de los electrodos de tungsteno-cobre. El requisito principal es lograr la correspondencia de la expansión térmica y la estabilidad mecánica entre el electrodo y el sustrato. En el empaquetado de chips, los electrodos deben estar firmemente unidos a materiales como obleas de silicio y sustratos cerámicos. Sin embargo, los diferentes materiales tienen diferentes coeficientes de expansión térmica. Si la densidad del electrodo es demasiado alta, su coeficiente de expansión térmica total puede desviarse significativamente del sustrato. Durante el ciclo de temperatura, se generará una tensión significativa en la interfaz entre el electrodo y el sustrato. La acumulación a largo plazo puede provocar grietas en la soldadura, rotura del circuito e incluso fallos del empaquetado. Por lo tanto, los electrodos de tungsteno-cobre para el empaquetado microelectrónico deben controlar con precisión la densidad para ajustar el coeficiente de expansión térmica a un rango cercano al del sustrato. Se suelen utilizar diseños de densidad media a alta, lo que garantiza tanto la densidad estructural para soportar la transmisión de corriente como la mitigación de la tensión térmica mediante una distribución optimizada de los poros (como un pequeño número de microporos distribuidos uniformemente) para garantizar la fiabilidad a largo plazo. Al mismo tiempo, la estabilidad mecánica de los electrodos de alta densidad es esencial en el encapsulado microelectrónico. Durante el encapsulado de chips, los electrodos deben soportar las tensiones mecánicas de la unión, el encapsulado y otros procesos. La alta resistencia a la compresión de los electrodos de alta densidad evita la deformación o rotura por fuerzas externas, garantizando una alineación precisa entre los electrodos y los pines del chip. Sin embargo, los electrodos de baja densidad con una distribución de poros irregular pueden experimentar colapso localizado bajo la presión de encapsulado, lo que afecta la estabilidad de la conexión eléctrica. Por ejemplo, en el encapsulado de alta frecuencia de los chips 5G, incluso una ligera deformación de los electrodos puede provocar una mayor pérdida de transmisión de señal.

5. Impacto de la densidad en el coste de fabricación y adaptación de escenarios

La densidad también está directamente relacionada con el coste de fabricación y la dificultad de procesamiento de los electrodos de cobre-tungsteno. La producción de electrodos de alta densidad requiere mayores presiones de sinterización, tiempos de mantenimiento más largos e incluso procesos de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

presurización secundaria para reducir la porosidad interna, lo que sin duda aumenta el consumo energético del equipo y los ciclos de producción. Al mismo tiempo, el procesamiento de materiales de alta densidad (como el rectificado de precisión y el corte por hilo) es más difícil y el desgaste de las herramientas es más rápido, lo que incrementa aún más los costes de fabricación. Sin embargo, en aplicaciones de alta gama (como el procesamiento de componentes de precisión para motores aeroespaciales), sus ventajas de rendimiento son suficientes para compensar el aumento de coste. Las pérdidas causadas por fallos del equipo o el desguace del producto son mucho mayores que el coste del electrodo, y la durabilidad de los electrodos de alta densidad se convierte en la opción preferida. El proceso de producción de electrodos de baja densidad es relativamente sencillo. Unas presiones de sinterización más bajas y unos tiempos de procesamiento más cortos pueden reducir los costes, pero sus limitaciones de rendimiento los hacen más adecuados para aplicaciones donde el coste es fundamental y no se requieren prestaciones extremas (como la soldadura de componentes de gama baja para electrónica de consumo). Además, las industrias específicas tienen requisitos personalizados de densidad: para reducir el peso general, los equipos aeroespaciales tienden a elegir electrodos de tungsteno y cobre de baja densidad en componentes no centrales y conservar la resistencia necesaria mientras reducen el peso a través del diseño estructural; mientras que los electrodos de los equipos de energía nuclear requieren un diseño de alta densidad para resistir el envejecimiento y la corrosión del material en entornos de radiación y garantizar un funcionamiento estable a largo plazo.

3.1.2 Propiedades térmicas de los electrodos de cobre y tungsteno

Las propiedades térmicas de los electrodos de tungsteno-cobre son un componente importante de sus propiedades físicas, que abarcan la conductividad térmica, el coeficiente de expansión térmica y la resistencia a altas temperaturas, que afectan directamente el rendimiento del electrodo en entornos de alta temperatura y ciclos térmicos. La conductividad térmica es proporcionada principalmente por la fase de cobre. La alta conductividad térmica del cobre garantiza que el calor se transfiera rápidamente desde el área de procesamiento u operación al exterior, reduciendo las temperaturas locales y evitando el sobrecalentamiento, la deformación o el daño a la pieza de trabajo. La conductividad térmica moderada del tungsteno y el efecto sinérgico de la fase de cobre forman las capacidades generales de gestión térmica del material compuesto, que es adecuado para escenarios de alta carga térmica en EDM y soldadura. Las propiedades térmicas también incluyen el coeficiente de expansión térmica. Las características de baja expansión térmica del tungsteno y las características de alta expansión térmica del cobre se equilibran mediante un ajuste proporcional. El coeficiente de expansión térmica del compuesto coincide con el de una variedad de sustratos para reducir la tensión térmica.

La resistencia a altas temperaturas es fundamental para el rendimiento térmico. El alto punto de fusión del tungsteno confiere estabilidad al electrodo a temperaturas extremadamente altas. La fase de cobre llena los poros en forma líquida a altas temperaturas, lo que mejora la estabilidad térmica y lo hace adecuado para entornos de arco eléctrico. La baja porosidad y la distribución uniforme de la fase en la microestructura optimizan aún más la vía de conducción térmica, y el proceso de prensado isostático en caliente mejora la eficiencia de la conductividad térmica de la interfaz. Las pruebas de fatiga térmica demuestran que los electrodos de tungsteno-cobre mantienen la integridad estructural en un amplio rango

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de temperaturas, lo que los hace adecuados para aplicaciones de encapsulado microelectrónico y sensores. En el futuro, el diseño de gradientes funcionales o la modificación de la superficie pueden mejorar aún más el rendimiento térmico para adaptarse a diferencias de temperatura aún mayores o a requisitos complejos de gestión térmica.

3.1.2.1 Conductividad térmica

La conductividad térmica es el indicador principal del rendimiento térmico de los electrodos de tungsteno-cobre. Refleja la capacidad del material para transferir calor y afecta directamente su rendimiento en aplicaciones de alta carga térmica. La conductividad térmica es proporcionada principalmente por la fase de cobre. La alta conductividad térmica del cobre asegura que el calor se transfiera rápidamente desde el área de procesamiento o área de operación al exterior, evitando la deformación o el daño de la pieza de trabajo causado por el sobrecalentamiento local. La conductividad térmica moderada del tungsteno y el efecto sinérgico de la fase de cobre forman la capacidad general de gestión térmica del material compuesto, que es adecuado para las necesidades de disipación de calor de la descarga de alta energía en el mecanizado por electrochispa. Durante el proceso de preparación, la metalurgia de polvos o la tecnología de infiltración al vacío optimizan la ruta de conducción de calor controlando la proporción de tungsteno y cobre y las condiciones de sinterización. La baja porosidad y la distribución uniforme de la fase en la microestructura reducen la resistencia térmica y mejoran la conductividad térmica.

La conductividad térmica también está estrechamente relacionada con la microestructura y la proporción de composición del electrodo. Un alto contenido de cobre (p. ej., WCu 70/30) generalmente corresponde a una mayor conductividad térmica. La red continua de fases de cobre proporciona un canal de conducción de calor eficiente, mientras que el esqueleto de tungsteno mantiene la estabilidad estructural a altas temperaturas. En aplicaciones de soldadura, una mayor conductividad térmica asegura una distribución uniforme del calor, reduce la zona afectada por el calor y mejora la calidad de la unión. En el encapsulado microelectrónico, la conductividad térmica favorece la disipación del calor del chip, reduce las temperaturas de funcionamiento y prolonga la vida útil.

El proceso de prensado isostático en caliente (HIP) optimiza la unión interfacial mediante presión omnidireccional, lo que mejora aún más la eficiencia de la conductividad térmica. El rendimiento de la conductividad térmica también se ve afectado por factores ambientales. Por ejemplo, el ablandamiento de la fase de cobre a altas temperaturas puede reducir ligeramente la capacidad de transferencia de calor, pero el papel de soporte del tungsteno mantiene la estabilidad general. En aplicaciones prácticas, la optimización de la conductividad térmica depende de escenarios específicos. Por ejemplo, el procesamiento de alta potencia requiere electrodos con mayor conductividad térmica, mientras que los diseños ligeros pueden sacrificar parte de la conductividad térmica para reducir la densidad. Las pruebas de conductividad térmica se realizan típicamente mediante flash láser o métodos de flujo de calor en estado estacionario. Se podrían lograr futuras mejoras en la conductividad térmica mediante la introducción de nanotecnología o diseño de gradientes funcionales (p. ej., aumentando el contenido de cobre de adentro hacia afuera) para soportar cargas térmicas más altas, como en dispositivos 5G o

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sensores de alta temperatura.

3.1.2.2 Coeficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica (CTE) es un componente crucial del rendimiento térmico de los electrodos de tungsteno-cobre. Refleja la capacidad del material para cambiar de volumen bajo fluctuaciones de temperatura e influye directamente en su compatibilidad con el sustrato y la estabilidad del ciclado térmico. El CTE está determinado principalmente por las propiedades del tungsteno y el cobre. El bajo CTE del tungsteno (aproximadamente 4,5 ppm/°C) y el alto CTE del cobre (aproximadamente 17 ppm/°C) se equilibran ajustando la relación compuesta. El CTE de los electrodos de tungsteno-cobre se controla típicamente entre 6-8 ppm/°C. Este valor es cercano al de los sustratos de silicio (aproximadamente 2,6 ppm/°C) o cerámica de alúmina (aproximadamente 7 ppm/°C). Esto reduce la concentración de tensión durante el ciclado térmico, evitando la deformación o fractura del paquete, lo que lo hace particularmente adecuado para aplicaciones de sensores y empaquetado microelectrónico. El ajuste del CTE depende de la relación W/Cu y del proceso de fabricación. Por ejemplo, una relación 85/15 WCu presenta un excelente rendimiento a altas temperaturas. Las simulaciones térmicas han verificado sus características de baja tensión, y la compatibilidad de la expansión térmica con el sustrato de silicio se encuentra dentro del 10%. La distribución uniforme de la fase y la baja porosidad en la microestructura minimizan aún más la expansión térmica diferencial. El proceso de prensado isostático en caliente mejora la estabilidad térmica de la interfaz, reduciendo el riesgo de microfisuras durante el ciclo térmico. En la electroerosión, un coeficiente de expansión térmica moderado garantiza la capacidad del electrodo para recuperarse después de una descarga de alta energía. En la soldadura, la adaptación de la expansión térmica reduce la tensión de la unión y mejora la durabilidad. El coeficiente de expansión térmica también se ve afectado por la temperatura ambiente y el uso a largo plazo. El ablandamiento de la fase de cobre a altas temperaturas puede aumentar ligeramente la expansión, pero el soporte del esqueleto de tungsteno mantiene la estabilidad general.

3.1.2.3 Resistencia a altas temperaturas

La resistencia a altas temperaturas es una característica destacada de las propiedades térmicas de los electrodos de tungsteno-cobre. Refleja la estabilidad estructural del material y su capacidad para mantener el rendimiento en entornos de temperatura extremadamente alta, y determina directamente su idoneidad para aplicaciones de alta carga térmica. Esta resistencia a altas temperaturas es proporcionada principalmente por el tungsteno, que tiene un punto de fusión de 3422 °C, el más alto de todos los metales. Esta propiedad permite que los electrodos de tungsteno-cobre mantengan la integridad estructural durante la descarga de arco o la soldadura a alta temperatura, resistiendo la fusión o la deformación. En la estructura compuesta, el tungsteno actúa como un material de esqueleto, formando una red de alta resistencia y térmicamente estable. La fase de cobre llena los poros en forma líquida a altas temperaturas, mejorando la estabilidad térmica general del material, haciéndolo adecuado para la electroerosión de materiales de alta dureza o las operaciones de desconexión en interruptores de alta tensión. La resistencia a altas temperaturas también depende de la microestructura y el proceso de preparación. La baja porosidad y la distribución uniforme de las fases se consiguen mediante pulvimetalurgia o procesos de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

infiltración al vacío, lo que reduce la concentración de tensiones térmicas a altas temperaturas. El prensado isostático en caliente (HIP) optimiza aún más la unión interfacial y mejora la resistencia a la fatiga térmica. En la electroerosión, la resistencia a altas temperaturas reduce la ablación en la superficie del electrodo bajo descargas de alta energía, lo que prolonga la vida útil. La resistencia a altas temperaturas también se ve afectada por la fase de cobre. El cobre tiene un punto de fusión bajo (1083 °C) y puede ablandarse a temperaturas extremadamente altas, pero el soporte del esqueleto de tungsteno mantiene la integridad estructural. Los tratamientos superficiales (como el niquelado) mejoran aún más la resistencia a la oxidación y prolongan la vida útil en entornos húmedos o industriales.

3.2 Rendimiento funcional del electrodo de cobre y tungsteno

Los electrodos de tungsteno-cobre son su valor fundamental en aplicaciones prácticas, abarcando conductividad eléctrica, resistencia a la erosión por arco, durabilidad mecánica y capacidades de gestión térmica. Estas propiedades se derivan de las propiedades compuestas del tungsteno y el cobre. Al optimizar el proceso de preparación y la microestructura, los electrodos de tungsteno-cobre demuestran multifuncionalidad en electroerosión, soldadura y encapsulado microelectrónico. La conductividad eléctrica es proporcionada por la fase de cobre, asegurando una transferencia de corriente eficiente; la resistencia a la erosión por arco se apoya en el alto punto de fusión y dureza del tungsteno, reduciendo las pérdidas superficiales; la durabilidad mecánica se logra mediante una distribución uniforme de la fase y baja porosidad, lo que permite el funcionamiento con cargas elevadas; y la gestión térmica combina la conductividad térmica del cobre con la estabilidad del tungsteno para optimizar el rendimiento en entornos de alta temperatura.

3.2.1 Propiedades conductoras de los electrodos de tungsteno-cobre

Los electrodos de tungsteno-cobre son la base fundamental de su valor funcional, determinando directamente su eficiencia eléctrica y fiabilidad a largo plazo en campos como la electroerosión, la soldadura y el empaquetado microelectrónico. Este rendimiento único se debe al efecto sinérgico del tungsteno y el cobre: el cobre, un metal naturalmente conductor, forma una red de transmisión de corriente continua dentro del electrodo, proporcionando una ruta de baja resistencia para el flujo de carga; mientras que el alto punto de fusión y la alta resistencia del tungsteno forman una estructura robusta que mantiene la estabilidad estructural del electrodo en condiciones de funcionamiento adversas, como altas temperaturas y tensión mecánica, y evita el sobrecalentamiento o la deformación de la fase de cobre, lo que podría provocar una interrupción en la ruta conductora. Esta combinación conserva las ventajas conductoras del cobre, a la vez que soluciona las deficiencias del cobre puro en cuanto a resistencia y resistencia a altas temperaturas, lo que convierte a los electrodos de tungsteno-cobre en la opción ideal para entornos eléctricos complejos.

Base microestructural de la conductividad eléctrica

Los electrodos de tungsteno-cobre están estrechamente relacionados con su microestructura, siendo el enfoque principal la distribución de la fase de cobre y la calidad de la unión de la interfaz tungsteno-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cobre. Mediante procesos como la pulvimetalurgia o la infiltración al vacío, la microestructura se puede controlar con precisión. La pulvimetalurgia consiste en mezclar polvo de tungsteno y polvo de cobre en una proporción determinada, prensarlos y sinterizarlos, de modo que la fase de cobre llene uniformemente los espacios entre las partículas de tungsteno, formando una estructura densa de "esqueleto de tungsteno-relleno de cobre". La infiltración al vacío consiste en infiltrar cobre líquido en un esqueleto de tungsteno presinterizado a altas temperaturas, utilizando la acción capilar para lograr una distribución continua de la fase de cobre. Ambos procesos comparten el objetivo de reducir la porosidad interna y los defectos de la interfaz. La porosidad puede bloquear el paso de la corriente, provocando un aumento repentino de la resistencia local, mientras que una unión deficiente de la interfaz puede generar "resistencia de contacto", aumentando la resistencia a la transferencia de carga. Por lo tanto, una baja porosidad y una distribución uniforme de la fase son requisitos previos para una alta conductividad. Garantizan una conducción uniforme de la corriente dentro del electrodo, evitando la concentración de calor o fluctuaciones de corriente causadas por diferencias de resistencia local.

La relación tungsteno-cobre es un parámetro clave para regular la conductividad eléctrica. En teoría, cuanto mayor sea el contenido de cobre, mejor será la conductividad eléctrica, ya que un mayor número de fases de cobre puede formar una red conductora más densa. Sin embargo, un contenido de cobre demasiado alto debilitará la función de soporte del esqueleto de tungsteno, provocando que el electrodo se ablande y se deforme fácilmente a altas temperaturas. En la práctica, es necesario equilibrar la proporción de ambos según las necesidades del caso: por ejemplo, se seleccionará un mayor contenido de cobre para escenarios que prioricen la eficiencia conductiva, mientras que la proporción de tungsteno se incrementará adecuadamente para escenarios que requieran estabilidad a altas temperaturas. Esta regulación de la proporción busca, esencialmente, encontrar un equilibrio entre la conductividad y la estabilidad estructural para adaptarse a las necesidades básicas de las diferentes condiciones de trabajo.

Impacto de las propiedades conductoras en los escenarios de aplicación

En la electroerosión, la conductividad eléctrica afecta directamente la precisión del mecanizado y la vida útil del electrodo. Durante el mecanizado, se generan descargas de alta frecuencia entre el electrodo y la pieza de trabajo para generar material fundido a alta temperatura, y una transmisión de corriente estable es fundamental para garantizar una energía de descarga uniforme. Los electrodos de tungsteno-cobre con alta conductividad distribuyen uniformemente la densidad de corriente, evitando la sobredescarga causada por una resistencia local excesiva; es decir, temperaturas anormalmente altas causadas por la concentración local de corriente, que pueden causar la ablación de la superficie del electrodo o defectos como picaduras y grietas en la superficie de la pieza. Al mismo tiempo, una excelente conductividad reduce la pérdida de energía, convierte más energía eléctrica en la energía térmica necesaria para el mecanizado y mejora la eficiencia del mismo. Además, una transmisión de corriente estable reduce la corrosión electroquímica del electrodo, disminuye la tasa de pérdidas y prolonga el ciclo de vida útil.

En el campo de la soldadura, la calidad de la conductividad eléctrica determina directamente la consistencia de la misma. Ya sea soldadura por puntos o por costura, el electrodo debe transmitir la corriente eficientemente al área de soldadura y fundir la superficie de contacto de la pieza mediante calor

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistivo para formar un núcleo fundido. Los electrodos de cobre-tungsteno con alta conductividad garantizan una salida de corriente estable en el punto de contacto entre el electrodo y la pieza, evitando así el calentamiento desigual causado por fluctuaciones de la resistencia. Un calor insuficiente provocará soldadura en frío, mientras que un calor excesivo puede penetrar en la pieza o hacer que el electrodo se adhiera. Además, durante el proceso de soldadura, el propio electrodo se calienta debido al calor resistivo. Si la conductividad es baja, la alta temperatura del electrodo puede causar oxidación o deformación de la superficie, lo que deteriora aún más la conductividad y crea un círculo vicioso de "degradación del rendimiento y sobrecalentamiento agravado". Las características de baja resistencia de los electrodos de alta conductividad reducen el autocalentamiento y mantienen una soldadura estable a largo plazo.

El encapsulado microelectrónico presenta requisitos más sofisticados de conductividad eléctrica. En la conexión entre el chip y el sustrato, el electrodo de cobre-tungsteno, como interconexión conductora, debe lograr una conducción de circuito estable y de baja resistencia para garantizar la integridad de la transmisión de la señal. Las señales electrónicas de alta frecuencia y alta velocidad son extremadamente sensibles a los cambios de resistencia. Incluso pequeñas fluctuaciones de resistencia pueden causar retrasos o atenuación de la señal. Por lo tanto, los electrodos de cobre-tungsteno utilizados en el encapsulado microelectrónico deben tener una conductividad extremadamente alta y no deben presentar áreas locales de alta resistencia en su interior, ya que de lo contrario podrían convertirse en un cuello de botella para la transmisión de la señal. Al mismo tiempo, los ciclos de temperatura en el entorno del encapsulado provocarán la expansión y contracción del material. Si la conductividad se ve afectada debido a cambios estructurales, puede causar un contacto deficiente en el circuito e incluso fallos en el equipo. Esto requiere que la conductividad del electrodo se mantenga estable durante un uso prolongado y no se vea afectada significativamente por las condiciones ambientales.

Correlación y significancia de los parámetros conductores básicos

La conductividad, la resistividad y la capacidad de conducción de corriente son los parámetros fundamentales para medir la conductividad de los electrodos de cobre-tungsteno. Estos tres parámetros están interrelacionados y tienen enfoques diferentes. La conductividad refleja la capacidad de un material para conducir corriente. Cuanto mayor sea el valor, mejor será la conductividad; la resistividad es el inverso de la conductividad, que refleja directamente la resistencia a la transmisión de corriente. En la práctica, estos dos parámetros determinan conjuntamente la intensidad de corriente del electrodo a un voltaje específico, lo que a su vez afecta la eficiencia energética. La capacidad de conducción de corriente describe la corriente máxima que puede pasar continuamente a través del electrodo sin sobrecalentarse ni sufrir daños estructurales. No solo está relacionada con la conductividad, sino también con la capacidad de disipación de calor y la resistencia a altas temperaturas del material: una alta conductividad puede reducir el efecto Joule cuando pasa la corriente, y la resistencia a altas temperaturas del esqueleto de tungsteno proporciona soporte estructural para conducir grandes corrientes.

Equilibrar estos tres parámetros es crucial en el diseño de electrodos de tungsteno-cobre. Por ejemplo, en aplicaciones de alta corriente, es fundamental mantener una alta conductividad (para minimizar la generación de calor) y una alta capacidad de conducción de corriente (para evitar fallos estructurales).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sin embargo, en la microelectrónica de precisión, se prioriza la estabilidad y uniformidad de la conductividad para garantizar una transmisión precisa de la señal. La investigación y el control exhaustivos de estos parámetros son fundamentales para optimizar el rendimiento de los electrodos de tungsteno-cobre y la garantía técnica de su adaptabilidad a diversas aplicaciones de alta gama.

3.2.1.1 Conductividad

La conductividad es un indicador fundamental de las propiedades conductoras de los electrodos de tungsteno-cobre, que refleja la capacidad del material para transferir carga e impacta directamente su eficiencia en aplicaciones eléctricas. La conductividad es principalmente aportada por la fase de cobre, cuya alta conductividad asegura la transmisión eficiente de corriente dentro del electrodo, formando una red conductora continua. La conductividad del tungsteno es menor que la del cobre, pero a través de procesos compuestos optimizados (como una relación 70/30 WCu), su conductividad puede aproximarse a la del cobre puro, satisfaciendo las altas demandas de corriente de la electroerosión y los requisitos de baja resistencia de la soldadura. La distribución uniforme de la fase de cobre dentro de la microestructura reduce las variaciones de resistencia y mejora la estabilidad de la descarga. Esto es particularmente cierto en aplicaciones de mecanizado de precisión (como micromoldes), donde la conductividad determina directamente la precisión del mecanizado y la calidad de la superficie.

Lograr una alta conductividad eléctrica depende del proceso de fabricación. La pulvimetalurgia controla la humectación y el relleno del cobre mediante la temperatura y la presión de sinterización. La infiltración al vacío optimiza la interfaz de fases mediante la penetración del cobre líquido, reduciendo la porosidad y minimizando los efectos de dispersión. El prensado isostático en caliente (HIP) mejora aún más la unión interfacial y la consistencia de la conductividad. La conductividad también se ve afectada por la proporción de la composición. Un alto contenido de cobre (como WCu 60/40) generalmente resulta en una mayor conductividad y es adecuado para un procesamiento de alta eficiencia, mientras que un alto contenido de tungsteno (como WCu 90/10) ofrece un buen rendimiento cuando se prioriza la resistencia al desgaste. En aplicaciones prácticas, una alta conductividad eléctrica favorece una descarga de arco estable, reduce la pérdida de energía y prolonga la vida útil del electrodo. En el futuro, la introducción de nanopulvo de cobre o la modificación de la superficie (como el plateado) puede mejorar aún más la conductividad para adaptarse a aplicaciones de mayor corriente o alta frecuencia, como equipos 5G y transmisión de energía.

3.2.1.2 Resistividad

La resistividad es otro indicador importante de las propiedades conductoras de los electrodos de tungsteno-cobre. Refleja la resistencia del material al flujo de corriente y afecta directamente la eficiencia de la transferencia de energía eléctrica y la generación de calor. La resistividad está determinada principalmente por las propiedades compuestas del tungsteno y el cobre. La baja resistividad del cobre proporciona una trayectoria de corriente eficiente, mientras que la alta resistividad del tungsteno puede aumentar la impedancia general a relaciones altas. Al optimizar la relación, la resistividad de los electrodos de tungsteno-cobre se reduce eficazmente a casi el nivel del cobre puro, lo que los hace

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

adecuados para aplicaciones que requieren baja pérdida de energía. La baja porosidad y la distribución uniforme de la fase en la microestructura reducen la dispersión de electrones y mejoran la consistencia de la resistividad, lo cual es particularmente prominente en la transmisión de corriente a larga distancia. El control de la resistividad depende del proceso de fabricación. La pulvimetalurgia optimiza la continuidad de la fase de cobre mediante la mezcla y sinterización precisas, mientras que la infiltración al vacío reduce aún más la resistividad al rellenar los poros con cobre líquido. El tratamiento térmico y los procesos asistidos por presión (como el HIP) mejoran la densidad del material y reducen el aumento de la resistencia causado por los límites de grano y los defectos. La resistividad también se ve afectada por la temperatura y el entorno. El ablandamiento de la fase de cobre a altas temperaturas puede aumentar ligeramente la resistencia, pero el soporte del esqueleto de tungsteno mantiene la estabilidad general. En el mecanizado por electrochispa, una baja resistividad reduce los efectos térmicos y mejora la calidad superficial. En la soldadura, reduce la resistencia de la unión y mejora la eficiencia.

3.2.1.3 Capacidad de conducción de corriente

La capacidad de conducción de corriente es un indicador clave de las propiedades conductoras de los electrodos de tungsteno-cobre. Refleja la estabilidad y durabilidad del electrodo bajo condiciones de alta corriente y determina directamente su idoneidad para aplicaciones de alta carga. La capacidad de conducción de corriente se sustenta principalmente en la alta conductividad de la fase de cobre y el alto punto de fusión del tungsteno. El cobre proporciona una ruta de transmisión de corriente eficiente, mientras que la estructura esquelética del tungsteno mantiene la estabilidad bajo arcos de alta temperatura, previniendo la fusión o la deformación. Los electrodos de tungsteno-cobre, mediante relaciones optimizadas (como WCu 80/20), tienen un rendimiento excepcional bajo altas corrientes. La baja porosidad y la distribución uniforme de la fase en la microestructura reducen el riesgo de sobrecalentamiento localizado y mejoran la capacidad de conducción de corriente.

La obtención de la capacidad de conducción de corriente depende del proceso de fabricación. La pulvimetalurgia optimiza la interfaz de fases controlando la temperatura y la presión de sinterización. La infiltración al vacío mejora la densidad mediante la infiltración de cobre líquido. El prensado isostático en caliente mejora aún más la resistencia mecánica y la estabilidad conductiva del material. Un alto contenido de tungsteno (como WCu 90/10) mejora la resistencia a la erosión por arco, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de descarga de alta energía, mientras que un alto contenido de cobre (como WCu 60/40) optimiza la transmisión de baja resistencia.

En la electroerosión, una alta capacidad de conducción de corriente facilita la eliminación de grandes volúmenes de material; en la soldadura, garantiza la calidad y la durabilidad de la unión bajo altas corrientes. En aplicaciones prácticas, la capacidad de conducción de corriente también se ve afectada por la temperatura ambiente y las condiciones de disipación de calor. Una buena gestión térmica (como la refrigeración por aire o líquido) puede mejorar el límite de conducción de corriente. La mejora de la capacidad de conducción de corriente también depende del diseño del electrodo. Las geometrías complejas requieren una distribución de corriente uniforme, y el tratamiento de la superficie (como el enchapado) puede mejorar la resistencia a la corrosión y extender la vida útil.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2.2 Resistencia a la erosión por arco de electrodos de cobre y tungsteno

El rendimiento de un electrodo de tungsteno-cobre refleja su durabilidad y estabilidad en entornos de descarga de arco de alta energía. Esta característica le confiere ventajas significativas en campos como el mecanizado por electroerosión (EDM), la soldadura por resistencia y la conmutación de alta tensión. La resistencia a la erosión por arco se debe principalmente al alto punto de fusión y dureza del tungsteno, junto con la conductividad y las propiedades de relleno del cobre. La optimización de la microestructura mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío, junto con la baja porosidad y la distribución uniforme de las fases, mejora aún más la resistencia a la erosión. Bajo la acción de un arco, puede producirse evaporación o fusión del material en la superficie del electrodo. La resistencia a la erosión por arco influye directamente en la precisión del mecanizado, la vida útil y la rentabilidad.

3.2.2.1 Mecanismo de erosión por arco

El mecanismo de erosión del arco es fundamental para comprender la resistencia a la erosión del arco de los electrodos de tungsteno-cobre. Implica los efectos térmicos y la pérdida de material causados por la descarga del arco en la superficie del material. La erosión del arco comienza con una descarga en condiciones de alto voltaje o alta corriente, generando un plasma de alta temperatura (que alcanza miles de °C). Este calentamiento instantáneo de la superficie del electrodo provoca la fusión o vaporización localizada del material. En los electrodos de tungsteno-cobre, la acción del arco afecta primero a la fase de cobre. Debido a su bajo punto de fusión (1083 °C), el cobre líquido puede evaporarse o chisporrotear a altas temperaturas, exponiendo el esqueleto de tungsteno. El alto punto de fusión del tungsteno (3422 °C) garantiza la estabilidad estructural bajo el arco, pero puede ocurrir oxidación o microablación de la superficie, formando picaduras o grietas. El proceso de erosión también implica estrés térmico. El calentamiento y enfriamiento rápidos conducen a concentraciones de estrés dentro del material, lo que puede desencadenar la propagación de microgrietas.

El mecanismo de ablación por arco también se ve afectado por la microestructura. Una baja porosidad reduce los puntos de concentración de calor, y una distribución uniforme de fases (como WCu 70/30) optimiza la conducción térmica y reduce el riesgo de sobrecalentamiento local. La energía del arco y la frecuencia de descarga también afectan el grado de ablación. Las descargas de alta energía agravan la pérdida de material, mientras que las de baja frecuencia solo pueden causar daños superficiales menores. Los productos de ablación, como vapores metálicos u óxidos, pueden depositarse en la superficie de la pieza, lo que afecta la calidad del procesamiento. Los procesos de preparación, como el prensado isostático en caliente (HIP), mejoran la resistencia a la ablación al aumentar la densidad y reducir los puntos de vaporización en los poros. En el futuro, mediante el estudio de la distribución de la energía del arco y las transformaciones de fase del material, se podrá comprender mejor el mecanismo de ablación y optimizar el diseño de los electrodos.

3.2.2.2 Evaluación de la resistencia a la ablación

La evaluación de la resistencia a la erosión es un método científico para evaluar la resistencia a la erosión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

por arco de los electrodos de tungsteno-cobre. Implica pruebas experimentales y análisis de rendimiento para garantizar la fiabilidad de los electrodos en aplicaciones prácticas. Esta evaluación se realiza típicamente mediante pruebas de erosión por arco, simulando condiciones de descarga de alta energía y registrando la pérdida de masa superficial, el cambio dimensional y la morfología de la superficie del electrodo. La tasa de pérdida de masa es un indicador clave. Los electrodos con alta resistencia a la erosión exhiben una pérdida de masa significativamente menor que los electrodos de cobre puro o grafito después de descargas prolongadas. Una relación 80/20 WCu funciona excepcionalmente bien a 200 A. El cambio dimensional se mide mediante escaneo 3D para evaluar el grado de desgaste a lo largo del perfil del electrodo. Una baja tasa de desgaste indica alta resistencia a la erosión. El análisis de la morfología de la superficie utiliza un microscopio electrónico de barrido (MEB) para observar la microestructura después de la erosión, evaluando la profundidad de las picaduras, la densidad de grietas y el espesor de la capa de óxido. Las marcas de erosión uniformes reflejan la estabilidad microestructural. La resistencia a la erosión también se evalúa mediante pruebas de vida útil, que registran la degradación del rendimiento del electrodo después de un número específico de descargas. Los electrodos de alta durabilidad mantienen tanto la conductividad como la resistencia mecánica. Normas internacionales como ISO 14132 e IEC 62271-102 proporcionan directrices de prueba, que incluyen pruebas de resistencia al arco eléctrico y evaluaciones de estabilidad térmica. Los resultados experimentales demuestran que los electrodos con procesos de fabricación optimizados (como la infiltración al vacío) pueden reducir la tasa de ablación en aproximadamente un 30 %.

La evaluación de la resistencia a la ablación también considera el escenario de aplicación. En el mecanizado por electrochispa, la resistencia a la ablación afecta directamente la precisión del mecanizado y la calidad superficial de la pieza; en la soldadura, reduce la frecuencia de reemplazo de electrodos.

3.2.2.3 Factores que afectan la resistencia a la ablación

Los factores que influyen en la resistencia a la ablación son clave para optimizar el rendimiento de los electrodos de tungsteno-cobre, abarcando aspectos como la composición del material, la microestructura y las condiciones de operación. La relación de la composición es el factor principal. Un mayor contenido de tungsteno (p. ej., WCu 90/10) aumenta la resistencia a la ablación. El alto punto de fusión y dureza del tungsteno protegen contra el choque de arco. Si bien un alto contenido de cobre (p. ej., WCu 60/40) mejora la conductividad, también reduce la resistencia a la ablación. Se debe lograr un equilibrio entre durabilidad y eficiencia. La microestructura tiene un impacto significativo. La baja porosidad reduce los puntos de concentración de calor, mientras que una distribución de fase uniforme optimiza la transferencia de calor. El proceso de prensado isostático en caliente (HIP) mejora la densidad y reduce las tasas de ablación en aproximadamente un 15%.

El proceso de fabricación es crucial para la resistencia a la ablación. En la pulvimetalurgia, la temperatura y la presión de sinterización controlan el efecto humectante del cobre. En la infiltración al vacío, la profundidad de penetración afecta la estabilidad de la interfaz. El tratamiento a alta temperatura reduce los defectos. Los tratamientos superficiales, como el niquelado o los recubrimientos, mejoran la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistencia a la oxidación y reducen el daño superficial inducido por el arco. Las condiciones de operación incluyen la energía del arco y la frecuencia de descarga. Una descarga de alta energía (p. ej., 500 A) agrava la ablación, mientras que una descarga de baja frecuencia reduce las pérdidas. Factores ambientales como la humedad o las atmósferas oxidantes pueden acelerar la degradación de la superficie, lo que requiere condiciones de trabajo optimizadas. El diseño del electrodo también afecta la resistencia a la ablación. Las geometrías complejas requieren una distribución uniforme de la corriente para minimizar el sobrecalentamiento local.

3.3 Otras propiedades del electrodo de cobre y tungsteno

Los electrodos de tungsteno-cobre son factores clave en sus ventajas únicas en diversos escenarios de aplicación, que abarcan dureza, resistencia, tenacidad, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, así como resistencia a la soldadura y adhesión. Estas propiedades se derivan de las características compuestas del tungsteno y el cobre. La microestructura se optimiza mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío para formar un material con baja porosidad y alta uniformidad. El alto punto de fusión, dureza y estabilidad química del tungsteno proporcionan una base para la resistencia a altas temperaturas y la resistencia al desgaste, mientras que la alta conductividad eléctrica, ductilidad y conductividad térmica del cobre mejoran las propiedades eléctricas y la tenacidad. El rendimiento combinado de otras propiedades afecta directamente la durabilidad, eficiencia y confiabilidad del electrodo en EDM, soldadura y empaquetado microelectrónico.

3.3.1 Dureza del electrodo de cobre y tungsteno

Un electrodo de tungsteno-cobre es un indicador clave de sus propiedades mecánicas, reflejando su durabilidad y resistencia a la deformación bajo cargas elevadas y condiciones abrasivas. Esta propiedad se debe principalmente al tungsteno, cuya alta dureza predomina en el material compuesto. En combinación con el efecto de relleno del cobre, la pulvimetalurgia o los procesos de infiltración al vacío optimizan la microestructura, dando como resultado una distribución uniforme de las fases y una baja porosidad. La dureza influye directamente en la resistencia a la erosión del electrodo durante la electroerosión, su resistencia a la compresión durante la soldadura y su estabilidad superficial en el encapsulado microelectrónico. Los electrodos de alta dureza pueden soportar tensiones mecánicas frecuentes o choques de arco, lo que prolonga su vida útil y mantiene la precisión del mecanizado. Alcanzar esta dureza depende de la relación tungsteno-cobre y del proceso de preparación. Un mayor contenido de tungsteno resulta en una mayor dureza. La dureza natural del tungsteno proporciona la base para la resistencia al desgaste, mientras que la ductilidad del cobre rellena los poros durante la sinterización, mejorando la densidad general del material. Los granos finos de la microestructura, optimizados mediante prensado isostático en caliente (HIP), aumentan aún más la dureza y reducen el desgaste superficial. Las pruebas de dureza suelen utilizar los métodos de dureza Vickers o Rockwell. Los resultados reflejan la resistencia superficial del material a la indentación. Los procesos de preparación, como la sinterización a alta temperatura y el control de presión, influyen directamente en la uniformidad de la distribución de la dureza. En la práctica, los electrodos de mayor dureza ofrecen un mejor rendimiento al mecanizar materiales de alta dureza, minimizando así su deformación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La dureza también se ve afectada por las condiciones ambientales y de uso. Si bien el ablandamiento de la fase de cobre a altas temperaturas puede reducir ligeramente la dureza, el soporte que proporciona el esqueleto de tungsteno mantiene la estabilidad general. Los tratamientos superficiales, como el pulido o los recubrimientos, pueden mejorar aún más la dureza superficial y la resistencia a la corrosión. En el encapsulado microelectrónico, la dureza garantiza un contacto estrecho entre los electrodos y los sustratos, lo que previene daños mecánicos.

3.3.2 Resistencia del electrodo de cobre y tungsteno

Un electrodo de tungsteno-cobre es un indicador clave de sus propiedades mecánicas, reflejando su resistencia a la fractura y la deformación bajo alta presión y tensión mecánica. Esta característica se sustenta en la alta resistencia a la compresión del tungsteno y la tenacidad del cobre. La optimización microestructural mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío da como resultado un material compuesto con baja porosidad y alta densidad. La resistencia influye directamente en la resistencia al impacto del electrodo en la electroerosión, su resistencia a la compresión en la soldadura y su estabilidad estructural en el encapsulado microelectrónico. Los electrodos de alta resistencia pueden soportar las tensiones de descargas de alta energía o sujeción mecánica, lo que prolonga su vida útil y mejora la eficiencia del procesamiento.

La obtención de resistencia depende de la proporción de tungsteno y cobre, así como del proceso de preparación. Un alto contenido de tungsteno (p. ej., WCu 85/15) mejora significativamente la resistencia a la compresión. El esqueleto de tungsteno proporciona un soporte estructural de alta resistencia, mientras que el relleno de cobre optimiza la uniformidad microestructural y reduce la concentración de tensiones. La baja porosidad y la distribución uniforme de fases en la microestructura se mejoran mediante el prensado isostático en caliente (HIP). El tamaño de grano fino mejora la resistencia a la fatiga del material, y las pruebas de resistencia muestran que la resistencia a la compresión puede alcanzar un nivel relativamente alto. Los procesos de preparación, como el control de la temperatura y la presión de sinterización, influyen directamente en la uniformidad de la distribución de la resistencia. La infiltración al vacío mejora la unión interfacial mediante la penetración de cobre líquido.

La resistencia también se ve afectada por las condiciones de operación. El ablandamiento de la fase de cobre a altas temperaturas puede reducir ligeramente la resistencia, pero el soporte del esqueleto de tungsteno mantiene la estabilidad general. En la electroerosión, los electrodos de alta resistencia pueden soportar el impacto de descargas de alta energía y reducir la deformación. En la soldadura, favorecen la formación de uniones a alta presión. En el encapsulado microelectrónico, la resistencia garantiza que los electrodos no se fracturen durante los ciclos térmicos, lo que mejora la fiabilidad. Los tratamientos superficiales, como el chapado, pueden mejorar la resistencia a la corrosión, lo que indirectamente mejora la resistencia.

3.3.3 Tenacidad del electrodo de cobre y tungsteno

Un electrodo de tungsteno-cobre es un aspecto clave de sus propiedades mecánicas, reflejando su

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistencia a la fractura y la absorción de energía bajo impacto o tensión. Esta propiedad es proporcionada principalmente por el cobre, cuya alta ductilidad y tenacidad son clave en los materiales compuestos. En combinación con la dureza del tungsteno, la microestructura se optimiza mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío, dando como resultado un material con baja porosidad y alta uniformidad. La tenacidad afecta directamente la resistencia al agrietamiento del electrodo en la electroerosión, su resistencia al impacto en la soldadura y su flexibilidad estructural en el encapsulado microelectrónico. Los electrodos de alta tenacidad pueden absorber tensiones mecánicas o térmicas, reducir la fractura frágil y prolongar la vida útil. Esta sección explorará en detalle las propiedades de tenacidad de los electrodos de tungsteno-cobre y su papel en aplicaciones prácticas.

La obtención de tenacidad depende de la proporción de tungsteno y cobre y del proceso de preparación. Un mayor contenido de cobre resulta en mayor tenacidad. La elongación a la rotura del cobre proporciona absorción de energía, mientras que el esqueleto de tungsteno mantiene la estabilidad estructural a altas temperaturas. La baja porosidad y la distribución uniforme de fases en la microestructura se optimizan mediante prensado isostático en caliente. El tamaño de grano fino mejora la resistencia del material a la propagación de grietas. Las pruebas de tenacidad muestran que el material presenta cierta deformación plástica bajo impacto. Los procesos de preparación, como el control de la temperatura y la presión de sinterización, influyen directamente en la uniformidad de la distribución de la tenacidad. La infiltración al vacío, mediante la penetración de cobre líquido, mejora la unión interfacial y reduce los puntos de concentración de tensiones. La tenacidad también se ve afectada por las condiciones de operación. El ablandamiento de la fase de cobre a altas temperaturas mejora la tenacidad, pero las temperaturas excesivas pueden provocar una disminución de la resistencia. El soporte que proporciona el esqueleto de tungsteno mantiene el equilibrio general. En el mecanizado por electrochispa, los electrodos con alta tenacidad pueden soportar el impacto de descargas de alta energía y reducir la formación de grietas. En la soldadura, absorben las tensiones térmicas y mejoran la durabilidad de las uniones. En el encapsulado microelectrónico, la tenacidad previene la fractura frágil durante los ciclos térmicos, lo que mejora la fiabilidad. Los tratamientos superficiales, como el pulido, pueden reducir los defectos superficiales y, indirectamente, mejorar la tenacidad.

3.3.4 Resistencia al desgaste del electrodo de cobre y tungsteno

Los electrodos de tungsteno-cobre son un aspecto clave de sus propiedades mecánicas, lo que refleja su resistencia al desgaste y la estabilidad superficial bajo fricción repetida o condiciones de alta carga. Esta característica se debe principalmente al tungsteno, cuya alta dureza y resistencia al desgaste predominan en el material compuesto. En combinación con el efecto de relleno del cobre, la microestructura se optimiza mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío, lo que resulta en un material con baja porosidad y alta uniformidad. La resistencia al desgaste influye directamente en la larga vida útil del electrodo en la electroerosión, su resistencia al desgaste por contacto en la soldadura y su integridad superficial en el encapsulado microelectrónico. Los electrodos altamente resistentes al desgaste pueden soportar la fricción mecánica o el choque de arco, lo que reduce la pérdida de material y mantiene la precisión del mecanizado. La resistencia al desgaste depende de la proporción de tungsteno y cobre y del proceso de preparación. Un mayor contenido de tungsteno (como WCu 80/20 o WCu 90/10) resulta en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

una mayor resistencia al desgaste. La dureza natural del tungsteno proporciona al material una base resistente al desgaste, mientras que la ductilidad del cobre rellena los poros durante la sinterización, mejorando la densidad de la microestructura. Los granos finos de la microestructura se optimizan mediante el proceso de prensado isostático en caliente (HIP), lo que mejora aún más la resistencia al desgaste y reduce el desgaste y la erosión superficial. Las pruebas de resistencia al desgaste suelen utilizar pruebas de fricción y desgaste o pruebas de ablación por arco para medir los cambios en la rugosidad superficial y las tasas de pérdida de masa. Los procesos de preparación, como la sinterización a alta temperatura y el control de presión, afectan directamente la uniformidad de la distribución de la resistencia al desgaste. En aplicaciones prácticas, los electrodos con alta resistencia al desgaste ofrecen un rendimiento excepcional al mecanizar materiales de alta dureza (como el acero al tungsteno), lo que reduce la deformación del electrodo y la frecuencia de reemplazo.

La resistencia al desgaste también se ve afectada por las condiciones de operación. El ablandamiento de la fase de cobre a altas temperaturas puede reducir ligeramente la resistencia al desgaste, pero el soporte de tungsteno mantiene la estabilidad general. Los tratamientos superficiales, como el pulido o los recubrimientos (p. ej., CrN), pueden mejorar aún más la resistencia al desgaste y a la corrosión de la superficie. En el encapsulado microelectrónico, la resistencia al desgaste garantiza que los electrodos mantengan la calidad de la superficie durante el ensamblaje repetido y previene daños mecánicos.

3.3.5 Resistencia a la corrosión de los electrodos de cobre y tungsteno

Una característica clave del rendimiento de los electrodos de tungsteno-cobre es su adaptabilidad ambiental, lo que refleja su resistencia al ataque químico y su estabilidad a largo plazo en entornos húmedos, ácidos, alcalinos o industriales. Esta característica se debe principalmente a la estabilidad química del tungsteno, combinada con la protección superficial del cobre y la optimización de la microestructura mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío, lo que resulta en un material de baja porosidad y alta uniformidad. La resistencia a la corrosión afecta directamente la calidad de la superficie de la pieza de trabajo del electrodo en la electroerosión, su resistencia a la oxidación en la soldadura y su fiabilidad en el encapsulado microelectrónico. Los electrodos con alta resistencia a la corrosión pueden resistir la erosión ambiental, reducir la degradación superficial y prolongar su vida útil. Esta sección analizará en detalle las características de resistencia a la corrosión de los electrodos de tungsteno-cobre y su rendimiento en aplicaciones.

Lograr la resistencia a la corrosión depende de la proporción de tungsteno y cobre y del proceso de preparación. Un mayor contenido de tungsteno (como WCu 85/15) resulta en una mayor resistencia a la corrosión. La estabilidad química natural del tungsteno proporciona al material una base para la resistencia a ácidos y álcalis, mientras que la ductilidad del cobre llena los poros durante la sinterización, reduciendo las vías de corrosión. La baja porosidad en la microestructura, optimizada mediante prensado isostático en caliente (HIP), reduce los canales por los que penetran los medios corrosivos, y el tamaño de grano fino mejora la resistencia al agrietamiento del material. Las pruebas de resistencia a la corrosión generalmente implican pruebas de niebla salina o inmersión en ácido, midiendo la velocidad de corrosión superficial y la pérdida de masa. Los procesos de preparación como la infiltración al vacío mejoran la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

densidad de la interfaz mediante la infiltración de cobre líquido, lo que mejora la resistencia a la corrosión. En aplicaciones prácticas, los electrodos con alta resistencia a la corrosión sobresalen al procesar materiales químicamente activos (como aleaciones que contienen titanio), lo que reduce la contaminación de la pieza de trabajo.

La resistencia a la corrosión también se ve afectada por las condiciones de operación. Las atmósferas húmedas u oxidantes pueden acelerar la corrosión de la fase de cobre, pero el soporte del esqueleto de tungsteno y los tratamientos superficiales (como el niquelado o el dorado) mejoran significativamente la estabilidad general. En el encapsulado microelectrónico, la resistencia a la corrosión garantiza que los electrodos no se oxiden en ambientes húmedos, lo que aumenta la fiabilidad.

3.3.6 Propiedades antisoldadura y antiadherencia de los electrodos de cobre y tungsteno

Los electrodos de tungsteno-cobre tienen propiedades clave en aplicaciones de soldadura. Reflejan su capacidad para resistir la adhesión a los materiales de unión bajo altas temperaturas y presiones, así como la limpieza de la superficie después de la soldadura. Esta característica se sustenta principalmente en la resistencia a altas temperaturas del tungsteno y las propiedades superficiales del cobre. La optimización de la microestructura mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío da como resultado un material de baja porosidad y alta uniformidad. La resistencia a la soldadura y a la adhesión influyen en la eficiencia del electrodo en la soldadura por resistencia, la calidad superficial en la soldadura por puntos y la frecuencia de reemplazo a largo plazo. Los electrodos con alta resistencia a la adhesión pueden reducir la adhesión de escoria, mejorar la calidad de la unión soldada y prolongar su vida útil.

Lograr la resistencia a la soldadura y a la adhesión depende de la proporción de tungsteno y cobre, así como del proceso de preparación. Un mayor contenido de tungsteno (p. ej., WCu 80/20) resulta en una mayor resistencia a la adhesión. El alto punto de fusión y la dureza del tungsteno reducen la adhesión durante la soldadura fundida, mientras que la conductividad térmica del cobre optimiza la gestión térmica durante la sinterización y reduce los residuos superficiales. La baja porosidad de la microestructura, optimizada mediante prensado isostático en caliente (HIP), reduce los canales de penetración de escoria, mientras que el fino tamaño de grano mejora la resistencia del material a la deformación. La resistencia a la adhesión se suele comprobar mediante una prueba de ciclo de soldadura, que mide el área de adhesión de la escoria y la limpieza de la superficie. Los procesos de preparación, como la infiltración al vacío, mejoran la densidad de la interfaz mediante la infiltración de cobre líquido, lo que mejora la resistencia a la adhesión. En la práctica, los electrodos con alta resistencia a la adhesión son excelentes para la soldadura por puntos o costura, lo que reduce la frecuencia de limpieza.

La resistencia a la soldadura y la adhesión también se ven afectadas por las condiciones de operación. El ablandamiento de la fase de cobre a altas temperaturas puede aumentar el riesgo de adhesión, pero el soporte y el tratamiento superficial del esqueleto de tungsteno mejoran significativamente el rendimiento general. En la soldadura por resistencia, la resistencia a la adhesión garantiza una separación uniforme del electrodo de la pieza de trabajo, mejorando así la calidad de la unión. En el encapsulado microelectrónico, la resistencia a la soldadura permite múltiples operaciones de soldadura sin dejar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

residuos.

3.4 CTIA GROUP LTD Electrodo de cobre y tungsteno MSDS

El electrodo de tungsteno-cobre es un material compuesto metálico con tungsteno y cobre como componentes principales. Se fabrica mediante pulvimetalurgia, infiltración al vacío y otros procesos. Posee las excelentes propiedades del tungsteno y el cobre y se utiliza ampliamente en el sector industrial.

Desde el punto de vista del material, el alto punto de fusión del tungsteno (3410 °C) y su alta resistencia proporcionan al electrodo una excelente resistencia a altas temperaturas y estabilidad estructural, lo que le permite mantener su forma y resistir la deformación en entornos hostiles, como altas temperaturas y altas presiones. Por otro lado, la alta conductividad eléctrica y térmica del cobre permite que el electrodo transmita y disipe eficientemente el calor, disipando rápidamente el calor generado durante el funcionamiento y previniendo el sobrecalentamiento localizado y la degradación del rendimiento. Esta combinación de "tungsteno resistente y cobre superior" permite que el electrodo de tungsteno-cobre supere las deficiencias de la baja conductividad eléctrica y térmica del tungsteno puro, a la vez que compensa la falta de resistencia a altas temperaturas del cobre puro, lo que resulta en ventajas de rendimiento únicas.

Los electrodos de tungsteno-cobre se pueden ajustar con flexibilidad según el escenario de aplicación. Las relaciones comunes incluyen WCu70/30 y WCu80/20. Un mayor contenido de cobre mejora la conductividad eléctrica y térmica, lo que los hace adecuados para aplicaciones que requieren un alto rendimiento eléctrico. Un mayor contenido de tungsteno mejora la resistencia térmica y la resistencia mecánica, haciéndolos más adecuados para entornos de trabajo de alta temperatura y alta tensión. El ajuste de la relación permite una adaptación precisa al rendimiento.

Desde la perspectiva de los campos de aplicación, los electrodos de cobre y tungsteno juegan un papel clave en múltiples escenarios industriales de alta gama: en el mecanizado por electrochispa, como electrodo de descarga, puede procesar con precisión materiales de alta resistencia como acero para moldes y carburo cementado con su conductividad estable y resistencia a la ablación, asegurando la precisión de la superficie de la pieza de trabajo; en el campo de la soldadura, especialmente la soldadura por resistencia y la soldadura por arco, su eficiente conductividad eléctrica y térmica puede garantizar la transmisión estable de la corriente de soldadura, reducir la pérdida de calor y mejorar la calidad de las juntas de soldadura; en el empaquetado microelectrónico, debido a su buena conductividad eléctrica y coeficiente de expansión térmica que coincide con el sustrato, se puede utilizar como electrodo de interconexión para garantizar una conexión confiable entre el chip y el sustrato y mejorar la estabilidad de los equipos electrónicos; Además, en los campos aeroespacial, de defensa nacional y otros, también se utiliza a menudo en contactos de arco de alta temperatura, interruptores de alto voltaje y otros componentes para cumplir con los requisitos de rendimiento en condiciones de trabajo extremas.

Descripción general de riesgos: Este producto es un material compuesto de metal sólido, inherentemente no tóxico. No se liberan sustancias tóxicas durante el almacenamiento y uso normales. Al no estar en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

forma de polvo, no existe riesgo de inhalación de polvo y no es explosivo ni inflamable. A temperaturas extremas (p. ej., superiores al punto de fusión del cobre, 1083 °C), la fase de cobre puede fundirse, pero este proceso no produce gases tóxicos. Evite quemaduras por contacto a altas temperaturas.

Medidas de extinción de incendios: Este producto no es inflamable ni explosivo. A altas temperaturas, solo sufre cambios físicos (como la fusión del cobre) y no libera gases tóxicos. En caso de incendio, no se requieren medidas especiales de extinción; las medidas estándar serán suficientes. Al extinguir un incendio, evite el contacto con materiales fundidos calientes, ya que pueden causar quemaduras.

Respuesta de emergencia ante fugas: El producto se presenta en estado sólido y no presenta riesgo de fugas. Si se rompe o se daña por fuerzas externas, simplemente recoja los fragmentos; no se requieren medidas de protección especiales. Los fragmentos pueden reciclarse o tratarse como residuos industriales estándar, garantizando así la seguridad ambiental.

Manipulación y almacenamiento: No se requiere equipo de protección especial durante la manipulación; basta con usar guantes industriales para evitar rayones superficiales. Almacenar en un ambiente seco y bien ventilado, alejado de sustancias corrosivas como ácidos y bases fuertes, para prevenir la corrosión de la superficie metálica. No se requiere sellado ni aislamiento especial; simplemente mantener seco al almacenar con otros materiales industriales.

Controles de exposición y protección personal: No se requiere protección respiratoria especial ni medidas de control del polvo (debido a la ausencia de polvo). Se recomienda usar guantes industriales comunes durante la operación para evitar lesiones por fricción con superficies duras; se requieren guantes termoaislantes para trabajar con altas temperaturas.

Eliminación: Los electrodos desechados pueden reciclarse como chatarra metálica y procesarse por agencias de reciclaje profesionales para extraer el tungsteno y el cobre para su posterior procesamiento. Los materiales no reciclables se tratan como residuos sólidos industriales generales y no contaminan el suelo ni el agua.

Información de transporte: No existen restricciones especiales durante el transporte y no se requiere etiquetado de materiales peligrosos. Simplemente mantenga el embalaje intacto y evite deformaciones causadas por colisiones fuertes. Puede enviarse en el mismo lote que otros productos industriales no corrosivos.

Información reglamentaria: Este producto cumple con la Ley de la República Popular China sobre la Prevención y el Control de la Contaminación Ambiental por Residuos Sólidos, el Reglamento sobre la Gestión Segura de Sustancias Químicas Peligrosas y otras leyes y normativas pertinentes. No es una sustancia química peligrosa ni tóxica, y su producción, venta y transporte cumplen con las normas nacionales de materiales industriales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 4: Clasificación de los electrodos de tungsteno-cobre

Los electrodos de tungsteno-cobre se pueden clasificar según diferentes estándares. Los métodos comunes incluyen la proporción de composición, los escenarios de aplicación y los procesos de moldeo. Según la proporción de tungsteno a cobre, se pueden dividir en tipo alto en tungsteno y tipo alto en cobre. El tipo alto en tungsteno tiene un alto contenido de tungsteno, mejor resistencia a altas temperaturas y dureza, y es adecuado para escenarios de alta temperatura y alta tensión; el tipo alto en cobre tiene un alto contenido de cobre y una conductividad eléctrica y térmica más sobresaliente, y es adecuado para condiciones de trabajo con requisitos de alta eficiencia eléctrica. Según el campo de aplicación, existen principalmente electrodos EDM, electrodos de soldadura, electrodos de empaquetado microelectrónico, etc. Los electrodos EDM deben tener resistencia a la ablación y conductividad, los electrodos de soldadura se centran en la estabilidad de la corriente, y los electrodos de empaquetado microelectrónico tienen estrictos requisitos de precisión dimensional y adaptación térmica.

4.1 Clasificación de electrodos de cobre y tungsteno dominada por la relación de composición

La clasificación de electrodos de tungsteno-cobre basada en la relación de composición es un método de agrupación de electrodos basado en la proporción de tungsteno y cobre. Este método de clasificación afecta directamente las propiedades físicas, mecánicas y eléctricas de los electrodos y satisface las necesidades de diferentes escenarios de aplicación. Los electrodos de tungsteno-cobre se preparan mediante pulvimetalurgia o infiltración al vacío. El tungsteno proporciona un alto punto de fusión, resistencia a altas temperaturas y al desgaste, mientras que el cobre aporta alta conductividad eléctrica y térmica. El ajuste de la relación determina el rendimiento integral del electrodo. La diferencia en la relación de composición se refleja principalmente en el nivel de tungsteno. Se divide en tres categorías: alto contenido de tungsteno, contenido medio de tungsteno y bajo contenido de tungsteno. Cada tipo de electrodo está optimizado para fines específicos, como el mecanizado por electrochispa, la soldadura por resistencia o el empaquetado microelectrónico. La base de la clasificación también tiene en cuenta la influencia de la microestructura y el proceso de preparación. La baja porosidad y la distribución uniforme de la fase son características comunes de varios tipos de electrodos.

4.1.1 Electrodos con alto contenido de tungsteno (80%-95% tungsteno)

Electrodos de tungsteno-cobre compuestos principalmente de tungsteno, con un contenido de cobre que suele oscilar entre el 5 % y el 20 %. Estos electrodos poseen una excepcional resistencia a altas temperaturas y a la erosión por arco eléctrico gracias a su elevado punto de fusión (3422 °C) y dureza (aproximadamente 3430 HV). Mediante un proceso de pulvimetalurgia, el polvo de tungsteno se mezcla y prensa con una pequeña cantidad de polvo de cobre. Tras la sinterización, el cobre rellena los poros en fase líquida, formando una densa estructura de esqueleto de tungsteno. La baja porosidad mejora la estabilidad del material. Un proceso de infiltración al vacío optimiza aún más la penetración del cobre y mejora la unión interfacial, lo que permite que los electrodos con alto contenido de tungsteno mantengan su integridad estructural incluso en condiciones extremas. Las características de los electrodos con alto contenido de tungsteno los hacen excepcionales en el mecanizado por electrochispa (EDM) y son

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

especialmente adecuados para el mecanizado de materiales de alta dureza. La alta resistencia al desgaste del tungsteno reduce la pérdida de superficie del electrodo y prolonga su vida útil. En la soldadura por resistencia, el alto contenido de tungsteno facilita las operaciones de desconexión con alta corriente, y su resistencia a la erosión por arco es significativamente mejor que la de los electrodos con bajo contenido de tungsteno, lo que reduce la adhesión de escoria. Los granos finos de la microestructura se optimizan mediante el proceso de prensado isostático en caliente, y la resistencia a la compresión puede alcanzar un cierto nivel, lo que los hace adecuados para escenarios de descarga de alta energía. Sin embargo, la conductividad eléctrica y térmica de los electrodos con alto contenido de tungsteno es baja, y la baja proporción de cobre limita la eficiencia de transmisión de corriente, por lo que deben utilizarse en conjunto con un diseño de disipación de calor.

Las aplicaciones también incluyen componentes aeroespaciales e interruptores de alta tensión. El alto contenido de tungsteno de los electrodos permite una resistencia a altas temperaturas superiores a 3000 °C, y los tratamientos superficiales, como el niquelado, mejoran aún más la resistencia a la oxidación. Durante el proceso de fabricación, la pureza del polvo de tungsteno debe controlarse por encima del 99,9 %, con un tamaño de partícula de entre 5 y 15 micras para garantizar un rendimiento constante.

4.1.2 Electrodo con contenido medio de tungsteno (50%-80% tungsteno)

Los electrodos con un contenido medio de tungsteno son un tipo equilibrado de electrodo de tungsteno-cobre, con un contenido de cobre que oscila entre el 20 % y el 50 %. Estos electrodos ofrecen un buen equilibrio entre resistencia a altas temperaturas y conductividad eléctrica. Fabricados mediante pulvimetalurgia o infiltración al vacío, su microestructura presenta un esqueleto de tungsteno uniforme y una red de fases de cobre. Durante la sinterización, el cobre en estado líquido rellena los poros entre las partículas de tungsteno. La baja porosidad y el fino tamaño de grano se optimizan mediante prensado isostático en caliente, lo que mejora la resistencia mecánica y las propiedades eléctricas del material. El mayor contenido de cobre mejora la conductividad eléctrica y térmica, lo que hace que los electrodos con un contenido medio de tungsteno sean versátiles en diversas aplicaciones.

Los electrodos de tungsteno medio se utilizan ampliamente en el mecanizado por electroerosión (EDM), siendo adecuados para el mecanizado de precisión de materiales de dureza media. La resistencia al desgaste del tungsteno, combinada con la conductividad del cobre, reduce la pérdida de electrodos y mejora la eficiencia del mecanizado. En la soldadura por resistencia, los electrodos de tungsteno medio admiten el funcionamiento con corriente media y ofrecen una gestión térmica superior a la de los electrodos de tungsteno alto, lo que reduce la zona afectada por el calor y mejora la calidad de la unión. El encapsulado microelectrónico es otra aplicación importante, donde su coeficiente de expansión térmica es similar al de los sustratos de silicio o cerámica, lo que reduce la tensión por ciclos térmicos y mejora la fiabilidad. El rendimiento de los electrodos de tungsteno medio también se ve afectado por la relación y el procesamiento. Por ejemplo, una relación 70/30 WCu equilibra la durabilidad y la eficiencia, mientras que una relación 60/40 WCu favorece la conductividad. A altas temperaturas, el ablandamiento de la fase de cobre puede afectar ligeramente la estabilidad, pero el esqueleto de tungsteno proporciona

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

soporte. Los tratamientos superficiales, como el pulido o el enchapado, pueden mejorar la resistencia a la corrosión y prolongar la vida útil.

4.1.3 Electrodo con bajo contenido de tungsteno (20%-50% tungsteno)

Los electrodos de bajo tungsteno (20%-50% tungsteno) son principalmente electrodos de tungsteno-cobre a base de cobre, con un contenido de cobre que varía del 50% al 80%. Estos electrodos exhiben excelentes propiedades de gestión eléctrica y térmica debido a la alta conductividad eléctrica del cobre ($5,8 \times 10^7$ S/m) y conductividad térmica (aproximadamente $400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). A través de un proceso de metalurgia de polvos, el polvo de tungsteno se mezcla con una alta proporción de polvo de cobre. Después de la sinterización, el cobre forma una red continua. La baja porosidad y la distribución uniforme de la fase se optimizan a través del prensado isostático en caliente, mejorando el rendimiento general del material. Un proceso de infiltración al vacío, a través de la infiltración de cobre líquido, mejora aún más la integridad de la ruta conductora, permitiendo que los electrodos de bajo tungsteno se destaquen en la conducción de alta eficiencia.

Los electrodos con bajo contenido de tungsteno se utilizan principalmente en escenarios que requieren alta conductividad eléctrica y térmica, como la soldadura por puntos o la soldadura por costura en la soldadura por resistencia. El alto rendimiento del cobre reduce el efecto térmico de la resistencia y mejora la calidad de la unión. En el mecanizado por electrochispa, los electrodos con bajo contenido de tungsteno son adecuados para el mecanizado en desbaste de materiales de baja dureza. La ductilidad del cobre favorece la rápida dispersión del calor y reduce el sobrecalentamiento local. En el encapsulado microelectrónico, el coeficiente de expansión térmica se adapta al sustrato, y la alta conductividad térmica del cobre favorece la disipación del calor de la viruta y prolonga la vida útil. Sin embargo, la resistencia a altas temperaturas y a la erosión por arco de los electrodos con bajo contenido de tungsteno es débil, y la baja proporción de tungsteno limita su estabilidad en condiciones extremas. Deben utilizarse en combinación con disipación de calor o descarga de baja energía.

Durante el proceso de fabricación, la pureza del polvo de cobre debe controlarse por encima del 99,9 %, con un tamaño de partícula de entre 5 y 15 micras. El tamaño de partícula del polvo de tungsteno es ligeramente mayor para optimizar el relleno. Los tratamientos superficiales, como el chapado en oro, pueden mejorar la resistencia a la corrosión y prolongar la vida útil en ambientes húmedos.

4.2 Clasificación de electrodos de tungsteno-cobre según escenarios de aplicación

La clasificación de electrodos de cobre-tungsteno según escenarios de aplicación es un método de agrupación de electrodos basado en entornos de uso específicos y requisitos funcionales. Este método de clasificación enfatiza el diseño específico y la optimización del rendimiento de los electrodos en diferentes campos industriales. Los electrodos de cobre-tungsteno se preparan mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío. El alto punto de fusión y la dureza del tungsteno se combinan con la alta conductividad eléctrica y térmica del cobre. La relación y la microestructura se ajustan según el escenario de aplicación para formar un material con baja porosidad y alta uniformidad. La clasificación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

se basa en el mecanizado por electroerosión, los electrodomésticos de alto voltaje y los campos de soldadura. Cada tipo de electrodo está optimizado para requisitos específicos de proceso y rendimiento, como la resistencia a la erosión por arco, la eficiencia de la conductividad eléctrica o la capacidad de gestión térmica.

4.2.1 Electrodo para EDM

Los electrodos diseñados específicamente para EDM (mecanizado por electroerosión) son electrodos de tungsteno-cobre, diseñados específicamente para la resistencia a la erosión por arco, la resistencia mecánica y la precisión del mecanizado. Estos electrodos suelen utilizar un alto contenido de tungsteno (como WCu 80/20 o WCu 90/10). El polvo de tungsteno se mezcla con una pequeña cantidad de polvo de cobre mediante un proceso de pulvimetalurgia. Tras la sinterización, el cobre llena los poros en la fase líquida, formando una densa estructura de esqueleto de tungsteno. La baja porosidad mejora la resistencia al choque térmico. Un proceso de infiltración al vacío optimiza aún más la penetración del cobre y mejora la unión interfacial, lo que garantiza la estabilidad del electrodo durante las descargas de alta energía. Los granos finos de la microestructura se optimizan mediante prensado isostático en caliente (HIP), lo que mejora la resistencia a la compresión y la resistencia al desgaste.

La principal ventaja de los electrodos diseñados para electroerosión reside en su resistencia a la erosión por arco. El alto punto de fusión del tungsteno (3422 °C) y su dureza (aproximadamente 3430 HV) soportan temperaturas de descarga de miles de °C, lo que reduce el desgaste superficial y lo hace ideal para el mecanizado de materiales de alta dureza como el carburo de tungsteno y las aleaciones de titanio. La precisión del mecanizado está garantizada, con una rugosidad superficial controlada a nivel micrométrico. La estructura de grano fino facilita la formación de geometrías complejas. En aplicaciones prácticas, los electrodos pueden soportar descargas de alta energía, lo que prolonga su vida útil y reduce la frecuencia de reemplazo.

Sin embargo, un bajo contenido de cobre puede limitar la conductividad eléctrica y térmica, lo que requiere un diseño de disipación de calor para evitar el sobrecalentamiento local. Los tratamientos superficiales, como el pulido, pueden mejorar la calidad superficial, haciéndolos adecuados para la fabricación de moldes de precisión.

4.2.2 Electrodo para aparatos eléctricos de alta tensión

Electrodos de tungsteno-cobre diseñados específicamente para interruptores de alta tensión y contactos eléctricos, que destacan por su resistencia a altas temperaturas, resistencia a la erosión por arco eléctrico y estabilidad conductiva. Estos electrodos suelen utilizar una proporción de tungsteno de media a alta (como WCu 70/30 o WCu 85/15) y se producen mediante un proceso de pulvimetalurgia. El polvo de tungsteno se mezcla con polvo de cobre y se sinteriza, de modo que el cobre llena los poros en fase líquida, formando una red de fases uniforme. La baja porosidad mejora la resistencia al arco eléctrico del material. Un proceso de infiltración al vacío optimiza la penetración del cobre, y el prensado isostático en caliente (HIP) mejora aún más la unión interfacial, garantizando la fiabilidad del electrodo durante la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

desconexión por alta tensión. Los granos finos de la microestructura ofrecen una alta resistencia a la compresión, lo que lo hace adecuado para la acción mecánica frecuente.

Las propiedades de los electrodos para aparatos eléctricos de alta tensión los hacen excelentes para interruptores de alta tensión. El alto punto de fusión del tungsteno (3422 °C) protege contra el calor del arco, y su resistencia a la erosión por arco reduce la erosión superficial y prolonga su vida útil. La alta conductividad del cobre garantiza una transmisión eficiente de la corriente, lo que lo hace ideal para situaciones de desconexión de alta corriente. Su coeficiente de expansión térmica se adapta al sustrato, reduciendo la tensión por ciclos térmicos. Su microestructura optimizada reduce la variabilidad de la resistencia y garantiza un rendimiento eléctrico estable. En aplicaciones prácticas, los electrodos pueden soportar frecuentes operaciones de conmutación, lo que reduce la tasa de fallos y se utilizan ampliamente en equipos de potencia y sistemas de control industrial.

Durante el proceso de fabricación, la proporción de tamaño de partícula del polvo de tungsteno con respecto al polvo de cobre debe controlarse entre 1:2 y 1:3 para garantizar una distribución uniforme de las fases. Los tratamientos superficiales, como el niquelado, pueden mejorar la resistencia a la oxidación y la adaptabilidad a entornos húmedos o industriales. En el futuro, mediante el ajuste de la proporción de la composición o la introducción de interfases (como el molibdeno) , se podrá mejorar aún más la resistencia al arco eléctrico y la conductividad eléctrica para cumplir con requisitos eléctricos complejos o de mayor voltaje, como los de los equipos de redes inteligentes.

4.2.3 Electrodo en el campo de soldadura

Electrodos de tungsteno-cobre diseñados específicamente para soldadura por resistencia, que destacan por su conductividad eléctrica y térmica, y por sus propiedades antiadherentes. Estos electrodos suelen utilizar un contenido de tungsteno de bajo a medio (como WCu 60/40 o WCu 70/30). El polvo de tungsteno se mezcla con un alto porcentaje de polvo de cobre mediante un proceso de pulvimetalurgia. Tras la sinterización, el cobre forma una red continua. La baja porosidad se optimiza mediante prensado isostático en caliente, lo que mejora la gestión térmica y el rendimiento eléctrico. El proceso de infiltración al vacío mejora la integridad de la vía conductora mediante la penetración de cobre líquido. Los granos finos de su microestructura aportan resistencia a la compresión y tenacidad, lo que los hace adecuados para entornos de soldadura de alta presión.

Las principales ventajas de los electrodos en la soldadura residen en su conductividad eléctrica y térmica. La alta conductividad eléctrica del cobre ($5,8 \times 10^7$ S/m) y conductividad térmica (aproximadamente 400 W/ m· K) reducen los efectos del calentamiento resistivo, mejoran la calidad de la unión y distribuyen uniformemente el calor, reduciendo la zona afectada por el calor (ZAC), haciéndolo adecuado para la soldadura por puntos o costura. La resistencia a altas temperaturas del tungsteno (3422 °C) proporciona soporte estructural, y sus propiedades antiadherentes se optimizan aún más mediante tratamientos superficiales (como el pulido), que reducen la adhesión de escoria y prolongan la vida útil del electrodo. En aplicaciones prácticas, los electrodos pueden soportar corrientes moderadas, lo que facilita una soldadura eficiente y se utilizan ampliamente en la fabricación de automóviles y el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ensamblaje de productos electrónicos.

Durante el proceso de fabricación, la pureza del polvo de cobre debe superar el 99,9 %, con un tamaño de partícula de entre 5 y 15 micras. Las partículas de polvo de tungsteno deben ser ligeramente mayores para optimizar el llenado. Las altas temperaturas de funcionamiento, como las altas temperaturas, pueden reblandecer la fase de cobre, lo que requiere un diseño integrado de disipación de calor. En el futuro, la introducción de nanopulvo de cobre o diseños multifásicos podría mejorar aún más la conductividad y las propiedades antiadherentes, lo que facilitaría aplicaciones que requieren mayor eficiencia o soldaduras complejas, como piezas estructurales ligeras.

4.2.4 Electrodo especial para aplicaciones aeroespaciales y militares

Electrodos de tungsteno-cobre diseñados específicamente para los sectores aeroespacial y militar, que destacan por su resistencia a altas temperaturas, resistencia mecánica y fiabilidad en entornos extremos. Estos electrodos suelen utilizar un alto contenido de tungsteno y se fabrican mediante pulvimetalurgia o infiltración al vacío. El polvo de tungsteno se mezcla con una pequeña cantidad de polvo de cobre y posteriormente se sinteriza. El cobre llena los poros en estado líquido, formando una robusta estructura de esqueleto de tungsteno. Durante el proceso de fabricación, la microestructura se optimiza mediante prensado isostático en caliente (HIP), lo que resulta en una baja porosidad y una distribución de fase uniforme, garantizando así la estabilidad del electrodo en condiciones de alta tensión o temperatura. La adición de cobre optimiza la conductividad eléctrica y la gestión térmica, lo que permite su adaptación a entornos operativos complejos.

Las principales aplicaciones de los electrodos especiales en las industrias aeroespacial y militar incluyen sistemas de protección térmica para naves espaciales y contactos eléctricos para equipos militares. El alto punto de fusión del tungsteno proporciona una excelente resistencia a altas temperaturas, lo que lo hace adecuado para soportar choques de alta energía o cargas térmicas extremas. La resistencia mecánica del electrodo facilita un procesamiento de alta precisión y un uso prolongado, y la uniformidad de su microestructura reduce la concentración de tensiones y mejora la resistencia a la fatiga. En el ámbito militar, los electrodos se utilizan a menudo en componentes clave de sistemas de radar o armas de alto rendimiento, que deben soportar vibraciones intensas y entornos corrosivos. Los tratamientos superficiales, como el chapado, mejoran aún más la resistencia a la intemperie. El proceso de preparación se centra en la pureza de la materia prima y el control del tamaño de las partículas para garantizar un rendimiento constante. El escenario de uso también requiere que el electrodo tenga una excelente resistencia a la erosión por arco eléctrico y estabilidad térmica. La conductividad térmica del cobre ayuda a dispersar rápidamente el calor y a reducir el riesgo de sobrecalentamiento local.

4.3 Clasificación de electrodos de tungsteno-cobre por características morfológicas y estructurales

Los electrodos de tungsteno-cobre son la base fundamental de su adaptabilidad a diferentes escenarios de aplicación, abarcando múltiples dimensiones como la geometría, la microestructura y la macromorfología. Estas características influyen directamente en la adaptabilidad de la instalación, la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eficiencia del rendimiento y la compatibilidad del procesamiento del electrodo. Por lo tanto, la clasificación por características morfológicas y estructurales es uno de los métodos más intuitivos para la selección industrial.

4.3.1 Electrodo de bloque

Los electrodos de bloque son electrodos de tungsteno-cobre diseñados en forma de bloque, ideales para aplicaciones que requieren una gran superficie de contacto o un soporte de alta resistencia. Estos electrodos se fabrican mediante un proceso de pulvimetalurgia, donde se mezclan polvos de tungsteno y cobre en una proporción específica y se prensan para darles forma. Durante la sinterización, el cobre rellena los poros en fase líquida, formando una microestructura densa. El prensado isostático en caliente optimiza aún más la uniformidad y la baja porosidad de los electrodos de bloque, garantizando la estabilidad del material bajo carga mecánica. El diseño de bloque facilita el mecanizado y permite cortar o conformar en diferentes tamaños según sea necesario, adaptándose a los diversos requisitos de la aplicación.

Las características del electrodo de bloque lo hacen excepcional en la electroerosión, ideal para procesar piezas de gran tamaño o geometrías complejas. Su amplia área de contacto proporciona condiciones de descarga estables. La distribución uniforme de fases en la microestructura mejora la resistencia a la erosión por arco, la dureza del tungsteno facilita su uso a largo plazo y la conductividad del cobre optimiza la transmisión de corriente. Durante el proceso de preparación, la uniformidad de la mezcla de las materias primas y el control de los parámetros de sinterización afectan directamente al rendimiento del electrodo de bloque, y tratamientos superficiales como el pulido pueden mejorar la precisión del procesamiento. En el campo de la soldadura, el electrodo de bloque puede utilizarse como molde o soporte para soportar altas presiones y ciclos térmicos. En el futuro, las propiedades mecánicas y el rango de aplicación del electrodo de bloque podrán mejorarse aún más mediante el ajuste del proceso de prensado o la introducción de un diseño multifase.

4.3.2 Electrodo de varilla

Los electrodos de varilla son electrodos de tungsteno-cobre diseñados con una forma similar a la de una varilla, ideales para aplicaciones que requieren un posicionamiento preciso o un mecanizado delicado. Estos electrodos se fabrican mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío. Los polvos de tungsteno y cobre se mezclan y prensan en forma de varilla. Durante la sinterización, el cobre rellena los poros, creando una estructura delgada y densa. El prensado isostático en caliente optimiza la microestructura del electrodo de varilla, lo que resulta en una baja porosidad y una distribución de fase uniforme, garantizando así la estabilidad del material durante operaciones de alta precisión. El diseño de la varilla facilita la instalación y el guiado, lo que lo hace especialmente adecuado para aplicaciones que requieren mecanizado de agujeros profundos o trabajos en espacios reducidos.

electroerosión (EDM) y son adecuados para el mecanizado de precisión o la fabricación de microcomponentes. Su forma esbelta permite una descarga de alta precisión, mientras que la resistencia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

al desgaste del tungsteno reduce el desgaste del electrodo. La fase de cobre en la microestructura proporciona conductividad eléctrica y térmica, lo que favorece una transferencia de corriente estable y la gestión térmica. En el encapsulado microelectrónico, la forma de los electrodos de varilla facilita la alineación con el sustrato, adaptándose a la expansión térmica y reduciendo la concentración de tensiones. Durante la fabricación, es necesario controlar la relación entre la longitud y el diámetro de los electrodos de varilla para garantizar la resistencia mecánica y la procesabilidad. Los tratamientos superficiales, como el rectificado, pueden mejorar la calidad superficial.

4.3.3 Electrodo de lámina

Los electrodos laminares son electrodos de tungsteno-cobre diseñados en forma de láminas delgadas, ideales para aplicaciones que requieren un contacto de gran superficie o una descarga uniforme. Estos electrodos se fabrican mediante un proceso de pulvimetalurgia, donde se mezclan polvos de tungsteno y cobre en una proporción específica y se presan para formar una lámina delgada. Durante la sinterización, el cobre llena los poros en forma líquida, formando una microestructura densa. El prensado isostático en caliente optimiza aún más la uniformidad y la baja porosidad de los electrodos laminares, garantizando la estabilidad del material bajo cargas mecánicas y ciclos térmicos. El diseño laminar proporciona una gran superficie, lo que facilita un contacto estrecho con la pieza de trabajo o el sustrato, y es adecuado para requisitos de procesamiento que requieren una distribución uniforme del calor o una alta transmisión de corriente.

Los electrodos de lámina ofrecen un rendimiento excepcional en la electroerosión y son adecuados para procesar piezas planas o aplicaciones que requieren descargas de gran superficie. Su delgada estructura de lámina facilita una distribución eficiente del arco, y la resistencia al desgaste y a la erosión del tungsteno reduce la pérdida de superficie y prolonga su vida útil. La fase de cobre en la microestructura proporciona conductividad eléctrica y térmica, garantizando una transmisión de corriente estable y la dispersión del calor, reduciendo así el riesgo de sobrecalentamiento local. En el campo de la soldadura, los electrodos de lámina pueden utilizarse como placas de electrodos o disipadores de calor, soportando altas presiones y ciclos térmicos, y mejorando la calidad de la unión. Durante el proceso de preparación, el prensado debe controlar la uniformidad del espesor. La uniformidad de la mezcla de las materias primas y los parámetros de sinterización afectan directamente al rendimiento del electrodo de lámina. El tratamiento superficial, como el esmerilado o el pulido, puede mejorar la precisión del contacto. Las aplicaciones también incluyen el encapsulado microelectrónico y la gestión térmica. El diseño delgado del electrodo laminar facilita la unión al chip o sustrato, y la adaptación a la expansión térmica reduce la concentración de tensiones y mejora la fiabilidad. La flexibilidad del electrodo laminar le permite adaptarse a geometrías complejas, pero se debe tener cuidado durante el proceso de fabricación para evitar la deformación de la lámina.

4.3.4 Electrodos de formas especiales

Los electrodos de formas especiales son el tipo más complejo de electrodos de tungsteno-cobre. Su forma se personaliza completamente según los requisitos funcionales de cada aplicación, superando las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

limitaciones de las formas convencionales, como bloques y varillas, y abarcando diversas estructuras no estándar, como superficies con formas especiales, formas escalonadas, formas porosas, rejillas huecas y superficies compuestas. El diseño de este tipo de electrodo debe estar estrechamente integrado con los parámetros operativos, el espacio de ensamblaje y los objetivos de rendimiento del producto final. Desde el modelado inicial hasta la formación final, se requieren múltiples rondas de verificación por simulación y una precisión de procesamiento extremadamente alta. Cualquier pequeña desviación puede afectar directamente la estabilidad de los procesos posteriores o los indicadores de rendimiento del producto final.

En términos de diseño morfológico, la clave de los electrodos de formas especiales reside en la orientación funcional. Por ejemplo, para el procesamiento complejo de cavidades en moldes de cubiertas de automóviles, los electrodos de cobre-tungsteno de formas especiales deben replicar completamente los contornos de la superficie curva de la cavidad, incluyendo detalles como filetes, ranuras profundas y pendientes, e incluso simular el ángulo de desmoldeo durante el conformado de la pieza. Este diseño morfológico de "réplica especular" garantiza la uniformidad del espacio de descarga durante el mecanizado por electrochispa y, en última instancia, el acabado superficial y la precisión de montaje de las cubiertas de automóviles. En el procesamiento del tubo de llama de la cámara de combustión de un motor de avión, los electrodos de formas especiales suelen diseñarse como estructuras curvas con microranuras densas. Estas microranuras corresponden exactamente a los canales de refrigeración del tubo de llama. Los canales formados mediante el mecanizado por descarga deben cumplir con una estricta consistencia dimensional; de lo contrario, se producirá un enfriamiento local desigual y fallos por fatiga térmica durante el funcionamiento del motor.

Los electrodos escalonados con formas especiales se utilizan ampliamente en escenarios de procesamiento multiestación, y sus diferentes secciones de escalón se corresponden con diferentes profundidades de procesamiento o requisitos de precisión. Por ejemplo, en el procesamiento integrado del marco central de un teléfono móvil, la primera sección del electrodo escalonado se utiliza para el procesamiento de desbaste para eliminar una gran cantidad de material, la segunda sección logra un recorte fino reduciendo el diámetro, y la tercera sección completa el redondeo mediante la transición del arco al final. Este diseño de "sujeción única y conformado en múltiples pasos" permite reducir el número de cambios de herramienta, mejorar la eficiencia del procesamiento y evitar errores de posicionamiento causados por la sujeción múltiple. La diferencia de altura y diámetro de los escalones debe calcularse con precisión en función de la dureza del material y la tolerancia de procesamiento. Si existe una desviación en el tamaño de un determinado escalón, el error acumulado en el procesamiento posterior puede superar el estándar.

El diseño de electrodos porosos y conformados se centra en equilibrar la disipación eficiente del calor con un diseño ligero. En la fabricación de estatores para motores de vehículos de nueva energía, los electrodos requieren orificios pasantes tipo panal. Estos orificios no solo reducen el peso del electrodo, sino que también permiten que el flujo de aire interno disipe rápidamente el calor generado por la descarga, evitando la deformación térmica que podría afectar la precisión del mecanizado. En el procesamiento de componentes de intercambiadores de calor para equipos de energía nuclear, los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

orificios pasantes de los electrodos porosos y conformados deben coincidir perfectamente con los orificios del haz de tubos del intercambiador de calor. De lo contrario, se producirán espacios desiguales durante el posterior ensamblaje de los tubos, lo que afectará la eficiencia de la transferencia de calor.

El proceso de conformado de electrodos con formas especiales desempeña un papel decisivo en la precisión morfológica. El corte por hilo permite el corte bidimensional de contornos complejos y es adecuado para estructuras planas con formas especiales; el conformado por electrochispa permite procesar superficies curvas tridimensionales, reproducir formas complejas mediante el movimiento sincronizado del electrodo y la pieza, y garantizar el acabado superficial. Para electrodos porosos con formas especiales y canales internos, es necesario combinar la perforación profunda, la perforación láser y otros procesos para garantizar la verticalidad y la penetración de los orificios. Durante el procesamiento, el error morfológico debe detectarse en tiempo real mediante equipos de medición de precisión. Si se detecta que una dimensión de una característica está fuera de tolerancia, los parámetros de procesamiento deben ajustarse inmediatamente; de lo contrario, se desechará todo el electrodo. Esta búsqueda de la precisión extrema hace que el coste de fabricación de los electrodos con formas especiales sea mucho mayor que el de los electrodos con formas regulares, pero también los convierte en un componente clave indispensable en la fabricación de alta gama.

4.4 Clasificación de electrodos de cobre y tungsteno basada en indicadores de rendimiento

La clasificación de electrodos de tungsteno-cobre basada en el rendimiento agrupa los electrodos según sus requisitos específicos, priorizando la optimización de indicadores clave como la conductividad, la resistencia a altas temperaturas o la resistencia mecánica. Este método de clasificación diseña electrodos especializados para diferentes requisitos de rendimiento ajustando las proporciones de tungsteno y cobre, así como el proceso de preparación. La microestructura de los electrodos de tungsteno-cobre se optimiza mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío, presentando baja porosidad y una distribución de fases uniforme. El prensado isostático en caliente mejora aún más la consistencia del rendimiento. Los criterios de clasificación incluyen alta conductividad, resistencia a altas temperaturas o alta resistencia mecánica, y cada tipo de electrodo destaca en aplicaciones específicas.

4.4.1 Electrodos altamente conductores

Los electrodos de alta conductividad son electrodos de tungsteno-cobre diseñados para una transmisión eficiente de la corriente, con una conductividad y resistividad óptimas. Estos electrodos suelen utilizar un bajo contenido de tungsteno. El polvo de tungsteno se mezcla con una alta proporción de polvo de cobre mediante un proceso de pulvimetalurgia, y el cobre forma una red conductora continua durante la sinterización. La microestructura se optimiza mediante prensado isostático en caliente (HIP) para lograr una baja porosidad y una distribución de fase uniforme. La alta conductividad del cobre (niveles casi puros) garantiza una transmisión eficiente de la corriente. Un proceso de infiltración al vacío mejora aún más la integridad de la ruta conductora mediante la infiltración de cobre líquido, lo que permite que los electrodos de alta conductividad destaquen en aplicaciones eléctricas. Las principales aplicaciones de los electrodos de alta conductividad incluyen la soldadura por resistencia y el encapsulado microelectrónico.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La alta conductividad del cobre favorece una transmisión de corriente estable, reduce los efectos del calentamiento por resistencia y mejora la calidad de las uniones y la eficiencia de la conexión de circuitos. En la soldadura por resistencia, los electrodos pueden soportar corrientes moderadas, distribuir el calor uniformemente y reducir la zona afectada por el calor, lo que los hace adecuados para la soldadura por puntos o la soldadura de costura. En el encapsulado microelectrónico, la baja resistividad de los electrodos de alta conductividad favorece una transmisión de señal eficiente, mientras que la conductividad térmica del cobre favorece la disipación del calor del chip y mejora la fiabilidad. La red uniforme de fases de cobre en la microestructura reduce la dispersión de electrones. La pureza del polvo de cobre durante el proceso de preparación debe ser alta y el tamaño de partícula debe controlarse dentro de un rango determinado para garantizar un rendimiento constante.

Las condiciones de operación, como las altas temperaturas, pueden ablandar la fase de cobre, lo que afecta la estabilidad conductiva. Para mantener el rendimiento, se requiere un diseño de disipación de calor o un tratamiento superficial (como el chapado en oro). El tratamiento superficial también puede mejorar la resistencia a la corrosión y prolongar la vida útil en ambientes húmedos. Los electrodos de alta conductividad demuestran un rendimiento superior en entornos de alta frecuencia o alta corriente y se utilizan ampliamente en equipos electrónicos y la fabricación de automóviles.

4.4.2 Electrodo resistente a la erosión por arco

entornos de arco de alta energía, que destacan por su resistencia a la erosión por arco y su estabilidad superficial. Estos electrodos suelen utilizar un alto contenido de tungsteno. El polvo de tungsteno se mezcla con una pequeña cantidad de polvo de cobre mediante un proceso de pulvimetalurgia. Tras la sinterización, el cobre llena los poros en fase líquida, formando una sólida estructura de esqueleto de tungsteno. La microestructura se optimiza mediante prensado isostático en caliente (HIP) para presentar baja porosidad y una distribución de fase uniforme. El alto punto de fusión y la dureza del tungsteno proporcionan una excelente resistencia al arco. Un proceso de infiltración al vacío, mediante la infiltración de cobre líquido, mejora aún más la unión interfacial, garantizando la durabilidad del electrodo durante descargas repetidas.

Las principales aplicaciones de los electrodos resistentes a la erosión por arco incluyen el mecanizado por electrochispa y los interruptores de alta tensión. El alto punto de fusión del tungsteno resiste arcos de alta temperatura de miles de grados, reduce la fusión o evaporación superficial y prolonga su vida útil. En el mecanizado por electrochispa, el electrodo puede procesar materiales de alta dureza, reducir las pérdidas por erosión y mantener la precisión del mecanizado. En los interruptores de alta tensión, la resistencia al arco del electrodo permite la desconexión frecuente de la corriente y reduce el daño superficial. La red uniforme de fases de tungsteno en la microestructura reduce la concentración de tensión térmica, y los tratamientos superficiales, como el pulido o el chapado, pueden mejorar aún más la resistencia a la oxidación y adaptarse a entornos industriales. Durante la preparación, la pureza del polvo de tungsteno debe ser alta y el tamaño de partícula debe controlarse dentro de un rango determinado para garantizar un rendimiento constante. También se pueden utilizar en aplicaciones especiales que requieren descargas de alta energía. La conductividad térmica del cobre facilita la dispersión del calor y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reduce el riesgo de sobrecalentamiento local.

4.4.3 Electrodo de alta resistencia

Electrodos de tungsteno-cobre diseñados específicamente para entornos de alta tensión mecánica, con énfasis en la resistencia a la compresión y a la deformación. Estos electrodos suelen utilizar un contenido de tungsteno medio-alto (como WCu 85/15 o WCu 70/30) y se producen mediante un proceso de pulvimetalurgia. Los polvos de tungsteno y cobre se mezclan y compactan, y el cobre rellena los poros durante la sinterización, creando una microestructura densa. El prensado isostático en caliente optimiza la unión interfacial, dando como resultado una microestructura con baja porosidad y una distribución de fases uniforme. El esqueleto de tungsteno proporciona una alta resistencia a la compresión. Un proceso de infiltración al vacío, mediante la infiltración de cobre líquido, mejora aún más la resistencia general del material, haciéndolo apto para operaciones con cargas elevadas.

Las principales aplicaciones de los electrodos de alta resistencia incluyen la eliminación de material a granel en el mecanizado por electroerosión (EDM) y la soldadura a alta presión. La alta dureza del tungsteno proporciona resistencia a los impactos mecánicos, mientras que la ductilidad del cobre optimiza la distribución de la tensión y reduce la formación de grietas. En el encapsulado microelectrónico, los electrodos de alta resistencia soportan las tensiones de los ciclos térmicos y la sujeción mecánica, lo que aumenta su fiabilidad. Los granos finos de su microestructura mejoran la resistencia a la fatiga. La proporción de tamaño de partícula de los polvos de tungsteno y cobre debe ajustarse durante el proceso de fabricación para garantizar una distribución uniforme de las fases. Los tratamientos superficiales, como el rectificado, pueden mejorar la resistencia al desgaste y prolongar la vida útil.

Las condiciones de operación, como las altas temperaturas, pueden afectar la estabilidad de la fase de cobre, lo que requiere un diseño de disipación de calor para mantener su rendimiento. Los electrodos de alta resistencia son excelentes en entornos de alta tensión y se utilizan ampliamente en componentes aeroespaciales y moldes industriales.

4.4.4 Electrodo de alta resistencia al calor

entornos de temperaturas extremadamente altas, con énfasis en la estabilidad térmica y las capacidades de gestión térmica. Estos electrodos suelen utilizar un alto contenido de tungsteno (como WCu 90/10 o WCu 85/15) y se producen mediante un proceso de pulvimetalurgia. El polvo de tungsteno se mezcla con una pequeña cantidad de polvo de cobre. Tras la sinterización, el cobre llena los poros en la fase líquida, formando una sólida estructura de esqueleto de tungsteno. La microestructura se optimiza mediante prensado isostático en caliente (HIP) para lograr una baja porosidad y una distribución uniforme de las fases. El alto punto de fusión del tungsteno proporciona una excelente estabilidad térmica. Un proceso de infiltración al vacío, que infiltra cobre líquido, mejora la integridad de la vía de conducción térmica, garantizando que el electrodo mantenga su rendimiento a altas temperaturas. Las principales aplicaciones de los electrodos resistentes a altas temperaturas incluyen sensores de alta temperatura y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sistemas de protección térmica aeroespacial. El alto punto de fusión del tungsteno soporta entornos de alta temperatura de miles de grados, y la conductividad térmica del cobre facilita la dispersión del calor, reduciendo el riesgo de sobrecalentamiento local. En el encapsulado microelectrónico, la estabilidad térmica del electrodo garantiza la fiabilidad del chip durante el funcionamiento a alta temperatura, y la adaptación a la expansión térmica reduce la concentración de tensiones. La red uniforme de fases de tungsteno en la microestructura reduce la fatiga térmica, y los tratamientos superficiales, como el niquelado, pueden mejorar la resistencia a la oxidación y adaptarse a entornos húmedos o industriales. En el proceso de preparación, la pureza del polvo de tungsteno debe alcanzar un alto nivel y el tamaño de partícula debe controlarse dentro de un rango determinado para garantizar un rendimiento térmico constante. Los escenarios de uso también incluyen aplicaciones especiales que requieren altas cargas térmicas. La fase de cobre puede ablandarse a altas temperaturas, pero el esqueleto de tungsteno proporciona soporte.

4.5 Clasificación de electrodos de tungsteno-cobre por microestructura

La microestructura se determina mediante el proceso de preparación y refleja el estado de distribución y el modo de enlace de las dos fases de tungsteno-cobre. Se divide principalmente en: dispersión uniforme, relleno de esqueleto y distribución en gradiente. Las diferentes estructuras influyen significativamente en la conductividad eléctrica, la conductividad térmica y las propiedades mecánicas del electrodo.

4.5.1 Electrodos uniformemente dispersos

Los electrodos de dispersión uniforme son el tipo de electrodos de tungsteno-cobre con mayor equilibrio microestructural. Su característica principal reside en la distribución altamente uniforme de las partículas de tungsteno y las fases de cobre. En esta estructura, diminutas partículas de tungsteno se incrustan uniformemente en la matriz de cobre de forma discreta. No se produce aglomeración localizada de partículas de tungsteno ni segregación ni agregación de las fases de cobre. La interfaz entre ambas fases está estrechamente unida mediante sinterización a alta temperatura en un proceso de pulvimetalurgia, presentando una morfología microscópica de "tú en mí, yo en ti". Esta estructura rompe las limitaciones de las propiedades de un solo metal, permitiendo que la resistencia a altas temperaturas del tungsteno se sinergice con la conductividad eléctrica y térmica del cobre, a la vez que evita las deficiencias de rendimiento causadas por la distribución desigual de los componentes.

La clave para lograr esta estructura de dispersión uniforme reside en el control preciso del proceso de preparación. Primero, el polvo de tungsteno y el polvo de cobre deben procesarse a fondo mediante un proceso de mezcla en molino de bolas, de modo que ambos polvos estén en contacto completo y se refinen mediante fuerza mecánica para formar un polvo mixto con una composición uniforme. A continuación, el polvo mixto se prensa en una pieza bruta mediante un proceso de prensado uniforme para garantizar que la presión se transmita uniformemente a todas las partes de la pieza bruta y evitar diferencias de densidad locales. Finalmente, en la etapa de sinterización, la temperatura y el tiempo de mantenimiento se controlan con precisión para promover la difusión y fusión del tungsteno y el cobre en la interfaz, formando un estado de unión estable. Todo el proceso debe evitar estrictamente la mezcla de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

impurezas o fluctuaciones en los parámetros del proceso; de lo contrario, se podría perder la uniformidad. Por ejemplo, un tiempo de molienda de bolas insuficiente provocará una mezcla desigual de los polvos, y una temperatura de sinterización demasiado baja afectará la resistencia de la unión de la interfaz, lo que provocará defectos en la microestructura.

La principal ventaja del electrodo, gracias a su estructura de dispersión uniforme, reside en la consistencia de su rendimiento. A nivel macro, la conductividad, la conductividad térmica, la dureza y otros indicadores del electrodo se mantienen estables en diferentes áreas y no fluctúan significativamente debido a cambios de posición. Esta característica lo hace excepcional en entornos con requisitos estrictos de uniformidad de rendimiento, como en el campo de la electroerosión de precisión: cuando el electrodo y la pieza de trabajo realizan una descarga de alta frecuencia, la microestructura uniforme garantiza una distribución uniforme de la densidad de corriente sobre la superficie del electrodo, evitando la concentración de energía de descarga debido a diferencias de resistencia local, reduciendo así las irregularidades o marcas de quemaduras en la superficie de la pieza y garantizando la consistencia del acabado de la superficie mecanizada. Incluso en procesos continuos a largo plazo, esta uniformidad mantiene la estabilidad de los parámetros de descarga y reduce las desviaciones del proceso causadas por fluctuaciones en el rendimiento del electrodo.

En aplicaciones de soldadura de alta frecuencia, las ventajas de los electrodos uniformemente dispersos son significativas. Durante el proceso de soldadura, el electrodo debe transmitir de forma estable la corriente de alta frecuencia al área de soldadura y lograr la fusión del material mediante calor de resistencia. Si la microestructura del electrodo es irregular, las áreas locales de alta resistencia generarán un calor excesivo, provocando que la soldadura se sobrecaliente o incluso se adhiera; mientras que las áreas de baja resistencia pueden no tener suficiente calor, resultando en una soldadura fría. La estructura uniformemente dispersa garantiza que la corriente se distribuya uniformemente durante el proceso de transmisión a través de una red conductora de fase de cobre continua y uniforme, de modo que el calor en la soldadura se mantenga estable, asegurando la formación completa del núcleo fundido y evitando daños por sobrecalentamiento. Al mismo tiempo, las partículas de tungsteno uniformemente distribuidas pueden proporcionar un soporte mecánico consistente al electrodo, previniendo la deformación local durante el contacto de presión repetido y prolongando su vida útil. Las ventajas de esta estructura en la gestión térmica son cruciales. En dispositivos electrónicos de alta potencia, los electrodos de tungsteno-cobre suelen actuar como disipadores de calor. La red de conductividad térmica uniforme distribuye rápida y uniformemente el calor de los puntos calientes por todo el electrodo, disipándolo a través del disipador térmico, evitando así la acumulación localizada de calor y la degradación del rendimiento del dispositivo. Incluso en entornos con fluctuaciones drásticas de temperatura, la microestructura uniforme reduce la tensión interna causada por la expansión térmica diferencial, disminuyendo así el riesgo de agrietamiento del electrodo.

4.5.2 Electrodo relleno de esqueleto

El electrodo con esqueleto es un material compuesto de tungsteno y cobre que logra un rendimiento sinérgico gracias a un diseño estructural único. Su característica principal es la formación de una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estructura de red interpenetrante de "esqueleto de tungsteno y relleno de cobre". En esta estructura, el tungsteno forma el cuerpo de soporte del electrodo en forma de esqueleto continuo, similar a la estructura de acero de un edificio, proporcionando una base estructural sólida para toda la estructura; mientras que la fase de cobre llena completamente los poros del esqueleto de tungsteno, formando una trayectoria conductora continua. Los dos componentes no solo mantienen sus respectivas ventajas de rendimiento, sino que también logran una sinergia funcional gracias a su complementariedad estructural. Este diseño supera las limitaciones de rendimiento de un solo material metálico, permitiendo que el electrodo posea simultáneamente las propiedades compuestas de alta resistencia, resistencia a altas temperaturas y alta conductividad eléctrica y térmica.

La clave para preparar electrodos con esqueleto de tungsteno reside en el control preciso del proceso de infiltración al vacío, que se divide en dos etapas principales. La primera es la prefabricación del esqueleto de tungsteno: tras mezclar el polvo de tungsteno según una fórmula específica, se prensa en un molde para darle forma y se sinteriza a alta temperatura para formar un esqueleto poroso con una porosidad específica. Durante el proceso de sinterización, las partículas de tungsteno se unen firmemente mediante soldadura por difusión, creando una red tridimensional continua. Los poros del esqueleto reservan espacio para el posterior llenado de la fase de cobre. En este punto, el esqueleto de tungsteno ya posee una alta resistencia mecánica y a altas temperaturas, pero su conductividad es baja, lo cual debe compensarse en etapas posteriores.

La segunda etapa es la infiltración de la fase de cobre: el esqueleto de tungsteno prefabricado se coloca en un entorno de vacío, se extiende material de cobre a su alrededor y se calienta por encima de su punto de fusión. Bajo la acción combinada de alta temperatura y condiciones de vacío, el cobre sólido se convierte en líquido y, con la ayuda de la acción capilar y la penetración por gravedad, se llena uniformemente a lo largo de los poros del esqueleto de tungsteno hasta que todos los huecos se llenan. El rol del entorno de vacío es crucial. Puede evitar que el aire se mezcle para formar burbujas y asegurar que la fase de cobre forme una red conductora continua e ininterrumpida en los poros. Después del enfriamiento, el esqueleto de tungsteno y la fase de cobre forman una estructura interpenetrante estrechamente integrada: el esqueleto de tungsteno proporciona capacidad antideformación y soporte de alta temperatura, y la fase de cobre es responsable de la transmisión de corriente y la disipación de calor. Ambos se complementan entre sí y le dan al electrodo un excelente rendimiento integral.

Las ventajas de rendimiento de los electrodos con esqueleto son especialmente evidentes en aplicaciones de alta temperatura y alta presión. La estructura continua de su esqueleto de tungsteno le confiere una resistencia mecánica y a altas temperaturas muy superior a la del cobre puro. Incluso en entornos de temperaturas extremas, mantiene la estabilidad estructural y no se ablanda ni deforma fácilmente. El relleno de fase de cobre garantiza una excelente conductividad eléctrica y térmica, disipando rápidamente el calor de las zonas de alta temperatura y evitando la degradación del rendimiento causada por el sobrecalentamiento local. Esta característica lo convierte en la opción ideal para condiciones de trabajo extremas en los sectores aeroespacial, de energía nuclear y otros.

En aplicaciones de electrodos de tobera para motores de cohetes, los electrodos con esqueleto presentan

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ventajas únicas. Como componente clave del sistema de propulsión de cohetes, la tobera debe soportar la erosión continua del gas a alta temperatura durante su funcionamiento, además de requerir el control de la ignición y la llama mediante electrodos. En este punto, el esqueleto de tungsteno, con su punto de fusión extremadamente alto y su resistencia estructural, resiste la erosión del gas a alta temperatura, evitando que el electrodo se funda o se deforme debido a la alta temperatura. La fase de cobre que llena el esqueleto disipa rápidamente la gran cantidad de calor generada por la erosión del gas a través de un camino continuo, evitando fallos estructurales causados por sobrecalentamiento localizado. Este mecanismo sinérgico de "el tungsteno resiste la ablación y el cobre conduce el calor" garantiza el funcionamiento estable a largo plazo del electrodo de tobera en entornos extremos.

Los electrodos con esqueleto también desempeñan un papel importante en los componentes de electrodos de alta temperatura de los equipos de energía nuclear. Durante la operación de un reactor nuclear, el ambiente interno no solo es extremadamente caliente, sino que también presenta alta presión y radiación, lo que impone exigentes exigencias a la estabilidad del material. En tales situaciones, el esqueleto de tungsteno actúa como el cuerpo estructural principal, capaz de resistir la fluencia y la corrosión a altas temperaturas a largo plazo y mantener la estabilidad dimensional del electrodo. Por su parte, la fase de cobre asegura la conductividad del electrodo a alta corriente, a la vez que conduce el calor del reactor al sistema de refrigeración de forma oportuna para prevenir riesgos de seguridad causados por la acumulación de calor. Además, dado que tanto el tungsteno como el cobre presentan una buena estabilidad a la radiación, los electrodos con esta estructura también pueden mantener un rendimiento estable en un entorno de radiación, evitando la degradación funcional causada por el envejecimiento del material.

En la aplicación de electrodos en hornos de arco eléctrico industriales, las ventajas de los electrodos con esqueleto son evidentes. Durante el funcionamiento del horno de arco eléctrico, el arco de alta temperatura generado entre el electrodo y la carga alcanza temperaturas extremadamente altas, por lo que el electrodo debe resistir frecuentes choques mecánicos y térmicos. En este caso, la alta resistencia del esqueleto de tungsteno evita que el electrodo se rompa por impacto, y su resistencia a altas temperaturas permite resistir la combustión directa del arco. La alta conductividad de la fase de cobre garantiza la generación estable del arco, disipando rápidamente el calor del arco y evitando la pérdida del extremo del electrodo por sobrecalentamiento. En comparación con otros tipos de electrodos, los electrodos con esqueleto presentan una mayor vida útil y un rendimiento de trabajo más estable en condiciones de alta frecuencia e intensidad.

En resumen, el electrodo con esqueleto logra un equilibrio perfecto entre propiedades mecánicas y funcionales gracias a su diseño estructural de "soporte de esqueleto de tungsteno-función de fase de cobre". Su rendimiento es particularmente excepcional en entornos extremos, como altas temperaturas y presiones, lo que lo convierte en un material clave indispensable en el sector industrial de alta gama.

4.5.3 Electrodo de distribución de gradiente

El electrodo de distribución de gradiente es un diseño estructural altamente específico para compuestos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de tungsteno y cobre. Su característica principal es la distribución continuamente variable de la relación tungsteno-cobre a lo largo de la sección transversal del electrodo. De un extremo al otro del electrodo, el contenido de tungsteno puede aumentar gradualmente mientras que el de cobre disminuye, o viceversa, lo que resulta en una microestructura con una transición de rendimiento suave. Este diseño rompe con la distribución uniforme de componentes en los materiales compuestos tradicionales. Al controlar cuidadosamente el gradiente de composición, las diferentes regiones del electrodo priorizan las ventajas de rendimiento del tungsteno o del cobre, mientras que el efecto amortiguador de la región de transición previene los problemas de tensión interfacial causados por cambios repentinos de rendimiento.

En términos de rendimiento, el electrodo de distribución de gradiente exhibe importantes características de "funcionalización regional". La zona con alto contenido de tungsteno ofrece una excelente resistencia a altas temperaturas y al desgaste gracias a su alto punto de fusión y alta resistencia, y puede mantener la estabilidad estructural en entornos con temperaturas extremadamente altas. Por otro lado, la zona con alto contenido de cobre se basa en la alta conductividad eléctrica y térmica del cobre para lograr una eficiente transmisión de corriente y disipación de calor. Más importante aún, la composición de la zona de transición intermedia cambia lentamente, de modo que ambas propiedades se conectan fluidamente en la unión. No se produce una caída abrupta de la conductividad eléctrica debido a un aumento repentino del contenido de tungsteno, ni una disminución drástica de la resistencia a altas temperaturas debido a un aumento repentino del contenido de cobre. Este cambio gradual en el rendimiento resuelve eficazmente el problema común de concentración de tensiones al conectar materiales heterogéneos y mejora considerablemente la fiabilidad del electrodo en condiciones de trabajo complejas.

El proceso de preparación de electrodos con distribución en gradiente es extremadamente complejo desde el punto de vista técnico y requiere un control preciso de la distribución de la composición. Los métodos de preparación más comunes incluyen la pulvimetalurgia en capas y la sinterización en gradiente. La pulvimetalurgia en capas consiste en colocar polvos mixtos con diferentes proporciones de tungsteno y cobre en capas, según el orden de gradiente diseñado, y lograr una transición continua de la composición mediante un prensado y sinterización únicos. La diferencia de composición de cada capa de polvo debe controlarse con precisión para garantizar la uniformidad de la zona de transición. El método de sinterización en gradiente dirige el tungsteno o el cobre para que se difunda direccionalmente dentro del material mediante la regulación del campo de temperatura o del campo atmosférico durante el proceso de sinterización, formando así un gradiente de composición natural. Independientemente del método utilizado, es necesario utilizar tecnología de simulación avanzada para prediseñar la curva de distribución de la composición y garantizar que la distribución real sea coherente con el diseño mediante un control preciso de los parámetros del proceso. Cualquier pequeña desviación puede provocar una alteración del rendimiento en la zona de transición.

Componentes estructurales térmicos en la industria aeroespacial. Por ejemplo, cuando una nave espacial reingresa a la atmósfera desde el espacio, la superficie de la cápsula de reentrada experimenta una intensa fricción con la atmósfera, lo que genera temperaturas extremadamente altas. Esto requiere que el material de la superficie de la cápsula posea una excelente resistencia a altas temperaturas y a la oxidación. Mientras tanto, los instrumentos de precisión dentro de la cápsula son extremadamente sensibles a la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperatura y requieren un sistema de disipación de calor eficiente para mantener una temperatura de funcionamiento adecuada. En este escenario, los electrodos distribuidos en gradiente sirven como un componente clave que conecta la superficie de la cápsula con el sistema interno de disipación de calor. El extremo exterior, que da a la cápsula, está diseñado con un alto contenido de tungsteno, lo que proporciona resistencia a altas temperaturas para soportar el intenso calor de reentrada, evitando la fusión u oxidación de la superficie. El extremo interior, que da a la cápsula, está construido con un alto contenido de cobre, aprovechando su excelente conductividad térmica para transferir rápidamente el calor absorbido por la superficie al disipador de calor interno, evitando la disipación de calor a los instrumentos en su interior. La zona de transición proporciona una transición suave en el rendimiento, disipando las tensiones significativas causadas por las diferencias de temperatura interna y externa y las diferencias de propiedades del material, evitando el agrietamiento o desprendimiento del electrodo durante ciclos térmicos repetidos.

Los electrodos de distribución en gradiente también desempeñan un papel fundamental en los componentes de la cámara de combustión de los motores de aeronaves de alta velocidad. El interior de la cámara de combustión está expuesto a altas temperaturas y presiones durante su funcionamiento. El flujo de aire a alta temperatura generado por la combustión del combustible crea un fuerte efecto abrasivo en las paredes de la cámara, lo que requiere que el lado expuesto a altas temperaturas posea una resistencia al calor y al desgaste extremadamente altas. Por otro lado, el exterior de la cámara de combustión debe estar conectado al sistema de refrigeración para disipar el calor rápidamente y evitar un sobrecalentamiento general, lo que a su vez requiere que el material exterior posea una buena conductividad térmica. El electrodo de distribución en gradiente, gracias al diseño racional del gradiente de relación tungsteno-cobre, presenta altas propiedades de tungsteno en el interior de la cámara de combustión para resistir el desgaste a alta temperatura, mientras que las altas propiedades de cobre en el exterior garantizan una disipación térmica eficiente.

Además, los electrodos con distribución de gradiente también presentan ventajas únicas en la disipación de calor de dispositivos semiconductores de alta potencia. Durante el funcionamiento de un dispositivo semiconductor, se genera una gran cantidad de calor en el núcleo del chip, lo que requiere que el electrodo tenga una conductividad térmica eficiente para disiparlo. La parte del electrodo conectada al circuito externo requiere una buena conductividad eléctrica para reducir las pérdidas de transmisión de señal. Al diseñar una distribución gradual del contenido de cobre desde el extremo de contacto del chip hasta el extremo de conexión del circuito, el electrodo puede cumplir simultáneamente con los requisitos de disipación de calor eficiente y baja conductividad eléctrica, a la vez que evita los problemas de disipación de calor insuficiente o baja conductividad eléctrica causados por las limitaciones de rendimiento de un solo material.

4.6 Clasificación de electrodos de tungsteno-cobre según su forma física macroscópica

La morfología física macroscópica se centra principalmente en el estado de la superficie, la densidad y el modo compuesto del electrodo, que se divide en tipo denso, tipo poroso y tipo de revestimiento compuesto para cumplir con diferentes requisitos funcionales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.6.1 Electrodo denso

Los electrodos densos son la categoría básica más utilizada de electrodos de tungsteno-cobre. Su característica principal es su porosidad interna extremadamente baja. Las partículas de tungsteno y las fases de cobre están estrechamente unidas para formar una microestructura continua y densa, lo que resulta en una superficie lisa y plana. Esta estructura no solo proporciona al electrodo un excelente rendimiento general, sino que también le permite un rendimiento estable y fiable en diversos entornos industriales, lo que lo convierte en un material fundamental en el campo de la fabricación de precisión.

La clave para lograr esta estructura densa reside en procesos de preparación avanzados, siendo la sinterización a alta presión y el prensado isostático en caliente los enfoques técnicos más utilizados. La sinterización a alta presión aplica alta presión continua al polvo mixto de tungsteno y cobre a alta temperatura, forzando a las partículas a contactar completamente, difundirse y fusionarse, eliminando los poros formados entre ellas. El prensado isostático en caliente va un paso más allá, aplicando presión uniforme en todas las direcciones a la pieza en bruto a través de un medio fluido a alta temperatura, compactando completamente los pequeños poros dentro del material y, en última instancia, formando una estructura densa casi libre de defectos. Los objetivos principales de ambos procesos son los mismos: a través del efecto sinérgico de la presión y la temperatura, se rompen las barreras físicas entre las partículas, logrando una estrecha unión entre las dos fases de tungsteno y cobre y sentando las bases estructurales para el alto rendimiento del electrodo.

La ventaja de rendimiento de los electrodos densos reside en su integridad estructural. En primer lugar, su baja porosidad garantiza que la fase de cobre forme una red conductora continua e ininterrumpida. La corriente no produce mutaciones de resistencia local debido a la obstrucción de los poros durante la transmisión, y el rendimiento conductor es estable y eficiente. Al mismo tiempo, su microestructura estrechamente integrada proporciona una trayectoria fluida para la conducción del calor, de modo que el calor generado durante el procesamiento o el trabajo se puede dispersar rápidamente, evitando la degradación del rendimiento causada por el sobrecalentamiento local. En segundo lugar, la estructura densa confiere al electrodo una mayor resistencia mecánica y a la deformación. Al someterse a presión mecánica o tensión térmica, no se agrieta ni rompe fácilmente y puede mantener una forma estable durante mucho tiempo, lo que prolonga su vida útil. Además, la superficie lisa y plana reduce las fluctuaciones de resistencia al entrar en contacto con la pieza de trabajo y también reduce la posibilidad de que se adhieran impurezas durante el procesamiento, lo que contribuye a mejorar la estabilidad del proceso.

En el campo de la electroerosión (EDM), las ventajas de los electrodos densos son particularmente evidentes. La electroerosión se basa en la descarga de alta frecuencia entre el electrodo y la pieza de trabajo para lograr la eliminación de material. La densidad estructural del electrodo afecta directamente la uniformidad de la distribución de la energía de descarga. Si existen poros en el interior del electrodo, puede producirse una concentración local de energía durante el proceso de descarga, lo que resulta en marcas de ablación irregulares en la superficie de la pieza, lo que afecta la precisión del procesamiento. La estructura uniforme del electrodo denso puede garantizar la liberación estable de la energía de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

descarga y mantener constante la rugosidad superficial de la pieza de trabajo. Es especialmente adecuado para escenarios con estrictos requisitos de precisión, como la fabricación de moldes. Por ejemplo, en el procesamiento de moldes de engranajes de precisión, los electrodos densos pueden replicar con precisión el perfil del diente del engranaje mediante un rendimiento de descarga estable, garantizar la precisión dimensional y la calidad superficial del molde, y ofrecer garantías fiables para la posterior producción en masa de engranajes.

En aplicaciones de soldadura por resistencia, los electrodos densos también desempeñan un papel fundamental. Durante el proceso de soldadura, el electrodo debe transmitir la corriente mediante un contacto estrecho con la pieza de trabajo, a la vez que soporta cierta presión. La baja porosidad del electrodo denso evita el "efecto vacío" en la transmisión de la corriente, es decir, la interrupción del recorrido de la corriente o el aumento repentino de la resistencia causado por los poros. Garantiza que la corriente fluya uniformemente por la zona de soldadura, de modo que el calor en el punto de soldadura se genere de forma estable y se garantice la consistencia de la formación de la pepita de soldadura. En la soldadura de engranajes de transmisión de automóviles, esta estabilidad es crucial: la resistencia de la soldadura del engranaje afecta directamente al rendimiento general de la transmisión. El electrodo denso puede garantizar la resistencia uniforme de cada punto de soldadura mediante una transmisión de corriente estable y una tolerancia a la presión, evitando el riesgo de fallos en el engranaje debido a defectos locales de soldadura.

En el campo del encapsulado microelectrónico, los electrodos densos también se utilizan ampliamente. Los dispositivos microelectrónicos exigen una precisión dimensional y una estabilidad de rendimiento extremadamente altas. La superficie lisa y la estructura uniforme de los electrodos densos garantizan un buen contacto con el chip o sustrato, reducen la resistencia de contacto y mejoran la eficiencia de transmisión de la señal. Además, su excelente conductividad térmica disipa rápidamente el calor generado por el chip durante su funcionamiento, evitando así la degradación del rendimiento del dispositivo debido a temperaturas excesivas. Por ejemplo, en el encapsulado de chips para teléfonos inteligentes, los electrodos densos de tungsteno-cobre actúan como un medio dual para la conducción eléctrica y la disipación de calor, garantizando la transmisión estable de señales eléctricas a la vez que controlan eficazmente la temperatura del chip, lo que facilita el funcionamiento de alto rendimiento del dispositivo.

4.6.2 Electrodo poroso

Los electrodos porosos son un tipo de electrodo de tungsteno-cobre con características estructurales especiales. Presentan una gran cantidad de poros, ya sean regulares o irregulares. Estos poros no son defectos del material, sino características estructurales que se forman activamente mediante el diseño del proceso. A diferencia de los electrodos densos que buscan una baja porosidad, la distribución y la proporción de poros son parámetros de diseño fundamentales. Mediante la regulación de parámetros como la presión, la temperatura y el tiempo de mantenimiento durante el proceso de sinterización, se puede controlar con precisión la morfología y la densidad de los poros, creando así un material especial con propiedades tanto funcionales como estructurales. Este diseño permite que el electrodo mantenga las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

propiedades básicas de los materiales compuestos de tungsteno-cobre, a la vez que obtiene ventajas únicas como ligereza y una alta superficie específica, adaptándose así a las necesidades de cada situación.

La clave del proceso de preparación de electrodos porosos reside en la regulación inversa del proceso de sinterización. Los procesos de densificación convencionales promueven la fusión de partículas mediante alta presión y la preservación del calor a largo plazo, mientras que la formación de estructuras porosas requiere reducir adecuadamente la presión de sinterización y acortar el tiempo de preservación del calor, de modo que el polvo de tungsteno y el polvo de cobre formen una estructura de esqueleto en un estado densificado incompleto, y los espacios entre las partículas se conserven como poros. Además, la formación de poros regulares puede facilitarse añadiendo agentes formadores de poros: se añaden sustancias volátiles o solubles al polvo mezclado. Durante el proceso de sinterización, estas sustancias se evaporan o se disuelven y eliminan posteriormente, dejando canales porosos con una forma predefinida. Independientemente del método, se requiere un control preciso de los parámetros del proceso para garantizar que la distribución de poros sea uniforme y coherente con las expectativas de diseño, evitando deficiencias de rendimiento causadas por la concentración local de poros.

La principal ventaja de la estructura porosa del electrodo reside en el equilibrio entre ligereza y eficiencia de disipación térmica. La presencia de un gran número de poros reduce significativamente la densidad total del material, lo que reduce considerablemente el peso en comparación con electrodos densos del mismo volumen, lo cual es crucial para entornos donde es necesario controlar la carga del dispositivo. Al mismo tiempo, la compleja red de canales formada por los poros aumenta considerablemente la superficie específica del electrodo. Al conducir el calor a través del material, la mayor superficie puede acelerar el intercambio térmico con el entorno y, combinada con la circulación de aire que se puede formar en los poros, mejora la eficiencia de disipación térmica. Esta combinación de ligereza y alta disipación térmica hace que los electrodos porosos sean indispensables en entornos como dispositivos móviles y componentes aeroespaciales sensibles al peso y con altos requisitos de disipación térmica.

En la aplicación de electrodos de conmutación para motores de drones, las ventajas de los electrodos porosos quedan plenamente demostradas. La resistencia de los drones está directamente relacionada con el peso del equipo. El diseño ligero es clave para mejorarla. Dado que el motor es un componente fundamental, la optimización del peso de sus electrodos es especialmente importante. El electrodo de cobre-tungsteno poroso reduce el peso gracias a su estructura porosa interna, a la vez que garantiza una transmisión de corriente estable durante la conmutación gracias a la alta conductividad de la fase de cobre. Más importante aún, los motores de drones generan mucho calor al funcionar a altas velocidades. Si este calor no se disipa a tiempo, puede provocar el sobrecalentamiento del motor y su fallo. La elevada superficie específica de la estructura porosa permite disipar rápidamente el calor en el aire. En combinación con el diseño de disipación de calor de la carcasa del motor, forma un sistema de disipación de calor eficiente que garantiza que el motor mantenga un rendimiento estable durante vuelos de larga duración. En el campo del mecanizado electrolítico, la estructura porosa de los electrodos porosos desempeña un papel fundamental en el almacenamiento y la transmisión del medio. El mecanizado electrolítico logra la disolución electroquímica de los materiales a través del electrolito entre el electrodo y la pieza de trabajo. Los electrodos tradicionales requieren tuberías externas para el transporte continuo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del electrolito, mientras que los poros internos de los electrodos porosos pueden servir directamente como almacenamiento y canales de electrolito, liberándolo lentamente durante el proceso de mecanizado para garantizar que el área de mecanizado esté siempre húmeda y lograr una refrigeración y lubricación continuas. Este diseño simplifica el sistema de tuberías del equipo de mecanizado y es especialmente adecuado para el mecanizado electrolítico de superficies complejas o cavidades profundas: cuando el electrodo penetra en un espacio estrecho, el electrolito liberado de los poros puede actuar con precisión sobre el área de mecanizado, evitando el problema de la distribución desigual del electrolito causada por el transporte externo y mejorando la precisión del mecanizado y la calidad de la superficie.

Entre los componentes de electrodos de las celdas de combustible, los electrodos porosos de tungsteno-cobre también presentan un valor especial. Las celdas de combustible necesitan usar electrodos para lograr reacciones catalíticas entre el combustible y el oxidante, mientras conducen la corriente generada. Esto requiere que los electrodos tengan buena conductividad eléctrica y suficiente área de contacto para la reacción. La estructura porosa del electrodo poroso proporciona espacio para la difusión y reacción del gas, y la alta conductividad del material compuesto de tungsteno-cobre asegura la rápida transmisión de electrones. Al optimizar el tamaño y la distribución de los poros, se pueden equilibrar la eficiencia de la reacción y la conductividad, permitiendo que la celda de combustible mantenga un funcionamiento estable a la vez que genera alta potencia. Además, la estructura porosa tiene buena tenacidad, lo que puede amortiguar los cambios de volumen durante el funcionamiento de la batería y prolongar la vida útil del electrodo.

Cabe destacar que el diseño de electrodos porosos requiere ajustar los parámetros de los poros según las aplicaciones específicas. Unos poros excesivamente grandes pueden reducir la resistencia estructural, mientras que unos poros demasiado pequeños pueden afectar la disipación térmica o la eficiencia de la transmisión dieléctrica. Por lo tanto, la morfología, la uniformidad de la distribución y la proporción de los poros deben verificarse repetidamente mediante simulación y experimentación. Si bien este diseño estructural personalizado dificulta la preparación, también permite que los electrodos porosos satisfagan necesidades especiales que los electrodos convencionales no pueden satisfacer, lo que los convierte en una de las categorías más versátiles de la familia de electrodos de tungsteno-cobre.

4.6.3 Electrodos de revestimiento compuesto

Los electrodos de recubrimiento compuesto son una categoría especial de electrodos de tungsteno-cobre que alcanzan un rendimiento excepcional mediante la superposición funcional. Su concepto de diseño principal consiste en combinar uno o más recubrimientos funcionales sobre la superficie de un sustrato de tungsteno-cobre, aprovechando el rendimiento sinérgico del recubrimiento y el sustrato para compensar las deficiencias de un solo material. La elección del material de recubrimiento es extremadamente flexible, pudiendo seleccionarse diferentes materiales como plata, níquel, diamante y cerámica según los requisitos de la aplicación. Mediante galvanoplastia, deposición de vapor, pulverización térmica y otros procesos, se logra una estrecha unión con el sustrato, formando finalmente una estructura compuesta de "sustrato de tungsteno-cobre que proporciona soporte estructural + recubrimiento superficial que optimiza funciones específicas". Este diseño no solo conserva las ventajas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

principales de los materiales de tungsteno-cobre, como la alta resistencia y la alta conductividad eléctrica y térmica, sino que también otorga al electrodo una nueva dimensión de rendimiento gracias al recubrimiento, ampliando considerablemente sus aplicaciones .

La clave para preparar electrodos de recubrimiento compuestos reside en la calidad de la unión entre el recubrimiento y el sustrato, y los diferentes procesos tienen diferentes enfoques. El proceso de galvanoplastia es adecuado para la preparación de recubrimientos metálicos. Mediante electrólisis, los iones metálicos se depositan uniformemente sobre la superficie del sustrato de tungsteno-cobre para formar un recubrimiento denso. Sus ventajas son el control del espesor del recubrimiento y la fuerte adhesión al sustrato. Es especialmente adecuado para la preparación de recubrimientos metálicos conductores como plata y níquel. El método de deposición de vapor vaporiza el material de recubrimiento en un entorno de vacío y lo deposita formando una película sobre la superficie del sustrato. Permite preparar capas delgadas con precisión nanométrica. Es adecuado para recubrimientos no metálicos como diamante y cerámica, y permite controlar con precisión la composición y la estructura del recubrimiento. El proceso de pulverización térmica calienta el material de recubrimiento hasta un estado fundido o semifundido y lo pulveriza sobre la superficie del sustrato mediante un flujo de aire a alta velocidad para formar un recubrimiento. Es adecuado para la preparación de recubrimientos gruesos o para cubrir grandes áreas, y se utiliza ampliamente en recubrimientos resistentes al desgaste y a altas temperaturas. Independientemente del proceso utilizado, la superficie del sustrato debe pretratarse (como pulido, limpieza y activación) para garantizar que no haya impurezas ni capas de óxido entre el recubrimiento y el sustrato. De lo contrario, el recubrimiento podría desprenderse o su rendimiento podría verse afectado.

La ventaja de rendimiento de los electrodos con recubrimiento compuesto reside en sus mejoras funcionales específicas. La matriz de tungsteno-cobre, como cuerpo de soporte, proporciona resistencia mecánica, conductividad eléctrica y térmica estables, y estabilidad estructural, lo que garantiza que el electrodo mantenga su forma y rendimiento básico durante el uso. El recubrimiento de la superficie optimiza el rendimiento para necesidades específicas, como la reducción de la resistencia de contacto, el aumento de la resistencia al desgaste y la mejora de la resistencia a la oxidación, lo que permite que el electrodo supere el rendimiento de los materiales de tungsteno-cobre puros en situaciones específicas. Este modelo de "garantía básica + mejora funcional" permite que el electrodo se adapte a los requisitos integrales de condiciones de trabajo complejas, a la vez que alcanza el máximo nivel en indicadores clave de rendimiento.

En aplicaciones de conectores para equipos de comunicación de alta frecuencia, los electrodos con recubrimiento compuesto plateado ofrecen un rendimiento excepcional. La transmisión de señales de alta frecuencia es extremadamente sensible a la resistencia de contacto, e incluso pequeñas fluctuaciones de resistencia pueden causar atenuación o distorsión de la señal. El sustrato de tungsteno-cobre presenta una buena conductividad, y el recubrimiento de plata superficial puede reducir aún más la resistencia de contacto, ya que la plata es uno de los metales más conductores, su superficie no se oxida fácilmente y puede mantener características de baja resistencia durante mucho tiempo. Cuando el electrodo se utiliza como conector, la capa de recubrimiento de plata puede garantizar una transmisión eficiente de la señal en la interfaz de contacto, reducir la reflexión y la pérdida, y es especialmente adecuado para escenarios

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

con estrictos requisitos de calidad de señal, como las comunicaciones por satélite y las estaciones base 5G. Al mismo tiempo, la alta resistencia del sustrato de tungsteno-cobre garantiza que el conector no se deforme durante el proceso de conexión y desconexión, evitando un contacto deficiente debido a una estructura suelta.

Los electrodos compuestos con recubrimientos de diamante en la superficie presentan un valor único en el procesamiento de materiales de alta dureza. En la electroerosión de materiales como acero para moldes y carburo cementado, Los electrodos deben soportar frecuentemente descargas de alta temperatura y fricción mecánica. Tras un uso prolongado, la superficie de los electrodos de tungsteno-cobre puros es propensa al desgaste o a la ablación, lo que reduce la precisión del procesamiento. Gracias a su altísima dureza y resistencia al desgaste, el recubrimiento de diamante forma una barrera protectora sobre la superficie del electrodo para resistir el desgaste mecánico y la erosión por alta temperatura durante el procesamiento, prolongando significativamente su vida útil. Al mismo tiempo, la excelente conductividad térmica del diamante ayuda al electrodo a disipar rápidamente el calor y a evitar fallos del recubrimiento causados por sobrecalentamiento local. Esta doble ventaja de "resistencia al desgaste + disipación de calor" hace que este tipo de electrodo sea muy popular en campos como el procesamiento de moldes de precisión y la fabricación de álabes de motores de aviación.

En entornos de antioxidación a alta temperatura, los electrodos compuestos con recubrimientos de níquel o cerámicos desempeñan un papel fundamental. Por ejemplo, en los electrodos de hornos de arco de la industria metalúrgica, estos deben trabajar continuamente en un entorno oxidante de alta temperatura. Se forma fácilmente una capa de óxido en la superficie de los materiales de tungsteno-cobre puros, lo que reduce su conductividad eléctrica. Los recubrimientos de níquel pueden formar una película de óxido densa a altas temperaturas, lo que impide que el oxígeno corra aún más el sustrato y protege la red conductora del electrodo de la destrucción. Los recubrimientos cerámicos (como la alúmina y el zirconio) presentan mayor resistencia a altas temperaturas y a la oxidación, y son adecuados para condiciones de trabajo a altas temperaturas. Evitan el contacto del sustrato con medios corrosivos mediante el aislamiento físico. Este tipo de electrodo compuesto no solo mantiene la alta conductividad eléctrica y térmica del tungsteno-cobre, sino que también posee la resistencia a altas temperaturas y a la oxidación del recubrimiento, ampliando considerablemente las posibilidades de aplicación de los materiales de tungsteno-cobre en industrias de alta temperatura .

Además, la tecnología de recubrimiento compuesto también permite una integración multifuncional. Por ejemplo, en electrodos de precisión de dispositivos médicos, se pueden utilizar recubrimientos compuestos biocompatibles (como los de aleación de titanio) para garantizar que los electrodos de tungsteno-cobre tengan una excelente conductividad eléctrica, evitando reacciones adversas al contacto con tejido humano, cumpliendo así con los requisitos especiales de los instrumentos quirúrgicos mínimamente invasivos. Esta personalización funcional, lograda mediante recubrimientos, permite que los electrodos de recubrimiento compuesto satisfagan diversas necesidades no convencionales, lo que los convierte en la categoría con mayor potencial innovador dentro de la familia de electrodos de tungsteno-cobre. Cabe destacar que el espesor y la uniformidad del recubrimiento tienen un impacto significativo en el rendimiento del electrodo. Un recubrimiento demasiado grueso puede causar una tensión interna

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

excesiva, provocando grietas o desprendimiento; un recubrimiento demasiado delgado no proporcionará una protección eficaz ni mejorará su funcionalidad. Por lo tanto, los parámetros del proceso de recubrimiento deben controlarse con precisión en función del material de recubrimiento y las características del sustrato, y se requieren simulaciones tempranas y pruebas posteriores para garantizar que el rendimiento del recubrimiento cumpla con los estándares. Si bien este requisito de fabricación más exigente incrementa los costos de producción, también permite que los electrodos de recubrimiento compuesto aporten un valor insustituible en el campo de la fabricación de alta gama.



Electrodo de cobre y tungsteno CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

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

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

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

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

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

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

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

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

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 5: Tecnología de preparación del electrodo de tungsteno-cobre

5.1 Proceso de infiltración

El proceso de infiltración es la tecnología central en la preparación de electrodos de tungsteno-cobre. Al infiltrar cobre líquido en un esqueleto poroso de tungsteno, se prepara un material compuesto con excelente rendimiento. Este proceso incluye dos etapas principales: la prefabricación del esqueleto de tungsteno y la infiltración de cobre, con el objetivo de lograr baja porosidad y distribución uniforme de la fase. El proceso de infiltración se basa en la metalurgia de polvos, combinada con un entorno de vacío o atmósfera inerte para garantizar la alta densidad y estabilidad del material. Durante el proceso de preparación, la formación, la sinterización y el control de poros del polvo de tungsteno son pasos clave, que afectan directamente la resistencia mecánica, la conductividad y la durabilidad del electrodo final. La optimización de los parámetros del proceso, como la temperatura, la presión y el tiempo, determina significativamente la microestructura y el rendimiento del electrodo.

5.1.1 Prefabricación de esqueleto de tungsteno

La prefabricación del esqueleto de tungsteno es el primer paso del proceso de infiltración, cuyo objetivo es crear una estructura porosa de tungsteno que sirva de base para la posterior infiltración de cobre. Durante esta etapa, se construye una estructura de esqueleto con cierta resistencia mediante el moldeo, la sinterización y el control de la porosidad del polvo de tungsteno. La calidad del esqueleto de tungsteno afecta directamente el efecto de relleno de cobre y el rendimiento del electrodo final. El proceso de preparación requiere un control preciso de la pureza de la materia prima, el tamaño de las partículas y los parámetros del proceso. La porosidad y la uniformidad de la microestructura son clave para una prefabricación exitosa. El prensado isostático en caliente se utiliza a menudo para optimizar la densidad y la estabilidad del esqueleto. La prefabricación del esqueleto de tungsteno sienta las bases del proceso de infiltración, garantizando que el electrodo tenga buenas propiedades mecánicas durante el procesamiento posterior.

5.1.1.1 Moldeo de polvo de tungsteno

El moldeo de polvo de tungsteno es un paso fundamental en la prefabricación de esqueletos de tungsteno. Al prensar el polvo de tungsteno para darle una forma específica, se prepara el cuerpo para su posterior sinterización e infiltración. Este proceso suele utilizar técnicas de prensado en frío o isostático, colocando polvo de tungsteno de alta pureza en un molde y formando mecánicamente un cuerpo verde preliminar. Durante el proceso de moldeo, el tamaño de partícula y la morfología del polvo de tungsteno deben ser consistentes. Los polvos esféricos o casi esféricos ayudan a mejorar la eficiencia de llenado y la uniformidad del cuerpo verde. La uniformidad de la mezcla se logra mediante molinos de bolas o mezcladores en V, lo que garantiza una distribución del polvo sin estratificación significativa. La presión de moldeo y el diseño del molde afectan directamente la densidad y la distribución de la porosidad del cuerpo verde. Una presión adecuada puede reducir los defectos internos. El cuerpo verde formado debe poseer cierta resistencia mecánica para soportar la sinterización posterior a alta temperatura. Los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tratamientos superficiales, como el preprensado, pueden mejorar aún más la estabilidad del cuerpo verde. Es necesario controlar la humedad durante el proceso para evitar que el polvo la absorba, lo cual puede reducir la calidad del conformado. El conformado del polvo de tungsteno es el punto de partida de todo el proceso de preparación, y su calidad determina el correcto desarrollo de los pasos posteriores.

5.1.1.2 Sinterización del esqueleto de tungsteno

La sinterización del esqueleto de tungsteno es un paso clave para transformar un cuerpo verde de polvo de tungsteno en un esqueleto poroso. El tratamiento a alta temperatura mejora la resistencia y la estabilidad del cuerpo verde. Este proceso se realiza generalmente al vacío o en atmósfera de hidrógeno. La temperatura de sinterización se adapta a las características del polvo de tungsteno, lo que promueve el crecimiento del cuello y la unión entre partículas. Inicialmente, las partículas de polvo de tungsteno forman conexiones iniciales mediante difusión y recristalización. A medida que aumenta la temperatura, la microestructura se densifica gradualmente y comienza a formarse una estructura porosa. El tiempo de sinterización y la velocidad de calentamiento deben controlarse con precisión para evitar un calentamiento excesivo que pueda causar grietas o sobrecalentamiento. El proceso de sinterización también implica el control de la atmósfera. Un entorno de hidrógeno reductor elimina la capa de óxido superficial y mejora la unión entre partículas. El prensado isostático en caliente (HIP) puede optimizar aún más la sinterización, mejorando la uniformidad y la resistencia del esqueleto mediante presión omnidireccional. El esqueleto de tungsteno sinterizado debe poseer suficiente resistencia mecánica y una porosidad adecuada para proporcionar canales para la infiltración de cobre. El ajuste de los parámetros del proceso influye en la microestructura del esqueleto. Las iniciativas futuras, como la simulación dinámica y las técnicas de sinterización multietapa, mejorarán la eficiencia de la sinterización y la calidad del esqueleto para satisfacer las demandas de los electrodos de alta precisión.

5.1.1.3 Control de poros del esqueleto de tungsteno

La porosidad del esqueleto de tungsteno es un paso crucial para asegurar una infiltración exitosa. El objetivo es ajustar la porosidad del esqueleto y la distribución del tamaño de poro para crear las condiciones óptimas para la infiltración de cobre. Este proceso se logra mediante la presión de moldeo, las condiciones de sinterización y el uso de aditivos. La porosidad impacta directamente la eficiencia del llenado de cobre y el rendimiento del electrodo final. Durante la etapa de moldeo, el ajuste de la presión puede alterar la densidad inicial del cuerpo verde. Presiones más bajas retienen más poros, mientras que presiones más altas reducen su número. Durante la sinterización, el control de la temperatura y el tiempo influye en el cierre y la conexión de los poros. Unos parámetros de sinterización adecuados mantienen una estructura de poros abiertos. Aditivos como aglutinantes orgánicos o formadores de poros pueden contribuir al control de poros. Tras la sinterización, los aditivos se eliminan mediante pirólisis para formar una red porosa uniforme. El análisis microestructural muestra que la distribución uniforme del tamaño de poro es fundamental para el control de poros. Unos poros excesivamente grandes o irregulares pueden provocar una penetración insuficiente del cobre. El proceso de prensado isostático en caliente optimiza la estructura porosa mediante presión omnidireccional, reduciendo la proporción de poros cerrados y mejorando la eficiencia de penetración. El control de poros también debe considerar la posterior

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

humectabilidad del cobre. El tratamiento superficial puede mejorar la unión interfacial entre el esqueleto de tungsteno y el cobre líquido.

5.1.2 Control de infiltración

El control de infiltración es la etapa decisiva del proceso de infiltración, cuyo objetivo es producir electrodos de tungsteno-cobre de alto rendimiento mediante la gestión precisa del proceso de infiltración de cobre. Esta etapa incluye tres pasos clave: preparación del material de cobre, control de la temperatura de infiltración y control del tiempo de infiltración, lo que garantiza que el cobre líquido llene completamente los poros del esqueleto de tungsteno para formar una estructura compuesta uniforme. El control de infiltración afecta directamente la velocidad de llenado de poros, la resistencia de la unión interfacial y la densidad del electrodo final. La baja porosidad y la distribución uniforme de fases en la microestructura son la base del aseguramiento de la calidad. Un entorno de vacío o atmósfera inerte optimiza aún más el efecto de infiltración, y el prensado isostático en caliente puede ayudar a mejorar la estabilidad del material. La optimización del control de infiltración proporciona un soporte de rendimiento confiable para la aplicación de electrodos en el mecanizado por electrochispa, la soldadura y el empaquetado microelectrónico.

5.1.2.1 Preparación del material de cobre

La preparación del material de cobre es un paso fundamental en el control de la infiltración, con el objetivo de proporcionar materias primas de cobre de alta calidad y establecer las condiciones para la infiltración de cobre líquido. Este proceso generalmente implica la selección, purificación y pretratamiento del polvo o los bloques de cobre para garantizar una buena fluidez y humectabilidad a altas temperaturas. La pureza del material de cobre es un factor clave. Se selecciona cobre electrolítico o cobre atomizado de alta pureza para reducir el contenido de impurezas como oxígeno y azufre, evitando así la formación de poros o defectos durante el proceso de infiltración. El material de cobre puede presentarse en polvo o en grumos, según los requisitos del proceso. El polvo facilita una distribución uniforme, mientras que los grumos son adecuados para la infiltración a gran escala. El tamaño de partícula o de bloque debe coincidir con la porosidad del esqueleto de tungsteno. El pretratamiento incluye el secado y la limpieza de la superficie. El material de cobre se seca al vacío o en un entorno de gas inerte para eliminar la humedad superficial y las capas de óxido, mejorando así la unión interfacial con la estructura de tungsteno. Se utiliza agitación mecánica o molienda de bolas para lograr una mezcla uniforme, asegurando una distribución uniforme del material de cobre durante la infiltración. La preparación del material de cobre también requiere considerar su punto de fusión. Un precalentamiento adecuado puede mejorar la eficiencia de la infiltración. Durante el proceso de preparación, se implementa un control ambiental para prevenir la oxidación y garantizar la calidad del material de cobre.

5.1.2.2 Control de la temperatura de infiltración

Controlar la temperatura de infiltración es clave para garantizar que el cobre penetre eficazmente en el esqueleto de tungsteno en estado líquido, evitando daños materiales causados por calor excesivo. Este

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

proceso se realiza típicamente en un horno de vacío o en atmósfera inerte. La temperatura se fija por encima del punto de fusión del cobre para alcanzar la fase líquida, permitiendo que el cobre se humedezca completamente y llene los poros. Un control preciso de la temperatura es crucial. Una temperatura demasiado baja puede impedir la fusión completa del cobre, mientras que una temperatura demasiado alta puede causar fusión localizada del esqueleto de tungsteno o crecimiento de grano, afectando la microestructura. La velocidad de calentamiento debe ajustarse gradualmente para evitar el agrietamiento causado por la tensión térmica concentrada.

El control de temperatura también implica la gestión de la atmósfera. Un entorno de vacío reduce las reacciones de oxidación, y gases inertes como el argón protegen aún más el material. El prensado isostático en caliente puede contribuir al control de la temperatura, mejorando la penetración del cobre y la eficiencia del llenado mediante presión omnidireccional. La estabilidad de la temperatura de infiltración afecta directamente la calidad de la unión interfacial. Las fluctuaciones excesivas de temperatura pueden provocar un desbordamiento del cobre o una distribución desigual. La distribución de la temperatura dentro del horno debe supervisarse durante el proceso para garantizar la uniformidad en todas las piezas. En el futuro, la introducción de sistemas inteligentes de control de temperatura o tecnología de calentamiento multietapa optimizará aún más el control de la temperatura de infiltración, mejorando la densidad de los electrodos y la uniformidad del rendimiento.

5.1.2.3 Control del tiempo de infiltración

El tiempo de infiltración es un parámetro clave en el control de la infiltración, ya que garantiza que el cobre líquido penetre completamente en el esqueleto de tungsteno y forme una estructura compuesta estable. Este proceso está determinado por la porosidad del esqueleto de tungsteno, la cantidad de cobre y la temperatura. Un tiempo demasiado corto puede provocar un llenado incompleto, mientras que un tiempo demasiado largo puede causar un flujo excesivo de cobre o la deformación del esqueleto. Durante la fase inicial de infiltración, el cobre necesita tiempo suficiente para humedecer la superficie del tungsteno y penetrar en los poros profundos. Posteriormente, el control del tiempo se centra en el proceso de solidificación para evitar el desbordamiento del cobre y la formación de poros. El control del tiempo también debe coordinarse con la temperatura y la presión. El prensado isostático en caliente (HIP) puede acortar el tiempo de infiltración y acelerar el flujo de cobre mediante presión omnidireccional. En el proceso, el tiempo de infiltración se establece típicamente en etapas: una etapa inicial para asegurar la infiltración, una etapa de estabilización para promover la unión y una etapa de enfriamiento para solidificar la estructura. El análisis microestructural muestra que un tiempo de infiltración adecuado puede reducir los poros vacíos y mejorar la unión interfacial. La estabilidad ambiental y el rendimiento del equipo influyen directamente en la eficacia del control del tiempo. En el futuro, se utilizarán tecnologías de monitorización en tiempo real o ajuste dinámico para optimizar el tiempo de infiltración y mejorar la uniformidad y durabilidad de los electrodos.

5.2 Tecnología de posprocesamiento

El posprocesamiento es la etapa final en la preparación de electrodos de tungsteno-cobre. Su objetivo es

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimizar la geometría, la calidad superficial y el rendimiento funcional del electrodo mediante corte, rectificado, tratamiento superficial y control de la precisión dimensional. Esta etapa se realiza después del proceso de infiltración para garantizar que el electrodo cumpla con los requisitos de la aplicación específica. El posprocesamiento de los electrodos de tungsteno-cobre aprovecha la alta dureza del tungsteno y la ductilidad del cobre para ajustar la microestructura y mejorar la durabilidad mediante técnicas de mecanizado y modificación superficial. El control preciso de los parámetros del proceso es fundamental, ya que abarca la selección de herramientas, el entorno de procesamiento y la inspección de calidad, lo que afecta directamente al rendimiento del electrodo en la electroerosión, la soldadura o el encapsulado microelectrónico.

5.2.1 Corte

El corte es el paso inicial del post-mecanizado, que consiste en eliminar el exceso de material para dar forma al electrodo de tungsteno-cobre. Este proceso generalmente implica torneado o fresado, utilizando herramientas de carburo o diamante para eliminar la pieza bruta infiltrada. La alta dureza del tungsteno requiere herramientas con alta resistencia al desgaste, mientras que la ductilidad del cobre requiere velocidades de corte y avances controlados para evitar adherencias o desgarros. El corte es adecuado para formas de electrodos complejas, como varillas o bloques. Se debe garantizar el uso de refrigerante durante el proceso para minimizar la acumulación de calor y el daño superficial. El proceso de corte implica varios pasos, con desbaste para eliminar el exceso de material y acabado para lograr la precisión del contorno, acercándose gradualmente a las dimensiones de diseño. La baja porosidad en la microestructura facilita el corte uniforme del material, y los electrodos optimizados por el proceso de prensado isostático en caliente presentan una buena estabilidad mecánica. La rugosidad de la superficie debe inspeccionarse después del corte para asegurar un procesamiento suave en los pasos posteriores. El control ambiental, como el control de polvo, puede prevenir la contaminación por polvo. Los avances futuros en máquinas herramienta CNC o corte asistido por láser podrían mejorar la eficiencia del procesamiento y la precisión de formas complejas, satisfaciendo las demandas de electrodos de alta precisión.

5.2.2 Molienda

El rectificado es un delicado paso de posprocesamiento que utiliza herramientas abrasivas para eliminar los residuos de viruta y mejorar el acabado superficial y la precisión geométrica de los electrodos de tungsteno-cobre. Este proceso suele utilizar muelas de diamante o herramientas de carburo de silicio para rectificar con precisión la alta dureza del tungsteno. La ductilidad del cobre requiere lubricación para evitar un desgaste excesivo. El rectificado es adecuado para mejorar la calidad de la superficie de contacto del electrodo, especialmente en aplicaciones como el mecanizado por electrochispa (EDM) o el encapsulado microelectrónico, donde se requiere una alta planitud. La distribución uniforme de fases en la microestructura permite obtener resultados de rectificado estables. El proceso de rectificado consta de dos etapas: rectificado basto para eliminar las marcas de viruta y rectificado fino para lograr un acabado de espejo. La presión y la velocidad del rectificado deben ajustarse durante el proceso para evitar el agrietamiento térmico o las quemaduras superficiales. Se utiliza refrigerante para reducir las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperaturas y proteger las propiedades del material. Los electrodos optimizados para el prensado isostático en caliente presentan una excelente resistencia al desgaste. Los defectos superficiales, como microfisuras o picaduras, se inspeccionan después del rectificado para garantizar que la calidad cumpla con los estándares.

5.2.3 Tratamiento de superficies

El tratamiento superficial es un paso de optimización posterior al proceso que mejora las propiedades superficiales de los electrodos de tungsteno-cobre, como la resistencia a la corrosión, la oxidación y la adhesión, mediante métodos químicos o físicos. Este proceso incluye técnicas de pulido, enchapado o recubrimiento para modificar la alta dureza del tungsteno y la actividad química del cobre. El pulido elimina los defectos microscópicos superficiales, el niquelado o el oro mejoran la resistencia a la intemperie, y recubrimientos como el nitruro de titanio mejoran la resistencia al desgaste. La baja porosidad de la microestructura facilita un tratamiento superficial uniforme.

El proceso de tratamiento superficial debe adaptarse a cada aplicación. En el caso de electrodos de electroerosión, puede ser preferible el pulido para mejorar la estabilidad de la descarga, mientras que en el caso de electrodos de soldadura, puede ser necesario un recubrimiento para reducir la adhesión de la escoria. Es necesario controlar la temperatura y el tiempo para evitar afectar la estructura interna. Los procesos optimizados de prensado isostático en caliente (HIP) mejoran la adhesión superficial del electrodo. Los controles ambientales, como una atmósfera inerte, pueden reducir la oxidación. La adhesión y la durabilidad de la superficie deben comprobarse después del tratamiento.

5.2.4 Control de precisión dimensional

El control de la precisión dimensional es el paso final del posprocesamiento, que garantiza que el electrodo de tungsteno-cobre cumpla con las especificaciones de diseño mediante medición y ajuste. Este proceso utiliza máquinas de medición por coordenadas o equipos de inspección óptica para verificar la longitud, el ancho y las tolerancias geométricas del electrodo, ajustándolo para tener en cuenta la alta dureza del tungsteno y la ductilidad del cobre. Tras el corte y el rectificado, el electrodo se somete a un acabado, controlando las desviaciones dimensionales a nivel micrométrico y asegurando la uniformidad de la microestructura para facilitar un mecanizado de alta precisión.

El control de la precisión dimensional implica múltiples inspecciones y correcciones. Tras detectar desviaciones en las pruebas iniciales, estas se corrigen mediante rectificado fino o corte local. Los electrodos optimizados para el prensado isostático en caliente presentan una excelente estabilidad dimensional. Es necesario considerar factores ambientales como las fluctuaciones de temperatura, ya que afectan la expansión térmica del material, lo que requiere un funcionamiento a temperatura constante. Los datos de inspección se registran para garantizar la consistencia del lote. En el futuro, los sistemas de inspección inteligentes o la tecnología de escaneo 3D permitirán un control de precisión en tiempo real para satisfacer las demandas de electrodos de alta precisión o componentes estructurales complejos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 6: Escenarios de aplicación de electrodos de tungsteno-cobre

Los electrodos de tungsteno-cobre se utilizan ampliamente en el mecanizado por electroerosión (EDM) gracias a su excelente conductividad eléctrica, resistencia a altas temperaturas, resistencia a la erosión por arco eléctrico y buena maquinabilidad. En la fabricación de moldes de precisión, se emplean para formar cavidades complejas y estructuras finas gracias a su baja pérdida y alta precisión de mecanizado, lo que los hace especialmente adecuados para el mecanizado de moldes de carburo. En materiales difíciles de mecanizar, como las aleaciones de titanio y las aleaciones de alta temperatura en la industria aeroespacial, pueden soportar las altas temperaturas generadas por la descarga de alta frecuencia, garantizando la calidad superficial y la precisión dimensional de las piezas de precisión.

Los electrodos de tungsteno-cobre también desempeñan un papel fundamental en la soldadura, el corte y la conmutación eléctrica. En la soldadura por resistencia, reducen el desgaste de los electrodos y garantizan una resistencia de soldadura estable, lo que los hace adecuados para industrias como la fabricación de automóviles y la producción de electrodomésticos. En el corte por plasma, resisten la erosión a alta temperatura, lo que mejora la eficiencia y la calidad del corte. Además, como componentes de contacto en interruptores automáticos de alta tensión, relés y otros equipos, su resistencia a la erosión por arco y a la soldadura por fusión garantiza el funcionamiento seguro y estable de los sistemas de potencia y los equipos de control eléctrico.

Los electrodos de tungsteno-cobre también tienen importantes aplicaciones en defensa, aeroespacial y campos especializados. En los sistemas de guiado de misiles, su estabilidad garantiza un funcionamiento adecuado en entornos extremos. En los sistemas de energía de naves espaciales, resisten las duras condiciones del espacio, garantizando una transmisión de energía eficiente y segura. En equipos de pruebas nucleares y dispositivos médicos, su resistencia a la radiación, conductividad eléctrica y biocompatibilidad contribuyen a mejorar la precisión de los datos de prueba y la seguridad de los procesos de tratamiento, respectivamente. Con los avances tecnológicos, sus posibles aplicaciones seguirán expandiéndose.

6.1 Aplicación de electrodos de cobre y tungsteno en la electroerosión

Los electrodos de tungsteno-cobre en el mecanizado por descarga eléctrica (EDM) son una de sus aplicaciones clave. Gracias a las propiedades únicas de sus materiales, esta tecnología se utiliza ampliamente en la fabricación de precisión. El mecanizado por electrochispa (EDM) elimina material mediante descarga de arco, y los electrodos de tungsteno-cobre son herramientas ideales gracias al alto punto de fusión y dureza del tungsteno, combinados con la alta conductividad del cobre. Procesos de fabricación como la pulvimetalurgia o la infiltración al vacío garantizan una baja porosidad y una distribución uniforme de la fase en los electrodos, mientras que el prensado isostático en caliente optimiza aún más su microestructura, mejorando la durabilidad y la estabilidad. Las ventajas de los electrodos de tungsteno-cobre en el mecanizado de moldes y matrices, el mecanizado de materiales difíciles de mecanizar y la EDM demuestran su papel crucial en la fabricación de piezas complejas y de alta precisión.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1.1 Aplicación en el procesamiento de moldes

Los electrodos de tungsteno-cobre en el procesamiento de moldes demuestran su importancia en la fabricación de alta precisión, especialmente en el mecanizado por electroerosión de moldes complejos. La fabricación de moldes requiere una geometría precisa y superficies lisas, y los electrodos de tungsteno-cobre cumplen este requisito gracias a su alta dureza y resistencia a la erosión por arco. Durante la fabricación, los electrodos suelen utilizar un contenido de tungsteno de medio a alto (como WCu 70/30 o WCu 80/20). La pulvimetalurgia crea una microestructura densa, y el prensado isostático en caliente optimiza su resistencia a la compresión y la estabilidad superficial. La baja porosidad del electrodo garantiza un rendimiento de descarga estable, mientras que la alta conductividad del cobre facilita una transferencia de corriente eficiente, reduciendo el tiempo de procesamiento.

En el procesamiento de moldes, los electrodos de cobre-tungsteno son especialmente adecuados para el procesamiento fino de moldes de estampación, moldes de plástico y moldes de forja. Su resistencia al desgaste le permite mantener la integridad de su forma durante descargas repetidas y reducir las pérdidas. La distribución uniforme de la fase en la microestructura facilita la formación de contornos complejos, como nervaduras profundas o pequeños orificios, y la precisión de procesamiento puede alcanzar el nivel micrométrico. El tratamiento superficial, como el pulido, mejora aún más la calidad de contacto del electrodo y el acabado superficial del molde. En producción, el electrodo puede procesar acero de alta dureza o acero aleado para satisfacer las necesidades de fabricación de piezas de automoción y moldes de componentes electrónicos. También se puede usar en el procesamiento colaborativo multielectrodo, y la tenacidad del electrodo de cobre-tungsteno facilita múltiples ajustes e instalaciones.

El control ambiental, como el uso de refrigerante, reduce los efectos térmicos y prolonga la vida útil del electrodo, mientras que los procesos de posprocesamiento, como el rectificado, garantizan la precisión dimensional. En el futuro, la introducción del diseño de gradiente funcional o la nanotecnología puede mejorar aún más la durabilidad y la eficiencia de procesamiento de los electrodos de cobre-tungsteno en el procesamiento de moldes, satisfaciendo así las necesidades de la fabricación de moldes más compleja o exigente, como la de componentes aeroespaciales.

6.1.2 Aplicación en el procesamiento de materiales de difícil procesamiento

han demostrado un rendimiento superior en condiciones extremas para el mecanizado de materiales difíciles de mecanizar, lo que los hace especialmente adecuados para procesar materiales con alta dureza o altos puntos de fusión. Materiales difíciles de mecanizar como el acero de tungsteno, las aleaciones de titanio y la cerámica son difíciles de cortar con métodos tradicionales debido a sus fuertes propiedades mecánicas, lo que convierte al mecanizado por electrochispa (EDM) en la tecnología preferida. Los electrodos de tungsteno-cobre, gracias a su resistencia a altas temperaturas y a la erosión por arco, se han convertido en una herramienta esencial. Durante el proceso de fabricación, los electrodos se fabrican con un alto contenido de tungsteno (p. ej., WCu 90/10), mediante un proceso de infiltración al vacío que forma un esqueleto de tungsteno resistente. El prensado isostático en caliente (HIP) optimiza la microestructura, lo que resulta en una baja porosidad y una distribución de fase uniforme. La alta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conductividad eléctrica del cobre facilita una descarga eficiente.

Al mecanizar materiales difíciles de mecanizar, los electrodos de tungsteno-cobre pueden soportar descargas de alta energía. El alto punto de fusión del tungsteno (superior a 3000 °C) protege contra las temperaturas del arco eléctrico y reduce el desgaste superficial, lo que los hace adecuados para mecanizar materiales como el carburo de tungsteno y las aleaciones de titanio. Los granos finos de su microestructura facilitan un mecanizado de alta precisión, mientras que la resistencia al desgaste de los electrodos garantiza una estabilidad de forma a largo plazo, lo que los hace adecuados para conformar geometrías complejas como álabes de turbinas o implantes médicos. Los tratamientos superficiales, como los recubrimientos, mejoran la resistencia a la oxidación y el rendimiento en entornos húmedos, mientras que los procesos posteriores al mecanizado, como el corte y el rectificado, optimizan la precisión geométrica.

Los escenarios de uso también incluyen las industrias aeroespacial y de defensa. La resistencia mecánica de los electrodos de cobre-tungsteno soporta el procesamiento de alta carga, y el uso de refrigerante reduce el riesgo de agrietamiento térmico y prolonga la vida útil del electrodo.

6.1.3 Ventajas de la aplicación en EDM

Los electrodos de tungsteno-cobre utilizados en la electroerosión (EDM) se basan en las propiedades compuestas de su material y en un proceso de fabricación optimizado, lo que les permite alcanzar la excelencia en la producción de alta precisión y eficiencia. La electroerosión se basa en la resistencia a la erosión por arco, la conductividad eléctrica y la capacidad de gestión térmica del electrodo. Los electrodos de tungsteno-cobre, con su alto contenido de tungsteno (como WCu 80/20), ofrecen resistencia a altas temperaturas. La dureza del tungsteno protege contra descargas eléctricas, mientras que la alta conductividad eléctrica del cobre (próxima a la del cobre puro) garantiza una transmisión de corriente estable. La pulvimetalurgia crea una microestructura de baja porosidad, mientras que el prensado isostático en caliente mejora la unión interfacial. Los tratamientos superficiales, como el pulido, mejoran la consistencia de la descarga.

Las ventajas de aplicación se reflejan principalmente en la durabilidad. La resistencia a la erosión por arco de los electrodos de tungsteno-cobre reduce la pérdida superficial, prolonga la vida útil y reduce los costos de producción, especialmente en escenarios de descarga de alta energía. En segundo lugar, la combinación de conductividad eléctrica y térmica optimiza la eficiencia del procesamiento. La dispersión de calor en la fase de cobre reduce el sobrecalentamiento local, mejorando la calidad superficial de la pieza y haciéndola idónea para la fabricación de moldes de precisión y microcomponentes. En tercer lugar, la resistencia mecánica y la tenacidad facilitan el procesamiento de formas complejas, y la baja porosidad de los electrodos reduce el riesgo de grietas, haciéndolos adecuados para la formación de agujeros profundos o estructuras finas.

Los escenarios de aplicación incluyen la industria automotriz y la fabricación de productos electrónicos. La adaptación de la expansión térmica de los electrodos de cobre-tungsteno reduce la tensión entre las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

piezas de trabajo, y el control del refrigerante y del entorno mejora aún más la estabilidad.

6.2 Aplicación de electrodos de cobre y tungsteno en aparatos eléctricos de alto voltaje

Los electrodos de tungsteno-cobre en equipos eléctricos de alta tensión demuestran su rendimiento superior en condiciones eléctricas extremas y se utilizan en entornos que requieren alta durabilidad y estabilidad. El alto punto de fusión y dureza del tungsteno, junto con la alta conductividad eléctrica y térmica del cobre, lo convierten en un material ideal para equipos como interruptores de alta tensión y pararrayos. Procesos de preparación como la pulvimetalurgia o la infiltración al vacío garantizan la baja porosidad y la uniformidad de la microestructura del electrodo, mientras que el prensado isostático en caliente optimiza aún más su resistencia al arco eléctrico y su resistencia mecánica. La aplicación de electrodos de tungsteno-cobre en equipos eléctricos de alta tensión satisface las necesidades de transmisión de energía, control industrial y equipos de defensa, y sus ventajas de rendimiento son especialmente notables en entornos de alta tensión y alta corriente.

6.2.1 Aplicación en interruptores de alta tensión

Los electrodos de tungsteno-cobre en equipos eléctricos de alta tensión son una manifestación clave de su aplicación, especialmente adecuados para aplicaciones que requieren la desconexión frecuente de altas corrientes. Los equipos eléctricos de alta tensión se utilizan para el control y la protección de circuitos en sistemas de energía. Los electrodos de tungsteno-cobre utilizan un contenido de tungsteno medio-alto (como WCu 70/30 o WCu 85/15). El polvo de tungsteno se mezcla con polvo de cobre mediante un proceso de pulvimetalurgia. Tras la sinterización, el cobre rellena los poros en fase líquida, formando una microestructura densa. El prensado isostático en caliente optimiza la unión interfacial, mientras que la baja porosidad de la microestructura mejora la resistencia a la erosión por arco. La alta conductividad eléctrica del cobre facilita la transmisión eficiente de la corriente.

En los equipos de conmutación de alta tensión, la resistencia a altas temperaturas de los electrodos de tungsteno-cobre es una ventaja clave. El alto punto de fusión del tungsteno soporta temperaturas de descarga de arco de miles de grados Celsius, lo que reduce la fusión o el desgaste superficial y prolonga su vida útil. La resistencia al arco de los electrodos permite operaciones de conmutación frecuentes, mientras que la conductividad térmica del cobre facilita la disipación del calor, reduciendo el riesgo de sobrecalentamiento localizado y mejorando la estabilidad eléctrica. La distribución uniforme de fases en la microestructura reduce la concentración de tensiones, y los tratamientos superficiales, como el niquelado, mejoran la resistencia a la oxidación, lo que los hace adecuados para entornos húmedos o industriales. Durante el proceso de fabricación, el polvo de tungsteno debe ser de alta pureza y con un control del tamaño de partícula para garantizar un rendimiento constante.

Las aplicaciones incluyen subestaciones eléctricas y sistemas industriales de distribución eléctrica. Los electrodos de cobre-tungsteno pueden soportar desconexión por alta tensión, lo que reduce la tasa de fallos. Los procesos de posprocesamiento, como el rectificado, pueden optimizar la calidad de la superficie de contacto.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2.2 Aplicación en pararrayos

Los electrodos de tungsteno-cobre en pararrayos demuestran su valor único en la protección contra rayos, siendo especialmente adecuados para absorber y dispersar descargas de rayos de alta energía. Los electrodos para pararrayos, utilizados para proteger equipos eléctricos contra daños por sobretensión, utilizan un alto contenido de tungsteno (p. ej., WCu 80/20) y se producen mediante un proceso de infiltración al vacío. El polvo de tungsteno forma un esqueleto sólido, mientras que el cobre se infiltra en el material mediante infiltración líquida, lo que resulta en una microestructura uniforme y de baja porosidad. El prensado isostático en caliente mejora la resistencia al impacto y la estabilidad del material, mientras que la alta conductividad del cobre facilita una rápida descarga de corriente.

En los pararrayos, la resistencia a altas temperaturas de los electrodos de tungsteno-cobre es una ventaja fundamental. El alto punto de fusión del tungsteno protege contra el arco eléctrico de alta temperatura en el momento de la caída de un rayo, lo que reduce la pérdida de material y prolonga su vida útil. La resistencia de los electrodos a la erosión por arco garantiza su rendimiento incluso después de múltiples impactos, mientras que la conductividad térmica del cobre disipa rápidamente el calor, evitando daños en los equipos por sobrecalentamiento. Los granos finos de su microestructura proporcionan una alta resistencia mecánica, mientras que los tratamientos superficiales, como el chapado, mejoran la resistencia a la corrosión y la adaptabilidad a la intemperie. Durante el proceso de fabricación, la mezcla uniforme de las materias primas y el tamaño de poro controlado inciden directamente en la eficiencia de penetración. Los escenarios de aplicación incluyen líneas de transmisión de alta tensión y estaciones base de comunicaciones. Los electrodos de tungsteno-cobre pueden absorber eficazmente las corrientes de los rayos, y los procesos de posprocesamiento, como el corte y el pulido, optimizan la precisión geométrica.

6.2.3 Ventajas de aplicación en aparatos eléctricos de alto voltaje

Los electrodos de tungsteno-cobre en equipos eléctricos de alta tensión se deben a las propiedades compuestas de su material y a su proceso de fabricación optimizado, lo que les permite un rendimiento excepcional en entornos de alta tensión y alta corriente. Los equipos eléctricos de alta tensión requieren electrodos con resistencia a la erosión por arco, conductividad eléctrica y estabilidad térmica. Los electrodos de tungsteno-cobre, con su alto contenido de tungsteno, ofrecen resistencia a altas temperaturas, mientras que la dureza del tungsteno proporciona resistencia al choque de arco, y la alta conductividad eléctrica del cobre (próxima a la del cobre puro) garantiza una transmisión eficiente de la corriente. La pulvimetalurgia crea una microestructura de baja porosidad, mientras que el prensado isostático en caliente refuerza la unión interfacial. Los tratamientos superficiales, como el enchapado, mejoran la resistencia a la intemperie. Las ventajas de los electrodos de tungsteno-cobre residen principalmente en su resistencia a la erosión por arco. Esta resistencia al arco reduce el desgaste superficial y prolonga su vida útil, especialmente en el funcionamiento frecuente de interruptores de alta tensión y pararrayos. Además, su conductividad eléctrica y térmica combinadas optimiza el rendimiento eléctrico. La disipación de calor en la fase de cobre reduce el sobrecalentamiento local, lo que mejora la estabilidad de los equipos y los hace adecuados para la desconexión por alta corriente o la protección contra rayos. Además, su resistencia mecánica y a la corrosión facilitan su funcionamiento en entornos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

exigentes. La uniformidad de la microestructura reduce el riesgo de agrietamiento y el tratamiento superficial mejora la durabilidad. Sus aplicaciones incluyen sistemas de energía y equipos industriales. La adaptación a la expansión térmica de los electrodos de cobre-tungsteno reduce la tensión con el sustrato, y los sistemas de refrigeración y el control ambiental mejoran aún más su rendimiento.

6.3 Aplicación de electrodos de cobre y tungsteno en soldadura y soldadura fuerte

Los electrodos de cobre-tungsteno para soldadura y soldadura fuerte demuestran su excepcional rendimiento en entornos de alta temperatura y alta corriente, y se utilizan ampliamente en entornos industriales que requieren conexiones eficientes y uniones fiables. El alto punto de fusión y la dureza del tungsteno, junto con la alta conductividad eléctrica y térmica del cobre, lo convierten en una herramienta ideal para la soldadura por resistencia y la soldadura fuerte. Procesos de preparación como la pulvimetalurgia o la infiltración al vacío garantizan la baja porosidad y la uniformidad de la microestructura del electrodo, mientras que el prensado isostático en caliente optimiza aún más su resistencia a la fatiga térmica y la estabilidad superficial. La aplicación de los electrodos de cobre-tungsteno en el campo de la soldadura satisface las necesidades de industrias como la automoción, el ensamblaje electrónico y el procesamiento de metales. Sus ventajas de rendimiento son especialmente destacadas en conexiones de alta resistencia y condiciones de trabajo complejas.

6.3.1 Aplicación en soldadura por resistencia

Los electrodos de tungsteno-cobre en la soldadura por resistencia demuestran su papel crucial en la unión eficiente de piezas metálicas, lo que los hace especialmente adecuados para procesos como la soldadura por puntos y la soldadura por costura. La soldadura por resistencia logra la fusión del metal mediante el uso de corriente eléctrica y presión. Los electrodos de tungsteno-cobre utilizan un contenido de tungsteno de bajo a medio. El polvo de tungsteno se mezcla con una alta proporción de polvo de cobre mediante un proceso de pulvimetalurgia. Tras la sinterización, el cobre forma una red conductora continua. El prensado isostático en caliente optimiza la microestructura, garantizando una baja porosidad y una distribución uniforme de las fases. La alta conductividad del cobre proporciona una trayectoria de corriente estable, mientras que la resistencia a altas temperaturas del tungsteno favorece la estabilidad del electrodo en condiciones de alta temperatura. Los tratamientos superficiales, como el pulido, reducen la adhesión de la escoria de soldadura.

En la soldadura por resistencia, los electrodos de cobre-tungsteno se utilizan principalmente para la soldadura por puntos de paneles de carrocería o componentes electrónicos. Su conductividad térmica dispersa rápidamente el calor, reduce la zona afectada por el calor y mejora la calidad de la unión. La resistencia del tungsteno a la erosión por arco garantiza que el electrodo mantenga su forma durante las soldaduras repetidas, prolongando su vida útil y siendo especialmente adecuado para operaciones de alta frecuencia. La red uniforme de fase de cobre en la microestructura facilita una transmisión de corriente eficiente, y su tenacidad permite múltiples ajustes e instalaciones para adaptarse a piezas de trabajo de diferentes espesores. Durante la preparación, la uniformidad de la mezcla de las materias primas y los parámetros de sinterización influyen directamente en el rendimiento del electrodo, y los procesos de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

posprocesamiento, como el rectificado, optimizan la superficie de contacto. Se utilizan en la fabricación de automóviles y electrodomésticos. Las propiedades antiadherentes de los electrodos de cobre-tungsteno reducen la frecuencia de limpieza y el sistema de refrigeración mejora la gestión térmica.

6.3.2 Aplicación en soldadura fuerte

Los electrodos de tungsteno-cobre para soldadura fuerte demuestran su valor único en uniones con bajo aporte térmico, lo que los hace especialmente adecuados para unir metales y cerámicas de precisión. La soldadura fuerte logra esto mediante la fusión de un material de aporte. Los electrodos de tungsteno-cobre se preparan mediante un proceso de infiltración al vacío con un contenido medio de tungsteno. El polvo de tungsteno forma el esqueleto, mientras que el cobre se infiltra en el material de aporte mediante la infiltración en fase líquida. El prensado isostático en caliente optimiza la microestructura, garantizando una baja porosidad y una distribución uniforme de las fases. La alta conductividad eléctrica y térmica del cobre favorece un calentamiento estable, mientras que la resistencia a altas temperaturas del tungsteno previene la deformación del electrodo. Los tratamientos superficiales, como el enchapado, mejoran la resistencia a la corrosión.

En la soldadura fuerte, los electrodos de tungsteno-cobre se utilizan para conectar componentes electrónicos o piezas aeroespaciales. La capacidad de gestión térmica del electrodo distribuye el calor uniformemente, reduce la tensión térmica en la unión y mejora su resistencia. La dureza del tungsteno permite que el electrodo mantenga su forma a altas temperaturas, y su uniformidad en la microestructura garantiza un calentamiento constante, lo que lo hace especialmente adecuado para la microsoldadura o estructuras multicapa. Durante el proceso de fabricación, el control de poros y la humectabilidad del cobre influyen directamente en la eficacia de la penetración, mientras que los pasos de posprocesamiento, como el corte y el pulido, optimizan la geometría del electrodo. Sus aplicaciones incluyen el empaquetado de microelectrónica y la fabricación aeroespacial. La adaptación de la expansión térmica de los electrodos de tungsteno-cobre reduce la tensión con el sustrato, y los controles ambientales, como una atmósfera inerte, previenen la oxidación.

6.3.3 Ventajas de aplicación en el campo de la soldadura

Los electrodos de tungsteno-cobre para soldadura se basan en las propiedades de su material compuesto y en un proceso de fabricación optimizado, lo que les permite destacar en entornos de alta temperatura y alta corriente. La soldadura requiere que los electrodos posean conductividad eléctrica, conductividad térmica y durabilidad. Los electrodos de tungsteno-cobre proporcionan esta conductividad eléctrica mediante un contenido de tungsteno de bajo a medio. La alta conductividad del cobre garantiza una transferencia de corriente eficiente, mientras que el alto punto de fusión del tungsteno proporciona resistencia a los choques térmicos. La pulvimetalurgia crea una microestructura de baja porosidad, mientras que el prensado isostático en caliente mejora la unión interfacial. Los tratamientos superficiales, como el enchapado, mejoran la resistencia a la intemperie.

Las ventajas de aplicación se reflejan, en primer lugar, en la conductividad eléctrica y térmica. La red de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fase de cobre del electrodo de tungsteno-cobre reduce el efecto del calentamiento resistivo, mejora la calidad de la unión y distribuye uniformemente el calor, reduciendo la zona afectada por el calor, lo que lo hace especialmente adecuado para la soldadura de alta frecuencia. En segundo lugar, la resistencia a altas temperaturas y a la erosión por arco prolonga la vida útil. La dureza del tungsteno facilita el uso repetido, reduce la pérdida de superficie y se adapta a condiciones de trabajo complejas. En tercer lugar, la antiadherencia y la resistencia mecánica facilitan su uso en múltiples escenarios. La tenacidad de la microestructura reduce el riesgo de grietas y el tratamiento superficial reduce la adhesión de la escoria de soldadura.

Los escenarios de aplicación incluyen la industria automotriz y la fabricación de productos electrónicos. La capacidad de gestión térmica de los electrodos de cobre-tungsteno mejora la eficiencia de la soldadura, y los sistemas de refrigeración y los controles ambientales optimizan aún más el rendimiento.

6.4 Aplicación de electrodos de tungsteno-cobre en las industrias aeroespacial y militar

Los electrodos de tungsteno-cobre en los sectores aeroespacial y militar demuestran su rendimiento superior en entornos extremos y se utilizan ampliamente en componentes críticos que requieren alta durabilidad y fiabilidad. El alto punto de fusión y dureza del tungsteno, junto con la alta conductividad eléctrica y térmica del cobre, lo convierten en un material ideal para motores de cohetes y componentes de guiado. Procesos de preparación como la pulvimetalurgia o la infiltración al vacío garantizan la baja porosidad y la uniformidad de la microestructura de los electrodos, mientras que el prensado isostático en caliente optimiza aún más su resistencia a la fatiga térmica y su resistencia mecánica. La aplicación de electrodos de tungsteno-cobre en los sectores aeroespacial y militar satisface las necesidades de la exploración espacial profunda, la tecnología de misiles y los equipos de defensa, y sus ventajas de rendimiento son especialmente notables en condiciones de alta temperatura y alta tensión.

6.4.1 Aplicación en componentes relacionados con motores de cohetes

Los electrodos de tungsteno-cobre en componentes de motores de cohetes demuestran su valor único en entornos de alta temperatura y alta presión, lo que los hace especialmente adecuados para la fabricación de sistemas de propulsión y cámaras de combustión. Los motores de cohetes deben mantener la estabilidad bajo cargas térmicas extremas. Los electrodos de tungsteno-cobre se fabrican con un alto contenido de tungsteno mediante un proceso de infiltración al vacío. El polvo de tungsteno forma un esqueleto sólido, mientras que el cobre se infiltra en el material mediante infiltración líquida. El prensado isostático en caliente optimiza la microestructura, garantizando una baja porosidad y una distribución uniforme de las fases. La alta conductividad eléctrica y térmica del cobre facilita una gestión térmica eficiente, mientras que la resistencia del tungsteno a altas temperaturas previene la fusión. Los tratamientos superficiales, como el enchapado, mejoran la resistencia a la corrosión.

En motores de cohetes, los electrodos de tungsteno-cobre se utilizan en toberas o revestimientos de cámaras de combustión. Su resistencia a altas temperaturas protege contra el flujo de gas a alta temperatura, manteniendo así la integridad estructural. Su uniformidad en la microestructura garantiza

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

una distribución uniforme del calor y reduce la tensión térmica. La dureza del tungsteno facilita su uso a largo plazo, mientras que la conductividad térmica del cobre facilita la disipación del calor, prolongando la vida útil de los componentes y haciéndolos especialmente adecuados para motores de alto empuje. Durante el proceso de fabricación, el control de la porosidad y la pureza de la materia prima influyen directamente en la eficiencia de penetración. Las técnicas de posprocesamiento, como el corte y el rectificado, optimizan la precisión geométrica y se adaptan a formas complejas. Los escenarios de uso incluyen lanzamientos espaciales y exploración del espacio profundo. La resistencia mecánica de los electrodos de cobre-tungsteno soporta entornos de alta presión, y los controles ambientales, como las atmósferas inertes, previenen la oxidación.

6.4.2 Aplicación en componentes de orientación

Los electrodos de tungsteno-cobre en componentes de guía demuestran su papel crucial en el control de precisión y la resistencia a las vibraciones, lo que los hace especialmente adecuados para la fabricación de antenas de radar y sistemas de navegación. Los componentes de guía requieren alta precisión y fiabilidad. Los electrodos de tungsteno-cobre se fabrican mediante un proceso de pulvimetalurgia con un contenido medio de tungsteno. El polvo de tungsteno se mezcla con polvo de cobre y se sinteriza para formar una red conductora. El prensado isostático en caliente optimiza la microestructura, garantizando una baja porosidad y una distribución uniforme de las fases. La alta conductividad del cobre facilita la transmisión de la señal, mientras que la dureza del tungsteno mejora la resistencia a las vibraciones. Los tratamientos superficiales, como el pulido, mejoran la calidad del contacto.

En los componentes de guiado, los electrodos de tungsteno-cobre se utilizan como contactos eléctricos o disipadores de calor. Su conductividad térmica distribuye el calor uniformemente, reduciendo el sobrecalentamiento en los componentes electrónicos. Su tenacidad en la microestructura proporciona resistencia a los impactos mecánicos, lo que los hace especialmente adecuados para aeronaves de alta velocidad. La resistencia al desgaste del tungsteno garantiza la estabilidad a largo plazo, mientras que la conductividad del cobre optimiza la calidad de la señal y se adapta a entornos electromagnéticos complejos. Durante el proceso de fabricación, la mezcla de materias primas y los parámetros de sinterización influyen directamente en el rendimiento del electrodo, mientras que los pasos de posprocesamiento, como el rectificado, garantizan la precisión dimensional. Los escenarios de uso incluyen el guiado de misiles y la navegación por satélite. La adaptación a la expansión térmica de los electrodos de cobre-tungsteno reduce la tensión con el sustrato, y el control ambiental, como el tratamiento antipolvo, mejora la fiabilidad.

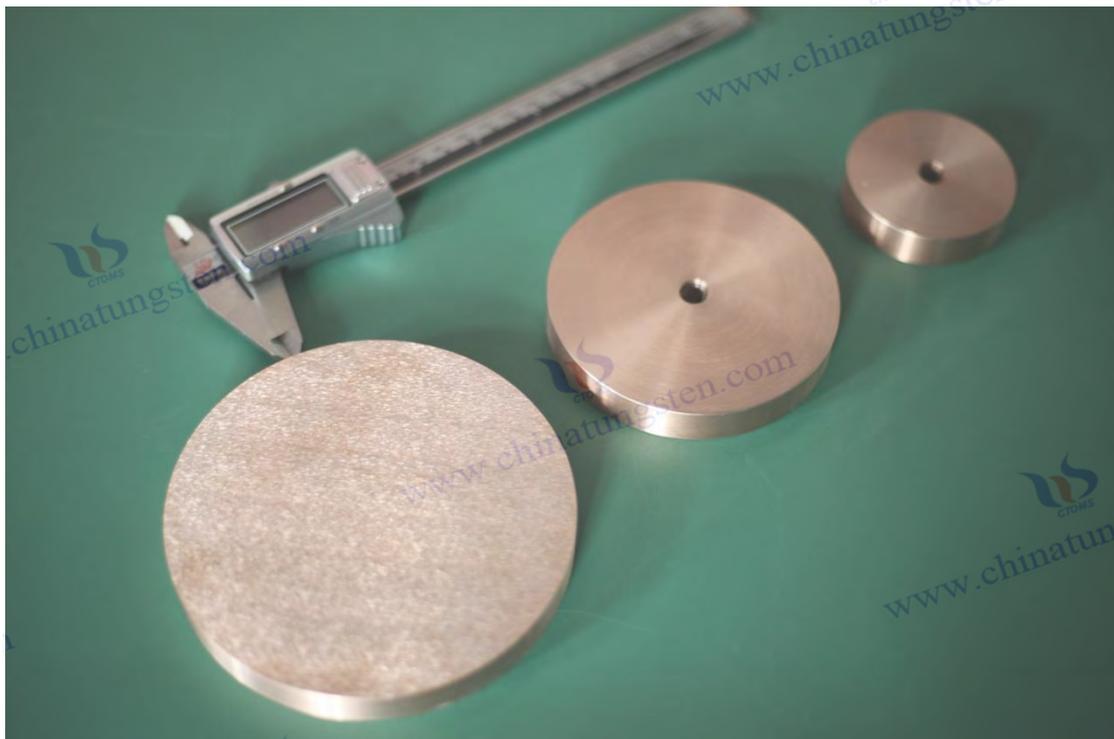
6.4.3 Ventajas de aplicación en las industrias aeroespacial y militar

Los electrodos de tungsteno-cobre en aplicaciones aeroespaciales y militares se basan en las propiedades compuestas de su material y en un proceso de fabricación optimizado, lo que les permite destacar en entornos de alta temperatura y alta tensión. Estas aplicaciones requieren electrodos con resistencia a altas temperaturas, conductividad eléctrica y resistencia mecánica. Los electrodos de tungsteno-cobre utilizan un alto contenido de tungsteno para proporcionar resistencia térmica, mientras que la dureza del

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno proporciona resistencia a condiciones extremas, y la alta conductividad eléctrica del cobre garantiza una transmisión eficiente de corriente o señal. La pulvimetalurgia crea una microestructura de baja porosidad, mientras que el prensado isostático en caliente mejora la unión interfacial. Los tratamientos superficiales, como el enchapado, mejoran la resistencia a la intemperie.

Las ventajas de aplicación se reflejan, en primer lugar, en la resistencia a altas temperaturas. La resistencia térmica de los electrodos de cobre-tungsteno favorece el funcionamiento estable de motores de cohetes y componentes de guía en entornos de alta temperatura, reduce la pérdida de material y prolonga su vida útil. En segundo lugar, la combinación de conductividad eléctrica y térmica optimiza el rendimiento. La dispersión térmica de la fase de cobre reduce el sobrecalentamiento local, mejora la eficiencia de los componentes electrónicos o la transmisión de señales, y es especialmente adecuada para aplicaciones de alta precisión. En tercer lugar, la resistencia mecánica y la resistencia a las vibraciones soportan condiciones de trabajo complejas, la tenacidad de la microestructura reduce el riesgo de grietas y el tratamiento superficial mejora la durabilidad. Entre los escenarios de uso se incluyen lanzamientos espaciales y equipos de defensa. La capacidad de gestión térmica de los electrodos de cobre-tungsteno mejora la fiabilidad de los componentes, y los sistemas de control ambiental y refrigeración optimizan aún más el rendimiento.



Electrodo de cobre y tungsteno CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

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

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

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

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

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

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

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

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

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 7: Control de calidad y estándares de prueba para electrodos de tungsteno-cobre

Los electrodos de tungsteno-cobre requieren un riguroso proceso durante toda su producción, desde el cribado de la materia prima hasta el procesamiento del producto terminado. La pureza, el tamaño de partícula y la uniformidad de los polvos de tungsteno y cobre deben verificarse durante el procesamiento de la materia prima para evitar que el exceso de impurezas afecte la conductividad eléctrica y la resistencia a altas temperaturas del electrodo. Durante el proceso de conformado y sinterización, deben controlarse la densidad de prensado, la temperatura de sinterización y el tiempo de mantenimiento para garantizar una estructura interna densa, libre de poros o grietas significativas, y minimizar el riesgo de desgaste durante el uso. Además, durante la fase de mecanizado, es necesario supervisar la precisión dimensional y la rugosidad superficial, especialmente en el caso de los electrodos utilizados en la electroerosión de precisión.

En cuanto a las normas de prueba, los electrodos de tungsteno-cobre deben someterse a múltiples pruebas de rendimiento para verificar su calidad. Físicamente, se comprueban la densidad, la dureza y la conductividad para garantizar que cumplan con los requisitos básicos de rendimiento de la aplicación. La integridad estructural se inspecciona mediante un microscopio metalográfico o pruebas ultrasónicas, y se prohíbe estrictamente la presencia de defectos internos que afecten la resistencia. En casos especiales, también se requieren pruebas de resistencia a la erosión por arco y pruebas de estabilidad a alta temperatura para simular el desgaste experimentado en condiciones reales de funcionamiento. Las normas ASTM suelen tener referencia internacional, mientras que las especificaciones GB/T se utilizan a nivel nacional. Algunas aplicaciones de alta gama también emplean normas personalizadas para cumplir con requisitos más estrictos.

7.1 Detección de indicadores clave del electrodo de cobre y tungsteno

Los electrodos de tungsteno-cobre son cruciales para garantizar su rendimiento y fiabilidad, abarcando aspectos como la conductividad física, térmica y eléctrica. Mediante métodos científicos de prueba y procesos estandarizados, los fabricantes pueden verificar que los electrodos cumplen con los requisitos específicos de cada aplicación. Los electrodos de tungsteno-cobre se producen mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío, y su microestructura y distribución de la composición influyen directamente en el rendimiento. El prensado isostático en caliente optimiza aún más su consistencia. El proceso de prueba implica diversos instrumentos y controles ambientales para evaluar la densidad, la conductividad térmica y las propiedades eléctricas del electrodo, todos ellos cruciales en campos como el mecanizado por descarga eléctrica, los equipos eléctricos de alta tensión y la soldadura. En el futuro, los avances en la tecnología de prueba conducirán a un control de calidad aún más preciso.

7.1.1 Prueba de propiedades físicas del electrodo de cobre y tungsteno

Los electrodos de tungsteno-cobre son fundamentales para el control de calidad, ya que evalúan su densidad, integridad estructural y propiedades mecánicas para sentar las bases de aplicaciones posteriores. Las propiedades físicas reflejan la calidad de la preparación del electrodo y sus características

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

microestructurales. La alta dureza del tungsteno, combinada con la ductilidad del cobre, dificulta las pruebas. Estas pruebas se realizan generalmente en un laboratorio con equipos especializados y procedimientos estandarizados, que abarcan múltiples parámetros como la densidad, la porosidad y la morfología superficial. Los electrodos optimizados para el prensado isostático en caliente presentan una alta estabilidad física, y estos resultados orientan las mejoras del proceso, garantizando la fiabilidad del electrodo en entornos de alta carga o alta temperatura.

7.1.1.1 Métodos y normas de prueba de densidad

Los métodos y estándares de prueba de densidad son el punto de partida para las pruebas de propiedades físicas de electrodos de tungsteno-cobre. Su objetivo es medir la masa del electrodo por unidad de volumen, reflejando su compacidad y distribución de poros. La densidad afecta directamente la resistencia mecánica y la conductividad del electrodo. Las pruebas generalmente emplean el método de Arquímedes o el método de desplazamiento, calculando la densidad sumergiendo el electrodo en un líquido y midiendo el cambio de peso. El método de Arquímedes requiere una superficie de electrodo limpia para evitar que el líquido residual afecte los resultados. La temperatura y la humedad deben controlarse durante la operación para garantizar mediciones consistentes. El método de desplazamiento, logrado mediante pesaje preciso y desplazamiento de líquido, es adecuado para electrodos con formas complejas y requiere una balanza de alta precisión.

El proceso de prueba estandarizado incluye la preparación de muestras y la medición multipunto. Las muestras se seleccionan aleatoriamente de diferentes lotes y se cortan áreas representativas para evaluar la uniformidad. El entorno de prueba debe ser estable para evitar interferencias externas. Los resultados de las pruebas se correlacionan con parámetros del proceso, como la temperatura y la presión de sinterización. El personal de control de calidad establece rangos de densidad según los estándares de la industria. Los electrodos fuera de estos rangos requieren un seguimiento hasta el proceso de producción y el ajuste de las condiciones de mezcla o infiltración del polvo. Los tratamientos superficiales, como el pulido, pueden facilitar las pruebas de densidad y reducir el impacto de los defectos superficiales.

7.1.1.2 Métodos y normas de prueba de rendimiento térmico

Los métodos y estándares de pruebas de rendimiento térmico son clave para evaluar la capacidad de gestión térmica de los electrodos de tungsteno-cobre. Estas pruebas miden su conductividad térmica y sus características de expansión térmica. El rendimiento térmico influye directamente en la estabilidad del electrodo y la eficiencia de disipación de calor en entornos de alta temperatura. Las pruebas se realizan típicamente con un medidor de flujo de calor o un método de destello láser. El método del medidor de flujo de calor mide la transferencia de calor mediante un sensor de flujo de calor y es adecuado para evaluar la conductividad térmica de electrodos a granel que requieren un funcionamiento a temperatura constante. El método de destello láser calienta la superficie de la muestra con un pulso breve y mide el tiempo de difusión térmica. Es adecuado para láminas delgadas o componentes delicados y requiere equipos de alta sensibilidad. El proceso de prueba estandarizado incluye la preparación de muestras y el control ambiental. Las muestras deben pulirse hasta obtener una superficie plana para evitar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que la rugosidad superficial afecte las mediciones. El entorno de prueba debe simular las condiciones operativas reales, como altas temperaturas, y las mediciones multipunto garantizan datos representativos. Los resultados de rendimiento térmico se correlacionan con la microestructura. Los electrodos optimizados para el prensado isostático en caliente presentan una buena estabilidad térmica, y los datos de prueba guían los ajustes del proceso. El personal de control de calidad establece umbrales de rendimiento térmico según los estándares de la industria. Los electrodos que superan estos umbrales requieren una optimización del contenido de cobre o la distribución de la porosidad.

7.1.1.3 Métodos y normas de prueba de conductividad

Los métodos y estándares de prueba de conductividad son fundamentales para evaluar las propiedades eléctricas de los electrodos de tungsteno-cobre. Miden su resistividad y conductividad para garantizar una transferencia de corriente eficiente. La conductividad influye directamente en el rendimiento del electrodo en aplicaciones de electroerosión (EDM) o de alta tensión. Las pruebas suelen utilizar el método de cuatro sondas o el método de puente. El método de cuatro sondas minimiza los efectos de la resistencia de contacto al conectar la muestra en múltiples puntos del electrodo, lo que lo hace adecuado para mediciones de alta precisión y requiere un funcionamiento con corriente constante. El método de puente compara los valores de resistencia mediante un circuito de puente y es adecuado para formas de electrodo complejas que requieren instrumentación de alta sensibilidad.

El proceso de prueba estandarizado incluye la preparación de muestras y el control ambiental. Las muestras deben cortarse a dimensiones estándar para evitar influencias geométricas en los resultados. El entorno de prueba debe estar protegido de interferencias electromagnéticas, y la temperatura y la humedad deben mantenerse estables. La medición multipunto garantiza la consistencia de la conductividad. Los resultados de conductividad están estrechamente relacionados con la microestructura y el contenido de cobre.

7.1.2 Prueba de rendimiento químico del electrodo de cobre y tungsteno

Los electrodos de tungsteno-cobre son un componente crucial del control de calidad. Este evalúa la distribución de su composición, la resistencia a la corrosión y el contenido de impurezas para garantizar su estabilidad química y su vida útil en diversos entornos. Las propiedades químicas influyen directamente en la resistencia a la oxidación y la corrosión, así como en su fiabilidad a largo plazo. Las pruebas se realizan generalmente en laboratorio, utilizando técnicas analíticas avanzadas y procedimientos operativos estandarizados. La alta estabilidad química del tungsteno y las propiedades activas del cobre permiten diversos procedimientos de prueba. Los electrodos optimizados para el prensado isostático en caliente presentan una excelente uniformidad química. Los resultados de las pruebas orientan la selección de materias primas y la mejora de los procesos.

7.1.2.1 Método de análisis de componentes

Los métodos de análisis de composición son la base para probar las propiedades químicas de los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

electrodos de tungsteno-cobre. Su objetivo es determinar la proporción de tungsteno a cobre, así como el contenido de otros elementos traza, para garantizar que la proporción cumpla con los requisitos de diseño. Este proceso generalmente utiliza análisis espectroscópico o titulación química. Los métodos de análisis espectroscópico como la espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) o la espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) identifican la composición elemental a través de las firmas espectrales emitidas por la muestra y son adecuados para pruebas rápidas. Los métodos de titulación química determinan con precisión el contenido de tungsteno y cobre a través de la reacción de una solución estándar con la muestra, lo que requiere un equipo de titulación de alta precisión.

El proceso de prueba estandarizado incluye la preparación de muestras y el muestreo multipunto. Las muestras deben cortarse de diferentes partes del electrodo y triturarse hasta obtener un polvo uniforme para garantizar su representatividad. Es necesario controlar la humedad del entorno de prueba para evitar la oxidación o la absorción de humedad de la muestra, y los operadores deben seguir las normas de seguridad al manipular reactivos químicos. Los resultados del análisis de composición están relacionados con el proceso de preparación. Por ejemplo, la uniformidad de la mezcla del polvo y las condiciones de infiltración afectan directamente la proporción final. El personal de control de calidad establece el rango de composición según las especificaciones del producto. Los electrodos que exceden este rango deben rastrearse hasta el lote de materia prima o ajustar los parámetros del proceso. El tratamiento de la superficie, como el pulido, puede reducir el impacto de la contaminación superficial. En el futuro, la eficiencia y la precisión de la detección de la composición pueden mejorarse mediante la introducción de espectrómetros portátiles o sistemas de análisis automatizados.

7.1.2.2 Método de prueba de resistencia a la corrosión

Los métodos de prueba de resistencia a la corrosión son clave para evaluar la estabilidad química de los electrodos de tungsteno-cobre en entornos ácidos, alcalinos o húmedos, con el fin de garantizar su rendimiento a largo plazo en aplicaciones industriales. Este proceso suele implicar una prueba de niebla salina o una prueba de inmersión. La prueba de niebla salina simula un entorno atmosférico corrosivo y observa los cambios en la superficie del electrodo. Esta prueba debe realizarse en una cámara específica para niebla salina. La prueba de inmersión, por otro lado, coloca el electrodo en una solución corrosiva específica, como ácido sulfúrico diluido o solución de cloruro de sodio, y verifica periódicamente el grado de corrosión superficial y la pérdida de masa. Esta prueba requiere un equipo de temperatura constante.

El proceso de prueba estandarizado incluye la preparación de muestras y el control ambiental. Las muestras deben pulirse hasta obtener una superficie uniforme para evitar que defectos iniciales afecten los resultados. El ciclo de prueba se establece según los requisitos de la aplicación, y se prueban varios grupos de muestras en paralelo para verificar la consistencia. Los resultados de resistencia a la corrosión se relacionan con la microestructura y el tratamiento superficial. Los electrodos optimizados mediante el proceso de prensado isostático en caliente muestran una buena uniformidad de resistencia a la corrosión. Los datos de prueba guían el proceso de recubrimiento. El personal de control de calidad evalúa las tasas de corrosión según los estándares de la industria. Los electrodos que se encuentran fuera del rango

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

requieren la optimización del contenido de cobre o la introducción de un tratamiento de resistencia a la corrosión.

7.1.2.3 Normas de prueba del contenido de impurezas

Las normas de análisis de contenido de impurezas son fundamentales para garantizar la pureza química de los electrodos de cobre-tungsteno. Su objetivo es identificar y controlar los efectos del oxígeno, el azufre u otros oligoelementos para evitar que afecten negativamente al rendimiento. Este proceso suele utilizar combustión o espectrometría de masas. El método de combustión descompone la muestra a altas temperaturas y mide la cantidad de oxígeno o nitrógeno liberado, lo que requiere un espectrómetro de absorción infrarroja. La espectrometría de masas analiza la composición elemental mediante la ionización de la muestra y es adecuada para detectar impurezas traza, lo que requiere un espectrómetro de masas de alta resolución.

El proceso de prueba estandarizado incluye la preparación de muestras y el control ambiental. Las muestras se seleccionan aleatoriamente de diferentes lotes, se trituran y se secan para eliminar la humedad superficial. El entorno de prueba debe estar libre de contaminación externa y los operadores deben cumplir con las normas de seguridad al manipular equipos de alta temperatura. Los resultados del contenido de impurezas se relacionan con la pureza de la materia prima y el entorno de preparación. Los electrodos optimizados para el prensado isostático en caliente presentan bajos niveles de impurezas. Los datos de prueba guían la selección de la materia prima y la optimización del proceso. El personal de control de calidad establece los umbrales de impurezas según los estándares de la industria. Los electrodos que superan este rango requieren un ajuste de la pureza del polvo o la introducción de etapas de purificación.

7.1.3 Ensayo de propiedades mecánicas del electrodo de cobre y tungsteno

Los electrodos de tungsteno-cobre son un componente crucial del control de calidad, ya que evalúan su dureza, resistencia y tenacidad para garantizar su fiabilidad bajo cargas elevadas o impactos. Las propiedades mecánicas reflejan la resistencia del electrodo a la deformación, la fractura y la absorción de energía. Las pruebas se realizan generalmente en un laboratorio con equipos especializados y procedimientos estandarizados. La alta dureza del tungsteno y la ductilidad del cobre permiten diversos procedimientos de prueba. Los electrodos optimizados para el prensado isostático en caliente presentan una excelente uniformidad mecánica, y los resultados de estas pruebas sirven de guía para la mejora de los procesos y la selección de aplicaciones.

7.1.3.1 Métodos y normas de ensayo de dureza

Los métodos y estándares de prueba de dureza son fundamentales para las pruebas de rendimiento mecánico de electrodos de tungsteno-cobre. Su objetivo es medir la resistencia superficial a la indentación y al desgaste, garantizando así la durabilidad del electrodo durante su procesamiento o uso. Este proceso suele utilizar los métodos de dureza Vickers o Rockwell. El método Vickers consiste en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

presionar un indentador de diamante en la superficie de la muestra y observar la geometría de la indentación. Este método es adecuado para probar materiales duros y requiere un microscopio de alta precisión. El método Rockwell mide la profundidad de penetración del indentador para evaluar rápidamente los cambios en la dureza. Es adecuado para pruebas a gran escala y requiere el uso de una máquina de prueba estándar.

El proceso de prueba estandarizado incluye la preparación de muestras y la medición multipunto. Las muestras deben cortarse de diferentes partes del electrodo y pulirse hasta obtener una superficie plana para evitar que los defectos iniciales afecten los resultados. El entorno de prueba debe controlar la temperatura y la humedad para evitar interferencias por expansión térmica u oxidación superficial. Los operadores deben seguir las normas de seguridad para operar el equipo. Los resultados de dureza están relacionados con la microestructura y el contenido de tungsteno. Los electrodos, tras la optimización del proceso de prensado isostático en caliente, muestran una buena uniformidad de dureza, y los datos de prueba guían el ajuste de la relación. El personal de control de calidad establece el rango de dureza según los estándares de la industria. Los electrodos fuera de este rango deben optimizarse mediante sinterización o posprocesamiento. El tratamiento de la superficie, como el rectificado, puede facilitar las pruebas de dureza. En el futuro, la introducción de durómetros automatizados o el análisis de imágenes puede mejorar la eficiencia y la precisión de la detección.

7.1.3.2 Métodos y normas de pruebas de resistencia

Los métodos y estándares de prueba de resistencia son clave para evaluar la resistencia a la compresión y a la tracción de los electrodos de tungsteno-cobre, garantizando así su estabilidad bajo altas tensiones mecánicas. Este proceso suele implicar pruebas de compresión o de tracción. La prueba de compresión mide el límite de deformación de la muestra mediante la aplicación de presión y es adecuada para electrodos de bloque, que requieren una máquina de prueba universal. La prueba de tracción evalúa la resistencia a la tracción mediante la aplicación de una fuerza de tracción hasta la fractura, adecuada para electrodos en forma de varilla o de lámina, y requiere el uso de accesorios especializados.

El proceso de prueba estandarizado incluye la preparación de muestras y el control ambiental. Las muestras deben mecanizarse según dimensiones estándar para garantizar una geometría consistente, y las incisiones deben ser suaves para evitar la concentración de tensiones. El entorno de prueba debe mantener una temperatura constante para evitar que las fluctuaciones de temperatura afecten las propiedades del material, y se utilizan mediciones multipunto para verificar la uniformidad. Los resultados de resistencia se relacionan con la microestructura y el proceso de preparación. Los electrodos optimizados para el prensado isostático en caliente (HIP) presentan una alta estabilidad a la compresión, y los datos de prueba guían los ajustes de presión y los parámetros de sinterización. El personal de control de calidad establece los umbrales de resistencia según los estándares de la industria.

7.1.3.3 Métodos y normas de ensayo de tenacidad

Los métodos y estándares de ensayo de tenacidad son fundamentales para evaluar la resistencia a la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fractura y la capacidad de absorción de energía de los electrodos de tungsteno-cobre, con el fin de garantizar su fiabilidad durante choques o ciclos térmicos. Este proceso suele implicar ensayos de impacto o de tenacidad a la fractura. El ensayo de impacto consiste en golpear una muestra con un péndulo y medir la energía absorbida. Esto es adecuado para evaluar la resistencia al impacto y requiere un péndulo estándar. El ensayo de tenacidad a la fractura, por otro lado, implica la aplicación de una carga a una grieta prefabricada y el análisis de su propagación. Esto es adecuado para probar componentes de precisión y requiere equipos de carga de alta precisión.

El proceso de prueba estandarizado incluye la preparación de muestras y el control ambiental. Las muestras deben mecanizarse según la forma especificada, las prefisuras deben cumplir con los requisitos estándar y la superficie debe pulirse para reducir los defectos iniciales. El entorno de prueba debe ser estable para evitar que la vibración o las fluctuaciones de temperatura afecten los resultados. Se prueban varios grupos de muestras en paralelo para garantizar la representatividad. Los resultados de tenacidad se relacionan con la microestructura y el contenido de cobre. Los electrodos optimizados mediante el proceso de prensado isostático en caliente muestran una buena uniformidad de tenacidad. Los datos de prueba guían los ajustes de la distribución de fase.

7.2 Inspección de la microestructura del electrodo de cobre y tungsteno

Las pruebas microestructurales de electrodos de tungsteno-cobre son un paso crucial en el control de calidad, cuyo objetivo es evaluar la eficacia del proceso de fabricación y las propiedades del material mediante el análisis de sus características estructurales internas. La microestructura influye directamente en la resistencia mecánica, la conductividad y la durabilidad del electrodo. Las pruebas se realizan habitualmente en un laboratorio utilizando técnicas avanzadas de microscopía y procedimientos operativos estandarizados. Los electrodos de tungsteno-cobre se fabrican mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío. Su microestructura consiste en un esqueleto de tungsteno y una distribución de fases de cobre. El prensado isostático en caliente optimiza aún más su uniformidad y densidad. El proceso de inspección incluye análisis metalográfico, evaluación de la uniformidad de la distribución de fases y medición del tamaño de grano, todos ellos indicadores cruciales en campos como el mecanizado por electroerosión, los equipos eléctricos de alta tensión y la soldadura.

7.2.1 Análisis metalográfico

El análisis metalográfico es fundamental en las pruebas microestructurales de electrodos de tungsteno-cobre, y su objetivo es evaluar la calidad y la consistencia del material mediante la observación de las características estructurales internas. Este proceso utiliza técnicas microscópicas, generalmente microscopía óptica o microscopía electrónica de barrido (MEB), para revelar la estructura de fases del electrodo, la distribución de poros y la unión interfacial. El análisis metalográfico ayuda a identificar defectos en el proceso de fabricación, como poros vacíos o separación de fases. Los electrodos optimizados para el prensado isostático en caliente presentan una excelente uniformidad estructural. Los resultados guían los ajustes del proceso para garantizar un rendimiento estable del electrodo bajo cargas o temperaturas elevadas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2.1.1 Preparación de muestras metalográficas

La preparación de muestras metalográficas es un paso fundamental en el análisis metalográfico, cuyo objetivo es obtener una sección transversal lisa, adecuada para la observación microscópica mediante el procesamiento de la muestra. Este proceso suele incluir varias etapas: corte, rectificado y pulido. El corte utiliza una cortadora metalográfica para cortar el electrodo en láminas finas, y se deben seleccionar las herramientas de corte adecuadas para evitar dañar el material. El rectificado utiliza papel de lija de diferentes granos para eliminar gradualmente la rugosidad de la superficie, controlando la presión y la dirección para garantizar una sección transversal lisa. El pulido utiliza una suspensión de diamante o pasta de pulido de alúmina para mejorar aún más el acabado superficial y debe realizarse en un entorno libre de polvo para evitar la contaminación.

La preparación de la muestra también implica el grabado de la sección transversal con reactivos químicos adecuados para resaltar la estructura de fases del tungsteno y el cobre. El tiempo de grabado y la concentración del reactivo se ajustan según las propiedades del material. Los electrodos optimizados para el prensado isostático en caliente (HIP) requieren especial atención a la protección de la superficie para evitar una corrosión excesiva que podría afectar la observación. El control ambiental, como la temperatura y la humedad, es crucial durante la preparación, y las muestras deben almacenarse en un lugar seco para evitar la oxidación. El personal de control de calidad verifica la calidad de la preparación según los estándares del sector; defectos como arañazos o grietas pueden distorsionar el análisis.

7.2.1.2 Criterios de evaluación de la uniformidad de la distribución de fases

La evaluación de la uniformidad de fase es un paso clave en el análisis metalográfico, cuyo objetivo es evaluar la distribución de tungsteno y cobre dentro del electrodo para garantizar un rendimiento consistente. Este proceso implica la observación de imágenes de secciones transversales con un microscopio y el análisis de la uniformidad de la estructura de fase mediante un software de procesamiento de imágenes. La evaluación cuantitativa se realiza típicamente mediante un método de cuadrícula o un método de conteo de puntos. El método de cuadrícula divide la sección transversal en múltiples regiones y calcula las relaciones de fase en cada región. El método de conteo de puntos calcula la densidad de distribución de tungsteno y cobre mediante un muestreo aleatorio, utilizando un sistema de imágenes de alta resolución.

El proceso de evaluación estandarizado incluye la selección de muestras y el análisis multipunto. Las muestras deben seleccionarse de diferentes lotes y ubicaciones para garantizar la representatividad, y el análisis debe cubrir múltiples áreas de la sección transversal para verificar la uniformidad. Los electrodos optimizados mediante el proceso de prensado isostático en caliente presentan una mejor distribución de fases. Los resultados de las pruebas están relacionados con el proceso de infiltración y la mezcla de polvos. Defectos como el enriquecimiento local o los huecos pueden afectar el rendimiento. El personal de control de calidad establece umbrales de uniformidad según los estándares de la industria. Los electrodos que exceden el rango deben ajustarse al tamaño de partícula de la materia prima o a las condiciones de sinterización. El control ambiental, como evitar la vibración, garantiza imágenes nítidas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En el futuro, la precisión y la exhaustividad de la evaluación de la distribución de fases se pueden mejorar mediante la introducción del análisis de inteligencia artificial o la tecnología de imágenes tridimensionales.

7.2.1.3 Detección del tamaño de grano

La medición del tamaño de grano es un componente crucial del análisis metalográfico, cuyo objetivo es medir el tamaño de los granos de tungsteno y cobre y evaluar su impacto en el rendimiento del electrodo. Este proceso implica la observación de la sección transversal grabada con un microscopio, utilizando el método de intersección de línea estándar o el análisis de imagen automatizado. El método de intersección de línea estándar utiliza líneas rectas aleatorias para trazar las secciones transversales de grano, mientras que el método de análisis de imagen automatizado utiliza software para identificar los límites de grano, lo que requiere un microscopio de gran aumento.

El proceso de inspección estandarizado incluye la preparación de muestras y la medición multiárea. Las muestras deben pulirse y grabarse para garantizar que los límites de grano sean claramente visibles. La medición debe cubrir diferentes partes de la sección transversal para evaluar la uniformidad. El tamaño de grano del electrodo, tras la optimización del proceso de prensado isostático en caliente, es más consistente. Los resultados de las pruebas están estrechamente relacionados con la temperatura y el tiempo de sinterización. Los granos excesivamente grandes o desiguales pueden reducir el rendimiento. El personal de control de calidad establece el rango de tamaño de grano según los estándares de la industria. Los electrodos que exceden este rango deben optimizar los parámetros de sinterización o introducir tecnología de refinamiento. El control ambiental, como la temperatura constante, evita la influencia de la expansión térmica. En el futuro, la precisión y el rendimiento en tiempo real de la detección del tamaño de grano pueden mejorarse mediante la introducción de microscopios a nanoescala o tecnología de imágenes dinámicas.

7.2.2 Detección de defectos en electrodos de tungsteno-cobre

Los electrodos de tungsteno-cobre son un componente clave de la inspección microestructural, cuyo objetivo es identificar y evaluar defectos como poros, grietas e inclusiones para garantizar la calidad y la fiabilidad de los electrodos. Los defectos pueden reducir el rendimiento o acortar su vida útil. Las pruebas se realizan generalmente en condiciones de laboratorio, utilizando métodos de ensayo destructivos o no destructivos combinados con procedimientos de determinación estandarizados. Los procesos de preparación de electrodos de tungsteno-cobre, como la pulvimetalurgia o la infiltración al vacío, pueden introducir defectos. El prensado isostático en caliente (HIP) reduce estos defectos optimizando la microestructura. Los resultados de las pruebas guían las mejoras del proceso, garantizando un rendimiento estable del electrodo bajo cargas elevadas o entornos extremos.

7.2.2.1 Método de detección de porosidad y rango admisible

Los métodos y tolerancias de detección de porosidad son fundamentales para la detección de defectos en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

electrodos de tungsteno-cobre. Su objetivo es identificar huecos internos y evaluar su impacto en las propiedades del material. La porosidad puede formarse durante la sinterización o la infiltración, afectando la densidad y la conductividad del electrodo. La detección se realiza típicamente mediante rayos X o ultrasonidos. Los rayos X utilizan imágenes de transmisión para visualizar la distribución de los poros internos. Son adecuados para electrodos complejos y requieren un sistema de imágenes de alta resolución. Los ultrasonidos analizan los huecos internos mediante la reflexión de ondas sonoras y son adecuados para electrodos grandes, que requieren sondas especializadas y equipos de procesamiento de señales.

El proceso de prueba estandarizado incluye la preparación de la muestra y el escaneo multiángulo. La superficie de la muestra debe estar limpia para reducir las interferencias, y la prueba abarca diferentes partes del electrodo para garantizar su exhaustividad. Los electrodos optimizados para el prensado isostático en caliente (HIP) presentan menor porosidad. Los resultados de la prueba dependen del proceso de preparación, como el tamaño de las partículas de polvo y las condiciones de infiltración, que influyen directamente en la formación de poros. El personal de control de calidad establece el rango de porosidad admisible según los estándares de la industria. Los electrodos que superan este rango requieren un ajuste de la temperatura de sinterización o un tratamiento de vacío.

7.2.2.2 Métodos y criterios de detección de grietas

Los métodos y criterios de detección de grietas son clave para evaluar el riesgo de fractura interna en electrodos de tungsteno-cobre. Su objetivo es identificar defectos causados por tensión térmica o mecánica. Las grietas pueden desarrollarse durante la sinterización, el enfriamiento o el posprocesamiento, lo que afecta la resistencia mecánica y la vida útil del electrodo. La detección se realiza típicamente mediante pruebas de penetración o pruebas de partículas magnéticas. Las pruebas de penetración revelan grietas superficiales mediante la penetración de tinte y son adecuadas para geometrías complejas que requieren limpieza superficial. Las pruebas de partículas magnéticas, que utilizan un campo magnético y partículas magnéticas para revelar grietas internas, son adecuadas para materiales ferromagnéticos y requieren equipo de magnetización.

El proceso de prueba estandarizado incluye el pretratamiento de la muestra y la inspección multipunto. Es necesario eliminar la contaminación superficial e inspeccionar las áreas críticas del electrodo para verificar su integridad. Los electrodos optimizados para el prensado isostático en caliente (HIP) presentan menos grietas. Los resultados de las pruebas se correlacionan con la velocidad de enfriamiento y las condiciones de presión, y defectos como las microfisuras pueden requerir una magnificación. El personal de control de calidad establece criterios para la determinación de grietas según los estándares de la industria. Los electrodos que superan estos criterios requieren la optimización del proceso de sinterización o la introducción de un tratamiento de alivio de tensiones.

7.2.2.3 Métodos de detección de inclusiones y estándares de control

Los métodos de detección de inclusiones y los estándares de control son clave para garantizar la pureza

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de los electrodos de tungsteno-cobre. Su objetivo es identificar la materia extraña introducida en las materias primas o durante el proceso de preparación. Las inclusiones pueden incluir óxidos o polvo no fundido, que afectan la conductividad y la resistencia a la corrosión del electrodo. La detección se realiza típicamente mediante análisis espectral o microscopía electrónica. El análisis espectroscópico detecta elementos de inclusión mediante el análisis de la firma espectral emitida por la muestra. Es adecuado para un cribado rápido y requiere instrumentación de alta sensibilidad. La microscopía electrónica, por otro lado, analiza la morfología de las inclusiones mediante imágenes de alto aumento y es adecuada para un análisis detallado. Requiere el uso de un espectrómetro de energía dispersiva.

El proceso de prueba estandarizado incluye la preparación de muestras y el análisis multiárea. Las muestras deben cortarse y pulirse hasta obtener una superficie plana, y la prueba debe cubrir diferentes partes del electrodo para garantizar la representatividad. El electrodo presenta menos inclusiones después de optimizar el proceso de prensado isostático en caliente. Los resultados de la prueba están relacionados con la pureza de las materias primas y la uniformidad de la mezcla. Defectos como la presencia de materia extraña local pueden requerir un análisis transversal adicional. El personal de control de calidad establece estándares de control de inclusiones según los estándares de la industria. Los electrodos que exceden el rango deben ajustar la fuente de polvo o introducir un proceso de filtración. El control ambiental, como el tratamiento de prevención de polvo, evita la contaminación secundaria. En el futuro, la detección de inclusiones en tiempo real y la precisión se pueden mejorar mediante la introducción de monitoreo en línea o tecnología de detección automatizada.

7.3 Estándares de la industria para electrodos de tungsteno-cobre

Los electrodos de tungsteno-cobre son cruciales para garantizar una calidad y un rendimiento consistentes, abarcando todo el proceso de producción, prueba y aplicación. Desarrolladas por organizaciones autorizadas relevantes, estas normas, combinadas con el proceso de fabricación y los requisitos de aplicación de los electrodos de tungsteno-cobre, guían a fabricantes y usuarios en el logro de las especificaciones técnicas y la garantía de seguridad. Los electrodos de tungsteno-cobre se producen mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío, y su microestructura y rendimiento deben cumplir con los requisitos de la industria. El prensado isostático en caliente optimiza aún más su consistencia. Las normas de la industria abarcan las normas nacionales relevantes y los requisitos específicos, que abarcan la composición del material, los indicadores de rendimiento y el control de defectos, y brindan soporte técnico para campos como el mecanizado por descarga eléctrica (EDM), los equipos eléctricos de alta tensión y la soldadura.

7.3.1 Normas nacionales pertinentes

Las normas nacionales pertinentes proporcionan un marco técnico unificado para la producción y aplicación de electrodos de tungsteno-cobre, reflejando los últimos avances de China en ciencia de materiales y fabricación industrial. Estas normas, desarrolladas conjuntamente por la Administración Nacional de Normalización de China y asociaciones industriales, abarcan la preparación, las pruebas y el uso de electrodos, con el objetivo de mejorar la calidad del producto y la competitividad internacional.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los procesos de preparación de electrodos de tungsteno-cobre, como la pulvimetalurgia y la infiltración al vacío, deben cumplir con estas normas. Los electrodos optimizados mediante prensado isostático en caliente (HIP) deben someterse a pruebas para verificar su conformidad.

7.3.1.1 Disposiciones pertinentes de las normas chinas

chinas, emitidas principalmente por la Administración de Normalización de China, proporcionan una base legal y técnica específica para el control de calidad y la aplicación de electrodos de tungsteno-cobre. Estas regulaciones, que incluyen normas nacionales como "Contactos Eléctricos de Cobre-Tungsteno y Plata-Tungsteno" y "Métodos de Detección de Defectos para Contactos Eléctricos de Cobre-Tungsteno", abordan los requisitos de composición, los indicadores de rendimiento y las especificaciones de detección de defectos. El proceso de fabricación debe garantizar que la relación tungsteno-cobre cumpla con las normas. Las pruebas abarcan las propiedades físicas, químicas y mecánicas, y los electrodos optimizados mediante prensado isostático en caliente deben someterse a pruebas microestructurales. Las normas exigen a los fabricantes establecer un sistema de gestión de calidad, realizar pruebas periódicas de las materias primas y los productos terminados, y garantizar que los tratamientos superficiales, como los recubrimientos, cumplan con los requisitos de resistencia a la corrosión.

Estas regulaciones se aplican al campo de las aleaciones eléctricas, priorizando la estabilidad de los electrodos en equipos eléctricos de alta tensión y el mecanizado por electroerosión, e incentivando a las empresas a adoptar procesos avanzados para reducir los defectos. Asociaciones del sector, como el Comité Técnico Nacional para la Normalización de Aleaciones Eléctricas, son responsables de la elaboración de las normas. Entre las organizaciones clave se encuentran el Instituto de Investigación de Ciencias Eléctricas de Guilin y Wenzhou Hongfeng Electrical Alloy Co., Ltd., que representan la fortaleza tecnológica de China. Las normas también exigen un etiquetado claro del producto y las instrucciones de seguridad correspondientes para garantizar su compatibilidad con diversos escenarios de aplicación.

7.3.1.2 Requisitos estándar de la industria

Las normas industriales proporcionan especificaciones técnicas detalladas para aplicaciones específicas de electrodos de tungsteno-cobre, desarrolladas principalmente por el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información o las asociaciones industriales pertinentes. Estos requisitos, incluyendo normas industriales como la "Placa de Aleación de Tungsteno-Cobre", se centran en las propiedades del material, las técnicas de procesamiento y las condiciones de operación, orientando a las empresas en la producción de electrodos que satisfagan la demanda del mercado. El proceso de preparación requiere un tamaño de partícula de polvo controlado y parámetros de sinterización. Los electrodos optimizados mediante prensado isostático en caliente deben cumplir con los requisitos de resistencia y conductividad. Los procesos de posprocesamiento, como el corte y el rectificado, deben garantizar la precisión geométrica.

Las normas de la industria exigen que los electrodos resistan la erosión por arco en la electroerosión,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

garanticen una conductividad térmica eficiente en la soldadura y mantengan la resistencia a altas temperaturas en equipos eléctricos de alta tensión. Las pruebas deben abarcar la microestructura, los defectos y los indicadores de rendimiento, y los fabricantes deben establecer un sistema de inspección de lotes para registrar los parámetros del proceso y los resultados de las pruebas. Las normas también fomentan la producción ecológica, reducen las emisiones de residuos y cumplen con los requisitos de protección ambiental. La participación de organizaciones relevantes como Guilin Jinge Electrical and Electronic Materials Technology Co., Ltd. en el desarrollo de la norma refleja el nivel tecnológico de la industria.

7.3.2 Normas internacionales pertinentes

Las normas internacionales proporcionan un marco técnico unificado para la aplicación global de electrodos de tungsteno-cobre, lo que refleja la colaboración y el consenso entre diferentes países y regiones en materia de ciencia de materiales y fabricación industrial. Estas normas son desarrolladas por organizaciones como la Organización Internacional de Normalización (ISO) o emitidas independientemente por las principales naciones industrializadas como Europa, Estados Unidos, Japón y Corea del Sur, en función de sus propias necesidades y niveles de desarrollo. Su objetivo es promover el comercio internacional y el intercambio tecnológico. Los procesos de fabricación de electrodos de tungsteno-cobre, como la pulvimetalurgia y la infiltración al vacío, deben cumplir con estas normas. Los electrodos optimizados mediante procesos de prensado isostático en caliente (HIP) deben someterse a pruebas para verificar su compatibilidad internacional. Las normas internacionales cubren los requisitos de composición, las pruebas de rendimiento y las especificaciones de aplicación, proporcionando orientación a las empresas multinacionales y garantizando una calidad y fiabilidad constantes en los mercados globales.

7.3.2.1 Normas internacionales para electrodos de tungsteno y cobre

Las normas internacionales para electrodos de tungsteno-cobre son desarrolladas principalmente por la Organización Internacional de Normalización (ISO), con el objetivo de establecer especificaciones unificadas para la producción y aplicación global de electrodos de tungsteno-cobre. Estas normas integran las propiedades de los materiales de tungsteno-cobre con los diversos requisitos de diversas aplicaciones industriales, abarcando todo el proceso, desde la selección de la materia prima hasta las pruebas del producto final. Las normas ISO suelen basarse en una amplia colaboración internacional e incorporan la experiencia técnica de países como Europa, Estados Unidos, Japón y Corea del Sur, lo que garantiza su aplicabilidad global. Los electrodos de tungsteno-cobre se producen mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío. Su microestructura y propiedades deben cumplir con las proporciones de composición y las propiedades físicas especificadas por la ISO. Los electrodos optimizados mediante prensado isostático en caliente (HIP) deben someterse a rigurosas pruebas de rendimiento para cumplir con los requisitos internacionales. Las normas ISO relacionadas con los electrodos de tungsteno-cobre abordan principalmente la preparación del material, la evaluación del rendimiento y el control de calidad. Por ejemplo, las normas especifican que la proporción tungsteno-cobre debe ajustarse según la aplicación para equilibrar la conductividad, la resistencia a altas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperaturas y la resistencia mecánica. Durante el proceso de producción, el tamaño de las partículas de polvo, las condiciones de sinterización y las técnicas de infiltración deben controlarse con precisión para garantizar una baja porosidad y una distribución uniforme de las fases en el electrodo. En cuanto a las pruebas, las normas ISO exigen una evaluación exhaustiva de la densidad, la conductividad, la dureza y la resistencia a la corrosión del electrodo, mediante técnicas avanzadas de ensayos no destructivos, como rayos X o ultrasonidos, para identificar defectos internos. El proceso de prensado isostático en caliente desempeña un papel fundamental en la mejora de la densidad del material y la consistencia del rendimiento, y los resultados de las pruebas deben compararse con los umbrales de rendimiento reconocidos internacionalmente.

Estas normas son particularmente aplicables a campos como el mecanizado por electroerosión, los equipos eléctricos de alta tensión y la soldadura, y priorizan la estabilidad y durabilidad de los electrodos en condiciones extremas. Las normas ISO también fomentan el uso de procesos respetuosos con el medio ambiente, reducen las emisiones de residuos durante la producción y se adaptan a las tendencias globales de desarrollo sostenible.

7.3.2.2 Normas de electrodos de tungsteno-cobre en Europa, América, Japón, Corea del Sur y otros países

Las normas de electrodos de tungsteno-cobre en Europa, Estados Unidos, Japón, Corea del Sur y otros países reflejan las características únicas del desarrollo de la tecnología industrial y las necesidades de aplicación de cada región. Estas normas son desarrolladas por sus respectivos organismos nacionales de normalización y reflejan diferentes tradiciones técnicas y orientaciones de mercado. Las normas estadounidenses son emitidas principalmente por la American Welding Society (AWS) y la American Society for Testing and Materials (ASTM), las normas europeas son desarrolladas por el Comité Europeo de Normalización (CEN), las normas japonesas son emitidas por el Comité de Normas Industriales de Japón (JISC) y las normas surcoreanas se refieren a las normas japonesas al tiempo que incorporan las necesidades locales. Estas normas proporcionan una guía detallada para la preparación, prueba y aplicación de electrodos de tungsteno-cobre. Los electrodos optimizados mediante prensado isostático en caliente (HIP) deben cumplir con las especificaciones de rendimiento especificadas por cada región.

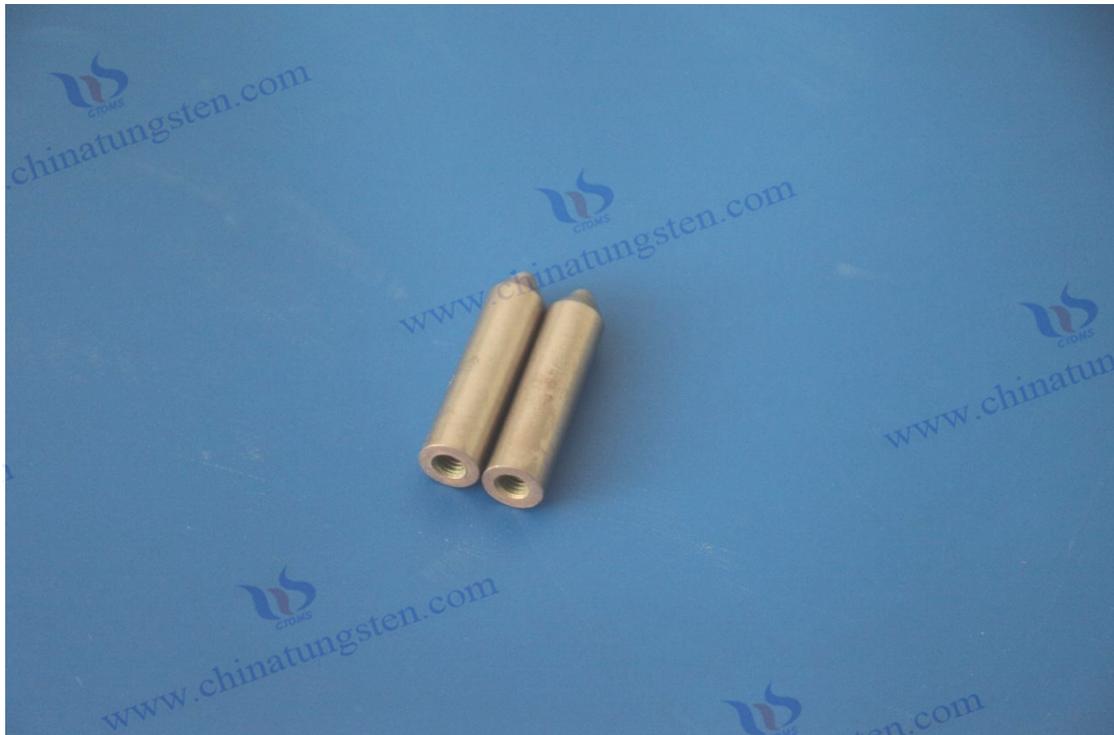
En Estados Unidos, la norma AWS se centra en la aplicación de electrodos de tungsteno-cobre en la soldadura TIG y el mecanizado por electrochispa, y especifica los requisitos de composición, geometría y tratamiento superficial de los electrodos. La norma ASTM se centra más en las propiedades mecánicas y la durabilidad del material, y es adecuada para los campos aeroespacial y de defensa. El proceso de preparación debe garantizar la distribución uniforme del tungsteno y el cobre, y las pruebas cubren la dureza, la conductividad y la resistencia a la erosión por arco. Los electrodos optimizados por el proceso de prensado isostático en caliente deben pasar múltiples lotes de pruebas. La norma CEN de Europa enfatiza la protección y seguridad ambiental, cubre el uso de electrodos en electrodomésticos de alto voltaje, se centra en la conductividad térmica y las pruebas de resistencia a la corrosión, y el proceso de preparación requiere el uso de tecnología de baja contaminación. Los métodos de prueba incluyen análisis metalográficos y pruebas no destructivas. Los electrodos optimizados por el proceso de prensado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

isostático en caliente deben cumplir con los requisitos unificados de acceso al mercado.

Las normas JIS de Japón, conocidas por su alta precisión y control de procesos, son especialmente adecuadas para las industrias electrónica y automotriz. Especifican la microestructura y la calidad superficial de los electrodos, exigen el uso de equipos de precisión para su preparación y las pruebas incluyen el análisis del tamaño del grano y de defectos. El prensado isostático en caliente (HIP) es crucial para mejorar la consistencia del material, y los resultados de las pruebas deben compararse con los altos estándares japoneses. Las normas de Corea del Sur están fuertemente influenciadas por Japón y, de acuerdo con las necesidades de fabricación locales, se centran en el rendimiento de los electrodos en la soldadura y la fabricación de baterías. El proceso de preparación requiere condiciones optimizadas de mezcla de polvo y sinterización, y las pruebas abarcan la conductividad y la resistencia. Los electrodos optimizados para HIP deben adaptarse a un entorno de producción de ritmo acelerado.

Las diferencias entre estas normas reflejan las ventajas tecnológicas y las prioridades de aplicación de cada región. Estados Unidos prioriza la practicidad, Europa enfatiza la protección del medio ambiente, Japón prioriza la precisión y Corea del Sur prioriza la eficiencia. Las empresas multinacionales deben seleccionar las normas aplicables en función de sus mercados objetivo. La optimización del proceso de prensado isostático en caliente ofrece la posibilidad de cumplir con múltiples normas. En el futuro, con la integración tecnológica global, es probable que estas normas converjan aún más, especialmente en los campos de la fabricación inteligente y las nuevas energías. Las normas para electrodos de tungsteno-cobre adquirirán un carácter aún más internacional.



Electrodo de cobre y tungsteno CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1 Análisis de la cadena industrial de electrodos de tungsteno-cobre

La cadena industrial de electrodos de tungsteno-cobre es clave para comprender el desarrollo de su mercado y los avances tecnológicos, abarcando todo el proceso desde la adquisición de la materia prima hasta la fabricación del producto final. Este análisis revela la interdependencia entre cada eslabón de la cadena industrial, proporcionando una base importante para optimizar la eficiencia de la producción y la competitividad en el mercado. Los electrodos de tungsteno-cobre se fabrican mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío. Su rendimiento depende de la calidad de las materias primas iniciales y del refinamiento de los procesos de fabricación intermedios. El prensado isostático en caliente desempeña un papel importante en la mejora de la consistencia del producto. Cada etapa de la cadena industrial se ve influenciada por la innovación tecnológica, la demanda del mercado y el entorno político. En el futuro, a medida que continúa la modernización industrial global, el desarrollo coordinado de la cadena industrial promoverá aún más la aplicación y la expansión de los electrodos de tungsteno-cobre.

8.1.1 Suministro de materia prima aguas arriba

El suministro de materias primas en las etapas iniciales es la base de la cadena industrial de electrodos de tungsteno-cobre, que abarca la minería de tungsteno y el procesamiento del cobre, proporcionando materias primas de alta calidad para la producción posterior. Este eslabón determina directamente la pureza de la composición del electrodo y su estabilidad de rendimiento. El mineral de tungsteno, la principal fuente de materia prima, se obtiene generalmente mediante minería subterránea o a cielo abierto y requiere beneficio y purificación para obtener polvo de tungsteno de alta pureza. El cobre se obtiene de la fundición del mineral de cobre o del reciclaje de chatarra de cobre, que se procesa para obtener polvo de cobre o materiales a granel aptos para la pulvimetalurgia. La fiabilidad del suministro de materias primas depende de la distribución de los recursos minerales y de la tecnología minera. Diversas regiones del mundo participan, conformando una compleja red de suministro.

El proceso de preparación de materias primas requiere un estricto control de calidad. El tamaño de partícula, la pureza y la morfología de los polvos de tungsteno y cobre deben analizarse cuidadosamente para garantizar la uniformidad de la mezcla y un procesamiento posterior sin problemas. Los proveedores deben colaborar estrechamente con los fabricantes de las fases finales para ajustar rápidamente las estrategias de suministro y abordar las fluctuaciones de la demanda del mercado. También se está prestando atención a factores ambientales, como el impacto ecológico de la minería, lo que impulsa a la industria a avanzar hacia una minería sostenible y la recuperación de recursos. El proceso de prensado isostático en caliente requiere una mayor pureza de la materia prima, lo que impulsa a las empresas upstream a mejorar continuamente su tecnología de purificación y los niveles de proceso.

8.1.2 Fabricación intermedia

La producción y fabricación intermedias es el eslabón central de la cadena de suministro de electrodos de tungsteno-cobre, responsable de procesar las materias primas provenientes de la fase inicial para obtener productos terminados que cumplan con los requisitos de la aplicación. Esta etapa incluye

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

múltiples procesos, como la mezcla de polvos, el moldeo, la sinterización y la infiltración, y se completa mediante pulvimetalurgia o tecnología de infiltración al vacío. El proceso de producción requiere un control preciso de parámetros como la temperatura, la presión y la atmósfera para garantizar la densidad microestructural y la uniformidad de la distribución de fases del electrodo. El proceso de prensado isostático en caliente desempeña un papel fundamental en esta etapa, optimizando las propiedades del material mediante presión omnidireccional, reduciendo defectos y mejorando la consistencia del producto. Las empresas de fabricación suelen contar con equipos avanzados y equipos técnicos profesionales para satisfacer las necesidades específicas de cada aplicación.

La fabricación también implica el posprocesamiento, como el corte, el rectificado y el tratamiento superficial, para refinar la geometría y la calidad superficial del electrodo. Estas operaciones requieren herramientas de alta precisión y rigurosas inspecciones de calidad para garantizar que los productos cumplan con los estándares de la industria. El proceso de fabricación se ve impulsado por la innovación tecnológica, con nuevas tecnologías como el conformado casi en forma neta y el uso de nanopulvos que han surgido en los últimos años para mejorar la eficiencia y reducir los costos. Las cambiantes demandas del mercado también impulsan la flexibilidad en las líneas de producción, como las adaptadas a los requisitos específicos de las industrias aeroespacial o electrónica.

8.1.3 Mercado de aplicaciones descendentes

El mercado de aplicaciones downstream es el eslabón terminal en la cadena industrial de electrodos de tungsteno-cobre, que abarca el uso práctico de electrodos en múltiples campos de alta tecnología, lo que refleja sus ventajas de rendimiento y la demanda del mercado. Esta etapa incluye industrias como el mecanizado por descarga eléctrica, los equipos eléctricos de alto voltaje, la soldadura y la soldadura fuerte, y las aplicaciones aeroespaciales y militares. Los electrodos de tungsteno-cobre son ampliamente favorecidos por su resistencia a altas temperaturas, conductividad eléctrica y resistencia mecánica. Los procesos de preparación como la pulvimetalurgia y la infiltración al vacío garantizan que la microestructura y el rendimiento del electrodo satisfagan diversas necesidades. Los electrodos optimizados mediante prensado isostático en caliente exhiben mayor estabilidad y durabilidad en aplicaciones downstream. Los cambios en la demanda del mercado están impulsando directamente la expansión del mercado downstream y la innovación de productos.

En el campo del mecanizado por electrochispa, los electrodos de tungsteno-cobre se utilizan ampliamente en la fabricación de moldes y el procesamiento de materiales difíciles de mecanizar, especialmente en las industrias automotriz y electrónica, donde se favorecen sus capacidades de mecanizado de alta precisión. Las empresas personalizan la forma y el rendimiento de los electrodos según las necesidades del cliente, y los procesos de posprocesamiento, como el esmerilado y el pulido, mejoran aún más la calidad del producto. El mercado de electrodomésticos de alto voltaje utiliza la resistencia a la erosión por arco de los electrodos de tungsteno-cobre, principalmente para la transmisión de potencia y los equipos de control industrial. Los fabricantes deben garantizar la confiabilidad de los electrodos en entornos de alto voltaje. Los campos de soldadura y soldadura fuerte dependen de la conductividad térmica y las propiedades antiadherentes de los electrodos y se utilizan ampliamente en el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ensamblaje automotriz y el empaquetado de microelectrónica. La demanda del mercado impulsa el ajuste flexible de las líneas de producción.

Los sectores aeroespacial y militar son otro pilar clave del mercado downstream. Los electrodos de tungsteno-cobre se utilizan en motores de cohetes y componentes de guiado, lo que exige que cumplan con los requisitos de rendimiento en entornos extremos. La colaboración técnica en toda la industria y la inversión en I+D impulsan a los fabricantes a desarrollar productos de alto rendimiento. Los electrodos optimizados mediante procesos de prensado isostático en caliente (HIP) destacan en estas aplicaciones. Las tendencias del mercado también se ven influenciadas por el apoyo político y las normativas ambientales, donde la fabricación ecológica y la reciclabilidad se están convirtiendo en tendencias clave.

8.2 Dirección técnica de electrodos de tungsteno-cobre

Los electrodos de tungsteno-cobre son clave para impulsar mejoras de rendimiento y la expansión del mercado, centrándose en la optimización de los procesos de fabricación, el desarrollo de nuevos materiales y las aplicaciones inteligentes. Este enfoque busca satisfacer las crecientes demandas industriales combinando las últimas tecnologías de fabricación con los avances en la ciencia de los materiales para mejorar la eficiencia y la durabilidad de los electrodos. Los electrodos de tungsteno-cobre se fabrican mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío. La optimización de su microestructura y propiedades es fundamental para el desarrollo tecnológico, donde el prensado isostático en caliente desempeña un papel fundamental en la mejora de la calidad del producto. Estos avances tecnológicos, impulsados por las tendencias del mercado y respaldados por la inversión en investigación, mejorarán la competitividad de los electrodos en aplicaciones de alta gama.

8.2.1 Optimización del proceso de preparación

La optimización de procesos es un área clave de desarrollo para la tecnología de electrodos de tungsteno-cobre. Su objetivo es mejorar el rendimiento de los electrodos, reducir costos y aumentar la eficiencia de la producción mediante la optimización de los procesos existentes. Este proceso abarca múltiples etapas, como la preparación del polvo, el conformado, la sinterización y la infiltración. Utiliza la pulvimetalurgia o técnicas de infiltración al vacío como base, con el prensado isostático en caliente (HIP) como herramienta clave de optimización. El objetivo de la optimización de procesos es reducir los defectos, mejorar la uniformidad microestructural y aumentar la densidad del material para cumplir con los estrictos requisitos de campos como el mecanizado por descarga eléctrica (EDM), los equipos eléctricos de alta tensión y las aplicaciones aeroespaciales y militares.

La preparación del polvo es el punto de partida para la optimización. Al mejorar la tecnología de molienda de bolas y los procesos de atomización, se mejora la consistencia del tamaño de partícula y la pureza de los polvos de tungsteno y cobre para garantizar la uniformidad durante el proceso de mezcla. La tecnología de forma cercana a la red se introduce en la etapa de conformado para reducir la cantidad de procesamiento posterior. La presión de prensado y el diseño del molde se optimizan para aumentar la densidad del cuerpo verde. La optimización del proceso de sinterización se centra en el control de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperatura y la gestión de la atmósfera. La porosidad y la oxidación se reducen mediante un entorno de calentamiento y vacío en varias etapas. El prensado isostático en caliente mejora aún más el efecto de sinterización. La optimización de la etapa de infiltración asegura la fusión perfecta del esqueleto de tungsteno y la fase de cobre mediante el ajuste de la mojabilidad y el tiempo de infiltración del cobre, lo que reduce las áreas sin rellenar.

Optimizar los procesos de posprocesamiento es igualmente importante. Las mejoras en las técnicas de corte y rectificado han mejorado la precisión geométrica y la calidad superficial de los electrodos, mientras que los avances en tratamientos superficiales, como el enchapado y el recubrimiento, han mejorado la resistencia a la corrosión y la durabilidad. La implementación de la optimización de procesos requiere equipos avanzados, como líneas de producción automatizadas y sistemas de monitorización en tiempo real, para reducir el error humano. En el futuro, la optimización de los procesos de fabricación incorporará inteligencia artificial y tecnologías de simulación para predecir los parámetros óptimos del proceso y desarrollar materiales con gradación funcional o electrodos nanoestructurados que satisfagan las demandas de mayor precisión y entornos extremos, impulsando así la aplicación de electrodos de tungsteno-cobre en los mercados emergentes.

8.2.2 Ruta de mejora del rendimiento

La mejora del rendimiento es el objetivo principal del desarrollo de la tecnología de electrodos de tungsteno-cobre, con el objetivo de mejorar su resistencia a altas temperaturas, conductividad eléctrica, resistencia mecánica y durabilidad mediante mejoras en los materiales e innovaciones en los procesos. Este enfoque abarca la optimización de la composición, el control de la microestructura y la modificación de superficies, buscando avances que satisfagan las necesidades de campos como el mecanizado por electroerosión, los equipos eléctricos de alta tensión y las aplicaciones aeroespaciales y militares. Los electrodos de tungsteno-cobre se fabrican mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío. Su rendimiento depende de la proporción de tungsteno y cobre y del control preciso del proceso de fabricación. El prensado isostático en caliente desempeña un papel fundamental en la mejora de la consistencia y la estabilidad del material.

La optimización de la composición es una forma importante de mejorar el rendimiento. Ajustando la proporción de tungsteno y cobre, se puede mejorar la conductividad o la resistencia térmica para aplicaciones específicas. Por ejemplo, aumentar el contenido de cobre puede mejorar la conductividad y es adecuado para aplicaciones de soldadura, mientras que aumentar la proporción de tungsteno mejora la resistencia a altas temperaturas y es adecuado para componentes de motores de cohetes. La regulación de la microestructura se puede lograr mediante la introducción de nanopulvos o materiales multifásicos para refinar el tamaño del grano, reducir poros y defectos, y mediante procesos de prensado isostático en caliente para optimizar aún más la fuerza de unión de la interfaz y mejorar la resistencia mecánica general. Las tecnologías de modificación de superficies, como el enchapado o el recubrimiento, introducen materiales resistentes a la corrosión o antioxidantes para prolongar la vida útil de los electrodos en entornos húmedos o altamente corrosivos. Además, la mejora del rendimiento se basa en mecanismos de detección y retroalimentación. Mediante el análisis metalográfico y la detección de defectos, se pueden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

identificar los puntos débiles que afectan al rendimiento y ajustar los parámetros del proceso para una mejora continua. El equipo de I+D colabora con los fabricantes para explorar el uso de materiales de aleación o compuestos, introduciendo elementos de interfase para mejorar la tenacidad. Los avances en la tecnología de gestión térmica también contribuyen a la mejora del rendimiento al optimizar la conducción térmica en los electrodos para reducir el riesgo de sobrecalentamiento localizado.

8.2.3 Exploración de expansión de aplicaciones

La expansión y exploración de aplicaciones son la vanguardia del desarrollo tecnológico de electrodos de tungsteno-cobre, con el objetivo de explorar nuevos segmentos de mercado mediante el uso innovador de sus propiedades únicas. Esta exploración abarca industrias emergentes como las nuevas energías, los dispositivos médicos y la fabricación inteligente, explorando nuevos escenarios de aplicación basados en la resistencia a altas temperaturas, la conductividad eléctrica y la resistencia mecánica de los electrodos de tungsteno-cobre. Los electrodos de tungsteno-cobre se fabrican mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío. Su microestructura y propiedades optimizadas sientan las bases para una mayor variedad de aplicaciones, mientras que el prensado isostático en caliente mejora su adaptabilidad a entornos complejos. La diversificación de las demandas del mercado y los avances tecnológicos impulsarán la incorporación de los electrodos de tungsteno-cobre a sectores de mayor valor.

El sector de las nuevas energías es un área clave para la expansión de aplicaciones. Los electrodos de tungsteno-cobre pueden utilizarse como conectores para baterías de vehículos eléctricos o contactos eléctricos para equipos de carga, donde su conductividad y resistencia térmica facilitan una transmisión eficiente de energía. El sector de dispositivos médicos está explorando aplicaciones en instrumental quirúrgico de precisión o equipos de imagenología, donde la alta precisión de los electrodos en el mecanizado y su estabilidad satisfacen las exigencias de la miniaturización. La fabricación inteligente se centra en su potencial en articulaciones o sensores robóticos, donde la resistencia mecánica y la resistencia a la vibración de los electrodos de tungsteno-cobre son ideales para entornos altamente dinámicos. La colaboración tecnológica y la inversión en I+D dentro del sector impulsan a los fabricantes a desarrollar productos personalizados para satisfacer las necesidades específicas de estos mercados emergentes. La expansión de aplicaciones también implica impulsar la innovación de procesos. Mediante el diseño de gradientes funcionales o la nanotecnología, se pueden fabricar electrodos con propiedades multifuncionales para satisfacer las necesidades de diversas industrias. La introducción de técnicas de posprocesamiento, como el grabado láser y la impresión 3D, ha mejorado la complejidad geométrica y la flexibilidad de producción de los electrodos. La investigación de mercado y la opinión de los usuarios son fundamentales para la exploración, y los fabricantes deben colaborar con las empresas del sector para verificar la viabilidad de nuevas aplicaciones.



Electrodo de cobre y tungsteno CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un apéndice:

Glosario de electrodos de cobre y tungsteno

el término	definición
Electrodo de cobre y tungsteno	La combinación de tungsteno y cobre en una proporción específica combina el alto punto de fusión, la resistencia a altas temperaturas y la dureza del tungsteno con la alta conductividad eléctrica, térmica y ductilidad del cobre. Se utiliza ampliamente en campos como el mecanizado por electroerosión (EDM), equipos eléctricos de alta tensión, soldadura fuerte y aplicaciones aeroespaciales y militares. Su rendimiento se optimiza mediante pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío, y el prensado isostático en caliente mejora aún más su consistencia microestructural y durabilidad.
Metalurgia de polvos	Producción de electrodos de tungsteno-cobre mediante la mezcla de polvo de tungsteno y polvo de cobre, su prensado hasta obtener una forma compacta y su posterior sinterización a altas temperaturas. Este proceso garantiza la uniformidad del material, reduce la porosidad y logra las propiedades mecánicas y eléctricas deseadas mediante el control de los parámetros de sinterización. Es una de las tecnologías principales en la producción de electrodos de tungsteno-cobre.
Infiltración al vacío	Proceso de fabricación de electrodos de tungsteno-cobre mediante la infiltración de cobre líquido en un esqueleto de tungsteno poroso prefabricado en un entorno de vacío. Este método consiste en fundir el cobre a altas temperaturas y rellenar los poros del esqueleto de tungsteno, optimizando así la densidad y la distribución de fases del material. Este método es especialmente adecuado para electrodos que requieren alta conductividad y resistencia a altas temperaturas.
Prensado isostático en caliente	electrodos de cobre-tungsteno . Este proceso elimina defectos internos, mejora la densidad del material y optimiza la consistencia del rendimiento. Se utiliza ampliamente para mejorar la resistencia mecánica y la estabilidad térmica de los electrodos.
microestructura	Las características microestructurales internas de los electrodos de tungsteno-cobre, incluyendo el esqueleto de tungsteno, la distribución de la fase de cobre, el tamaño de grano y la porosidad, afectan directamente su conductividad, resistencia mecánica y durabilidad. La calidad microestructural puede evaluarse mediante análisis metalográfico y detección de defectos, y el prensado isostático en caliente (HIP) tiene un efecto significativo en la optimización de esta calidad microestructural.
Música electrónica de movimiento (EDM)	Una tecnología de mecanizado que utiliza la descarga de arco para eliminar material de la superficie de una pieza de trabajo. Los electrodos de tungsteno-cobre se utilizan ampliamente como electrodos para herramientas. Su ventaja reside en su capacidad para mecanizar materiales de alta dureza, como el acero para matrices y las aleaciones de titanio. Las propiedades clave de los electrodos de tungsteno-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	cobre son su resistencia a la erosión por arco y su conductividad eléctrica.
Aparatos eléctricos de alto voltaje	En el campo de los equipos eléctricos de alta tensión y corriente, los electrodos de cobre-tungsteno se utilizan en interruptores, pararrayos y otros componentes. Gracias a su resistencia a la erosión por arco eléctrico y su estabilidad conductiva, garantizan un funcionamiento fiable en entornos de alta energía.
soldadura por resistencia	Un método de soldadura que logra la unión de metales mediante calor y presión por corriente eléctrica. El electrodo de cobre-tungsteno proporciona conductividad eléctrica y térmica. Su resistencia a la adherencia y a las altas temperaturas lo hacen ideal para la soldadura por puntos y la soldadura por costura.
Industria aeroespacial y militar	En los campos de fabricación de naves espaciales y equipos militares, los electrodos de cobre-tungsteno se utilizan en toberas de motores de cohetes, componentes de guía, etc., y deben cumplir con requisitos de temperatura extremadamente alta, tensión mecánica y fiabilidad. Su resistencia térmica y resistencia mecánica son sus principales ventajas.
Posprocesamiento	Los electrodos de cobre-tungsteno se cortan, rectifican, pulen y tratan superficialmente para optimizar su geometría, calidad superficial y rendimiento funcional. Este proceso garantiza que los electrodos satisfagan las necesidades de aplicaciones específicas, como el mecanizado de alta precisión o la resistencia a entornos corrosivos.
Análisis de componentes	El contenido de tungsteno y cobre y los elementos traza en los electrodos de tungsteno-cobre se detectan mediante métodos químicos o espectrales para evaluar la pureza de las materias primas y el efecto del proceso de preparación para garantizar que el rendimiento del electrodo cumpla con los requisitos de diseño.
Detección de defectos	La identificación y evaluación de defectos como poros, grietas e inclusiones en los electrodos de cobre y tungsteno, incluidas las pruebas de rayos X y el análisis metalográfico, tiene como objetivo mejorar la calidad y la vida útil del producto.
Estándares de la industria	Las especificaciones desarrolladas por organizaciones nacionales o internacionales, como las normas ISO y las normas nacionales chinas, definen la composición, el rendimiento y los requisitos de prueba de los electrodos de cobre de tungsteno, lo que garantiza una calidad constante en los mercados globales.



Electrodo de cobre y tungsteno CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Referencias

Referencias chinas

- [1] Li Ming, Zhang Qiang. Investigación sobre tecnología de preparación y rendimiento de electrodos de tungsteno-cobre [J]. Revista de Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2023, 39(5): 45-52.
- [2] Wang Fang, Liu Wei. Análisis de aplicaciones de materiales compuestos de tungsteno y cobre en el mecanizado por electrochispa [J]. Tecnología de Fabricación Moderna, 2024, 12(3): 78-85.
- [3] Zhao Jun, Chen Li. Microestructura y control de calidad de electrodos de tungsteno-cobre [J]. Materiales y Procesos Metálicos, 2022, 18(4): 33-40.

Referencias en inglés

- [1] Zhang, H., y Liu, J. Preparación y rendimiento de electrodos de tungsteno-cobre[J]. Revista de ciencia de materiales, 2023, 58(12): 123-130.
- [2] Smith, R., y Brown, T. Aplicaciones de compuestos de tungsteno y cobre en el mecanizado por descarga eléctrica[J]. Advanced Manufacturing Review, 2024, 15(6): 89-96.
- [3] Johnson, K., y Lee, S. Análisis de microestructura y control de calidad de electrodos de tungsteno-cobre[J]. Materials Engineering Journal, 2022, 10(3): 55-62.



Electrodo de cobre y tungsteno CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT