

Qué es la aleación 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

Índice de Contenidos

Capítulo 1 Introducción

- 1.1 Panorámica de la Aleación de Wolframio-Cobre
 - 1.1.1 Definición de la Aleación de Wolframio-Cobre
 - 1.1.2 Composición de la Aleación
- 1.2 Origen Histórico y Proceso de Desarrollo de la Aleación de Wolframio-Cobre
 - 1.2.1 Exploración Temprana
 - 1.2.2 Nodos de Avances Clave en Tecnología
 - 1.2.3 Tendencia de Desarrollo Moderna

Capítulo 2 Características de la Aleación de Wolframio-Cobre

- 2.1 Análisis de las Características de la Aleación de Wolframio-Cobre
 - 2.1.1 Mecanismo de Formación y Ventajas de la Alta Dureza
 - 2.1.1.1 Mecanismo de Microestructura
 - 2.1.1.2 Ventajas en Aplicaciones Resistentes al Desgaste
 - 2.1.1.3 Comparación de Dureza y Ventajas con Otras Aleaciones
 - 2.1.2 Principio y Rendimiento de la Resistencia a la Erosión por Arco
 - 2.1.2.1 Mecanismo de Erosión por Arco
 - 2.1.2.2 Principio Intrínseco de la Resistencia a la Erosión por Arco
 - 2.1.2.3 Diferencias de Rendimiento en Diferentes Entornos de Uso
 - 2.1.2.4 Vías para Mejorar el Rendimiento
 - 2.1.3 Análisis de las Capacidades Antiadherentes y Antisoldadura
 - 2.1.3.1 Causas de Adherencia y Soldadura
 - 2.1.3.2 Rendimiento Antiadherente
 - 2.1.3.3 Factores que Afectan las Capacidades Antiadherentes y Antisoldadura
 - 2.1.4 Principio y Aplicación de la Excelente Conductividad
 - 2.1.4.1 Naturaleza Física y Mecanismo de Conducción de la Conductividad
 - 2.1.4.2 Cambios en la Conductividad con Diferentes Proporciones de Componentes
 - 2.1.4.3 Ventajas de las Aplicaciones Conductivas en Equipos Eléctricos
 - 2.1.5 Buena Conductividad Térmica
 - 2.1.5.1 Principios Básicos de la Conductividad Térmica y Mecanismo de Conducción Térmica
 - 2.1.5.2 Relación entre la Conductividad Térmica y el Efecto de Disipación de Calor
 - 2.1.5.3 Valor de Aplicación de la Conductividad Térmica en Entornos de Trabajo de Alta Temperatura
 - 2.1.6 Resistencia a la Corrosión y Mecanismo
 - 2.1.6.1 Influencia de Diferentes Entornos de Corrosión
 - 2.1.6.2 Mecanismo Interno de la Resistencia a la Corrosión
 - 2.1.6.3 Medios Técnicos para Mejorar la Resistencia a la Corrosión
- 2.2 Efecto de la Proporción de Componentes en las Propiedades de la Aleación de Wolframio-Cobre
 - 2.2.1 Efecto en las Propiedades Mecánicas
 - 2.2.1.1 Efecto en la Dureza
 - 2.2.1.2 Impacto en la Resistencia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2.2.1.3 Impacto en la Dureza a la Fractura
- 2.2.2 Impacto en las Propiedades Físicas
 - 2.2.2.1 Impacto en la Densidad
 - 2.2.2.2 Efecto en el Punto de Fusión
 - 2.2.2.3 Influencia en el Coeficiente de Expansión Térmica
 - 2.2.2.4 Efecto en la Conductividad Eléctrica
 - 2.2.2.5 Efecto en la Conductividad Térmica
- 2.2.3 Impacto en las Propiedades Químicas
 - 2.2.3.1 Efecto en la Resistencia a la Corrosión
 - 2.2.3.2 Efecto en la Resistencia a la Oxidación de Alta Temperatura
- 2.3 Hoja de Seguridad de Datos (MSDS) de la Aleación de Wolframio-Cobre de CTIA GROUP LTD

Capítulo 3 Correlación entre Microestructura y Propiedades de la Aleación de Wolframio-Cobre

- 3.1 Perspectivas sobre las Características Microestructurales de la Aleación de Wolframio-Cobre
 - 3.1.1 Morfología y Tamaño de los Granos
 - 3.1.2 Distribución de Fases e Interfaz
 - 3.1.3 Porosidad y Manifestación de Defectos
 - 3.1.4 Diferencias Estructurales bajo Diferentes Procesos de Preparación
- 3.2 Relación Intrínseca entre la Microestructura y el Rendimiento de la Aleación de Wolframio-Cobre
 - 3.2.1 Mecanismo del Efecto de la Estructura de Granos en la Resistencia
 - 3.2.2 Mecanismo del Efecto de la Estructura de Granos en la Dureza a la Fractura
 - 3.2.3 Correlación entre la Distribución de Fases y la Conductividad Eléctrica
 - 3.2.4 Correlación entre la Distribución de Fases y la Conductividad Térmica
 - 3.2.5 Efecto de Porosidades y Defectos en la Dureza
 - 3.2.6 Efecto de Porosidades y Defectos en la Resistencia a la Corrosión
- 3.3 Evolución de la Microestructura de la Aleación de Wolframio-Cobre
 - 3.3.1 Evolución Causada por Cambios en las Proporciones de Composición
 - 3.3.2 Transformación Estructural durante el Tratamiento Térmico
 - 3.3.3 Retroalimentación del Entorno de Uso en la Estructura
 - 3.3.4 Retroalimentación del Entorno de Uso en el Rendimiento
- 3.4 Estrategia de Control de la Microestructura de la Aleación de Wolframio-Cobre
 - 3.4.1 Métodos de Control Basados en el Proceso de Preparación
 - 3.4.2 Métodos de Optimización de Adición de Elementos de Aleación
 - 3.4.3 Relación entre la Regulación Estructural y el Rendimiento

Capítulo 4 Tecnología de Preparación de la Aleación de Wolframio-Cobre

- 4.1 Preparación de la Aleación de Wolframio-Cobre por Infiltración al Vacío
 - 4.1.1 Principio de Infiltración de Fusión y Requisitos de Equipos
 - 4.1.2 Pasos del Proceso y Optimización de Parámetros
 - 4.1.3 Ventajas y Limitaciones del Proceso

Capítulo 5 Métodos de Prueba de Rendimiento y Caracterización de la Aleación de Wolframio-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cobre

5.1 Prueba de Propiedades Físicas de la Aleación de Wolframio-Cobre

5.1.1 Método de Prueba de Densidad

5.1.2 Normas y Operaciones de Prueba de Dureza

5.1.3 Método de Prueba de Conductividad Eléctrica

5.1.4 Método de Prueba de Conductividad Térmica

5.2 Evaluación de Propiedades Químicas de la Aleación de Wolframio-Cobre

5.2.1 Entorno y Métodos de Prueba de Resistencia a la Corrosión

5.2.2 Método de Prueba de Rendimiento Antioxidante

5.3 Tecnología de Caracterización de la Microestructura de la Aleación de Wolframio-Cobre

5.3.1 Método de Observación con Microscopio Metalográfico

5.3.2 Aplicación del Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido

5.3.3 Análisis de Estructura por Difracción de Rayos X

Capítulo 6 Múltiples Campos de Aplicación de la Aleación de Wolframio-Cobre

6.1 Aplicación de la Aleación de Wolframio-Cobre en el Área Eléctrica

6.1.1 Aplicación en Interruptores de Potencia de Baja Tensión

6.1.1.1 Requisitos de Rendimiento para Materiales de Componentes Nucleares de Interruptores de Potencia de Baja Tensión

6.1.1.2 Aplicación de la Aleación de Wolframio-Cobre en Componentes de Contacto

6.1.1.3 Efecto de la Aplicación en la Vida Útil de Interruptores de Potencia de Baja Tensión

6.1.2 Aplicación en Interruptores de Alta Tensión

6.1.2.1 Entorno de Trabajo de Interruptores de Alta Tensión y Normas de Tolerancia de Materiales de Componentes Nucleares

6.1.2.2 La Aleación de Wolframio-Cobre Cumple con los Requisitos de Rendimiento de Interruptores de Alta Tensión

6.1.2.3 Diferencias de Aplicación de la Aleación de Wolframio-Cobre en Interruptores de Alta Tensión de Diferentes Niveles de Tensión

6.1.3 Aplicación en Relés e Interruptores de Circuito de Aire

6.1.3.1 Requisitos de Resistencia al Desgaste de Materiales de Relés y Adecuación de la Aleación de Wolframio-Cobre

6.1.3.2 Ubicación de Instalación y Realización de Funciones de la Aleación de Wolframio-Cobre en Relés

6.1.3.3 Requisitos de Rendimiento de Materiales para el Sistema de Extinción de Arco de Interruptores de Circuito de Aire

6.1.3.4 Principio de Aplicación de la Aleación de Wolframio-Cobre en la Cámara de Extinción de Arco de Interruptores de Circuito de Aire

6.1.3.5 Criterios de Selección de la Aleación de Wolframio-Cobre en Relés e Interruptores de Circuito de Aire

6.1.4 Aplicación en Separadores y Interruptores de Tierra

6.1.4.1 Requisitos de Resistencia a la intemperie para Materiales de Separadores en Entornos de Exposición a Largo Plazo

6.1.4.2 Diseño de Aplicación de la Aleación de Wolframio-Cobre en la Parte de Contacto Conductiva de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Separadores

6.1.4.3 Requisitos de Resistencia y Conductividad de Materiales para Interruptores de Tierra cuando Están Sometidos a Corrientes de Cortocircuito

6.1.4.4 Mecanismo de la Aleación de Wolframio-Cobre para Garantizar el Funcionamiento Seguro de Interruptores de Tierra

6.1.4.5 Criterios de Selección de la Aleación de Wolframio-Cobre en Separadores e Interruptores de Tierra

6.2 Aplicación de la Aleación de Wolframio-Cobre en el Área Electrónica

6.2.1 Requisitos de Rendimiento de Electrodo de EDM y Ventajas de la Aleación de Wolframio-Cobre

6.2.1.1 Requisitos de Índice de Rendimiento para Materiales de Electrodo en Procesos de EDM

6.2.1.2 Diferentes Requisitos de Rendimiento de Electrodo en Diferentes Escenarios de Procesamiento

6.2.1.3 Análisis de la Compatibilidad de la Aleación de Wolframio-Cobre en Términos de Conductividad y Resistencia al Desgaste

6.2.1.4 Ventajas de Rendimiento en Comparación con Materiales de Electrodo Tradicionales

6.2.1.5 Criterios de Selección de Electrodo de Aleación de Wolframio-Cobre en Equipos Comunes de EDM

6.2.2 Papel en la Microelectrónica

6.2.2.1 Requisitos de Precisión y Estabilidad de Materiales para Dispositivos de Microelectrónica

6.2.2.2 Aplicación de la Aleación de Wolframio-Cobre en el Empaquetado de Microelectrónica

6.2.2.3 Mecanismos para Mejorar la Eficiencia de Disipación de Calor y la Vida Útil de Dispositivos de Microelectrónica

6.2.2.4 Diseño de Estructura de Montaje en Módulos de Empaquetado de Chips

6.2.2.5 Requisitos de Pureza y Microestructura de Aleaciones de Wolframio-Cobre en el Área de Microelectrónica

6.2.3 Aplicación en el Área de Sensores

6.2.3.1 Requisitos de Rendimiento de Materiales para el Entorno de Trabajo de Sensores

6.2.3.2 Aplicaciones Potenciales de la Aleación de Wolframio-Cobre en Elementos Sensores de Sensores

6.2.3.3 Diseño de Aplicación de Componentes de Disipación de Calor de Sensores Basados en Alta Conductividad Térmica

6.3 Aplicación de la Aleación de Wolframio-Cobre en el Área Aeroespacial

6.3.1 Aplicación en el Revestimiento de la Garganta de Boquillas de Cohetes Sólidos

6.3.1.1 Entorno de Trabajo del Revestimiento de la Garganta de Boquillas de Cohetes Sólidos

6.3.1.2 Requisitos de Propiedades de Materiales para el Revestimiento de la Garganta de Boquillas

6.3.1.3 Rendimiento de la Aleación de Wolframio-Cobre para Cumplir con los Requisitos del Revestimiento de la Garganta de Boquillas

6.3.1.4 Proceso de Formación y Diseño Estructural de la Aleación de Wolframio-Cobre en el Revestimiento de la Garganta de Boquillas

6.3.1.5 Mejora de la Vida Útil del Revestimiento de la Garganta de Boquillas después de Usar la Aleación de Wolframio-Cobre

6.3.2 Aplicaciones Potenciales en Componentes de Motores de Aviación

6.3.2.1 Características del Entorno de Trabajo de Componentes Clave de Motores de Aviación

6.3.2.2 Requisitos de Propiedades de Materiales para Componentes de Motores de Aviación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.3.2.3 Aplicación de la Aleación de Wolframio-Cobre en Partes de Alta Temperatura de Motores de Aviación
- 6.3.2.4 Dirección de Optimización de Rendimiento de la Aleación de Wolframio-Cobre para Aplicaciones en Motores de Aviación
- 6.3.3 Aplicación en Sistemas Eléctricos de Naves Espaciales
 - 6.3.3.1 Entorno de Trabajo y Requisitos de Confiabilidad de Sistemas Eléctricos de Naves Espaciales
 - 6.3.3.2 Requisitos de Propiedades de Materiales para Componentes Nucleares de Sistemas Eléctricos de Naves Espaciales
 - 6.3.3.3 Aplicación de la Aleación de Wolframio-Cobre en Contactos de Contactores de Naves Espaciales
 - 6.3.3.4 Aplicación de la Aleación de Wolframio-Cobre en Componentes de Extinción de Arco de Interruptores de Circuito de Naves Espaciales
 - 6.3.3.5 La Aleación de Wolframio-Cobre Juega un Papel Importante en Garantizar la Estabilidad y Vida Útil de Sistemas Eléctricos de Naves Espaciales
 - 6.3.3.6 Normas de Selección de Materiales y Requisitos de Control de Calidad para Aleaciones de Wolframio-Cobre en Aplicaciones de Naves Espaciales
- 6.4 Aplicación en Otros Campos
 - 6.4.1 Escenarios de Aplicación en la Industria Metalúrgica
 - 6.4.2 Casos de Uso en Equipos Deportivos
 - 6.4.3 Exploración en el Área de Dispositivos Médicos
 - 6.4.4 Perspectivas de Aplicación en el Área de Energía Nuclear

Capítulo 7 Tendencia de Desarrollo Futuro de la Aleación de Wolframio-Cobre

- 7.1 Exploración de Nuevas Tecnologías de Preparación de la Aleación de Wolframio-Cobre
 - 7.1.1 Aplicaciones Potenciales de la Tecnología de Fabricación Aditiva
 - 7.1.2 Perspectiva de Otras Tecnologías de Preparación de Vanguardia
- 7.2 Dirección de Investigación de Optimización de Rendimiento de la Aleación de Wolframio-Cobre
 - 7.2.1 Direcciones de Investigación para Mejorar el Rendimiento Integral
 - 7.2.2 Mejora de Rendimiento en Escenarios de Aplicación Específicos

Apéndice

- Apéndice A Norma Nacional de China para la Aleación de Wolframio-Cobre
- Apéndice B Norma Internacional para la Aleación de Wolframio-Cobre
- Apéndice C Normas para la Aleación de Wolframio-Cobre en
- Apéndice D Explicación Detallada de la Terminología de la Aleación de Wolframio-Cobre
- Referencias



CTIA GROUP LTD Aleación de cobre y tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm³)	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 Alloys

Power Equipment: Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

Electronics and Semiconductor Industry: Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

Electrical Discharge Machining (EDM): Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

Aerospace and Defense: High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 1 Introducción

1.1 Descripción general de la aleación de cobre y tungsteno

Como material compuesto formado por tungsteno y cobre, la aleación de tungsteno y cobre combina las ventajas fundamentales de ambos metales y ocupa una posición irremplazable en el campo industrial. El alto punto de fusión del tungsteno (3422 °C), su alta resistencia, alta dureza y excelente resistencia al desgaste complementan la alta conductividad eléctrica, alta conductividad térmica y buena plasticidad del cobre, haciendo que la aleación de cobre y tungsteno sea capaz de soportar la prueba de entornos de alta temperatura y mantener una conductividad eléctrica y térmica estable. Por lo tanto, se utiliza ampliamente en muchos campos clave como la electrónica, la electricidad, la industria aeroespacial y la defensa nacional.

Desde la perspectiva de las propiedades del material, el rendimiento de [la aleación de tungsteno y cobre](#) no es una simple superposición de "tungsteno + cobre", sino que a través de una relación de composición y un proceso de preparación razonables, el rendimiento se optimiza y se equilibra. Por ejemplo, en un entorno de alta temperatura, la estructura esquelética del tungsteno puede brindar soporte a la aleación y resistir la deformación a alta temperatura, mientras que el cobre puede conducir rápidamente el calor a través de su propia conductividad térmica para evitar el sobrecalentamiento local; En escenarios conductores, se puede aprovechar la ventaja conductora del cobre, y la adición de tungsteno mejora la resistencia general de la aleación, evitando el problema de que el cobre puro se desgaste y deforme fácilmente. Esta característica de "fuerte combinación" hace que la aleación de tungsteno y cobre sea un material ideal para afrontar condiciones de trabajo complejas.

Con el continuo desarrollo de la tecnología industrial, los requisitos de rendimiento de los materiales son cada vez más estrictos y la investigación y la aplicación de aleaciones de cobre y tungsteno también continúan profundizándose. Desde el modelo básico inicial hasta las aleaciones de proporción especial personalizadas para diferentes escenarios, su alcance de aplicación se expande constantemente y su rendimiento satisface con mayor precisión diversas necesidades industriales. A continuación, profundizaremos en esta aleación especial desde dos aspectos: definición y composición.

1.1.1 Definición de aleación de cobre y tungsteno

La aleación de cobre y tungsteno se refiere a una pseudoaleación (es decir, dos metales que son inmiscibles en estado sólido y forman un material compuesto unido mecánicamente) hecha de tungsteno (W) y cobre (Cu) como componentes principales a través de procesos como la pulvimetalurgia. A diferencia de los metales individuales tradicionales o las aleaciones completamente miscibles, en la aleación de cobre y tungsteno, el tungsteno y el cobre existen en forma de una mezcla física: el tungsteno forma una estructura de esqueleto continua y el cobre llena los poros del esqueleto de tungsteno. Ambos se combinan a través de la interfaz para formar un todo. Por lo tanto, conserva el alto punto de fusión, alta resistencia, alta dureza y resistencia al desgaste del tungsteno, y tiene la alta conductividad eléctrica, alta conductividad térmica y buena plasticidad del cobre, logrando las características de "resistencia a

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

altas temperaturas y conductividad eléctrica y térmica" y "equilibrio entre alta resistencia y fácil procesamiento". Desde el núcleo de la definición, la clave de la aleación de cobre y tungsteno radica en las "ventajas compuestas" y la "dependencia del proceso". Por un lado, su rendimiento está determinado por el efecto sinérgico del tungsteno y el cobre: por ejemplo, en el mecanizado por electrochispa, la alta conductividad de la aleación de cobre y tungsteno garantiza que el electrodo pueda transmitir corriente de manera eficiente, mientras que el alto punto de fusión del tungsteno evita que el electrodo se derrita en una descarga de chispa de alta temperatura; En los componentes de disipación de calor, la conductividad térmica del cobre es responsable de la rápida disipación del calor, y la alta resistencia del tungsteno garantiza que los componentes no se deformen fácilmente durante la instalación y el uso. Por otra parte, su definición también incluye la dirección del proceso de preparación: dado que el tungsteno y el cobre no son miscibles en estado sólido, no se pueden producir mediante fundición y se debe utilizar metalurgia de polvos (como prensado, sinterización, infiltración, etc.). Esta también se ha convertido en una de las características importantes que distinguen la aleación de cobre y tungsteno de otras aleaciones.

Esta definición no solo aclara la composición y estructura de la aleación de cobre y tungsteno, sino que también revela sus características "personalizadas": al ajustar la relación de contenido de tungsteno y cobre, se pueden preparar aleaciones con diferentes propiedades (como aleaciones con alto contenido de tungsteno enfocadas en la resistencia a altas temperaturas y alta resistencia, y aleaciones con alto contenido de cobre enfocadas en la conductividad eléctrica y conductividad térmica), a fin de satisfacer las necesidades personalizadas de diferentes campos, como empaquetado electrónico, interruptores de alto voltaje y motores aeroespaciales. Por lo tanto, la definición de aleación de cobre y tungsteno no es solo una descripción de su composición material, sino también un resumen de su característica principal de "la estructura determina el rendimiento y el rendimiento se adapta a la escena".

1.1.2 Composición de la aleación

La aleación de cobre y tungsteno se basa en tungsteno (W) y cobre (Cu), de los cuales el contenido de tungsteno suele estar entre el 50% y el 90% (fracción de masa), y el contenido de cobre es del 10% al 50%. La relación específica debe determinarse de acuerdo con los requisitos de rendimiento del escenario de aplicación. Además de los dos componentes principales de tungsteno y cobre, algunas aleaciones de tungsteno y cobre para propósitos especiales agregarán trazas de otros elementos como componentes auxiliares para optimizar el rendimiento de formación o funciones específicas del material, pero el contenido de estos elementos auxiliares generalmente no excede el 1%, por lo que no cambiará la estructura del componente central de "tungsteno-cobre".

Desde la perspectiva del papel de los componentes principales, el tungsteno, como metal de alto punto de fusión (punto de fusión 3422 °C), es el principal proveedor de resistencia de aleación, dureza, resistencia a altas temperaturas y resistencia al desgaste. Cuanto mayor sea el contenido de tungsteno, mayor será el punto de fusión de la aleación, mayor será la resistencia y dureza y mejor la resistencia a altas temperaturas. más de 800 MPa y puede mantener la estabilidad estructural en un entorno de alta temperatura superior a 1000 °C, lo que es adecuado para componentes de alta temperatura de motores aeroespaciales. El cobre, como metal altamente conductor y térmicamente conductor, es el principal

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

responsable de darle a la aleación conductividad eléctrica, conductividad térmica y cierta plasticidad. Cuanto mayor sea el contenido de cobre, mejor será la conductividad eléctrica y térmica de la aleación y mejor será el rendimiento del procesamiento. Por ejemplo, una aleación de cobre y tungsteno con un contenido de cobre del 50% tiene una conductividad de más de 40×10^6 S/m, lo que es adecuado como electrodo de disipación de calor en envases electrónicos. La adición de componentes auxiliares es para mejorar el rendimiento del proceso o compensar la deficiencia de los componentes principales. Por ejemplo, agregar trazas de níquel (Ni) puede mejorar la fuerza de unión entre las partículas de tungsteno y las fases de cobre, evitando el problema de separación del esqueleto de tungsteno y la fase de cobre cuando la aleación se somete a fuerza; Agregar una pequeña cantidad de hierro (Fe) o cobalto (Co) puede mejorar el rendimiento de prensado del polvo de tungsteno, lo que facilita que la aleación obtenga una estructura densa durante el proceso de moldeo. Sin embargo, la adición de componentes auxiliares debe controlarse estrictamente en proporción, de lo contrario puede afectar el rendimiento de los componentes principales: por ejemplo, el exceso de níquel reducirá la conductividad eléctrica y térmica de la aleación, y el exceso de hierro puede aumentar la fragilidad de la aleación.

En general, la composición de la aleación de tungsteno y cobre es un ejemplo típico de "el componente principal determina el rendimiento del núcleo y el componente auxiliar optimiza el proceso y los detalles". Al ajustar la relación tungsteno-cobre, se pueden controlar con precisión la resistencia, la conductividad eléctrica y térmica y la resistencia a altas temperaturas de la aleación, lo que la hace adecuada para una variedad de escenarios, desde el envasado electrónico hasta la defensa nacional y la industria militar; Además, la adición de oligoelementos auxiliares mejora aún más la practicidad y la estabilidad de la aleación, lo que permite que este material compuesto satisfaga mejor las complejas necesidades de la industria.

1.2 Origen histórico y proceso de desarrollo de la aleación de cobre y tungsteno

1.2.1 Exploración temprana

La aleación de tungsteno y cobre se remonta a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. La investigación en esta etapa no tuvo como objetivo la "aleación de tungsteno y cobre", sino que se originó a partir del estudio separado de las propiedades de los metales tungsteno y cobre y el intento inicial de materiales compuestos. En ese momento, la revolución industrial impulsó la demanda de materiales de alta resistencia y alta conductividad. Se prestó atención al tungsteno por su alto punto de fusión y alta resistencia (especialmente en el campo de los filamentos de lámparas incandescentes), y el cobre se convirtió en el material central de la industria eléctrica por su excelente conductividad eléctrica y térmica. Sin embargo, los defectos de ambos metales fueron apareciendo gradualmente: el tungsteno puro era frágil y difícil de procesar, y el cobre puro tenía poca resistencia y poca resistencia a las altas temperaturas. La gente empezó a pensar en "si las ventajas de los dos metales se pueden combinar al combinarlos".

Las primeras exploraciones fueron principalmente ensayos de laboratorio a pequeña escala y los medios técnicos eran relativamente primitivos. Alrededor de 1900, investigadores de materiales alemanes y estadounidenses mezclaron mecánicamente por primera vez polvo de tungsteno y polvo de cobre y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fabricaron el primer "bloque compuesto de tungsteno y cobre" mediante prensado y sinterización simples. Aunque no se formó un proceso estable, se verificó la viabilidad del "compuesto de tungsteno y cobre". Sin embargo, el rendimiento del producto en esta etapa fue extremadamente pobre: la combinación de tungsteno y cobre estaba suelta, la resistencia mecánica era insuficiente y la conductividad eléctrica y térmica no cumplió con las expectativas. Además, debido a la falta de un control preciso del tamaño de las partículas de polvo y de la temperatura de sinterización, la tasa de rendimiento fue extremadamente baja y se mantuvo solo en el nivel de verificación teórica y no entró en la aplicación práctica.

Lo que realmente impulsó la exploración inicial hacia la orientación a las aplicaciones fueron las necesidades de las industrias militar y eléctrica. En la década de 1920, con el desarrollo de la tecnología de radio y la fabricación de artillería, se necesitaba un material que pudiera soportar altas temperaturas instantáneas y conducir electricidad al mismo tiempo (como los electrodos de los dispositivos de ignición eléctrica de la artillería). El cobre puro se derrite fácilmente a altas temperaturas y el tungsteno puro no es lo suficientemente conductor. Los investigadores volvieron a centrar su atención en los compuestos de tungsteno y cobre. Alrededor de 1925, General Electric Company de los Estados Unidos fabricó el primer lote de productos de tungsteno y cobre que podían usarse para electrodos simples mejorando el proceso de mezcla de polvo (por ejemplo, aumentando el tiempo de molienda de bolas para refinar el polvo). Aunque el rendimiento todavía era inestable, fue la primera vez que se "reemplazaba el tungsteno puro o el cobre puro en escenarios específicos", convirtiéndose en el punto de partida para que las aleaciones de tungsteno y cobre pasaran del laboratorio al uso práctico. Aunque la exploración en esta etapa no formó un sistema técnico sistemático, sentó dos bases para la investigación posterior: primero, aclaró la dirección central de "los compuestos de tungsteno y cobre pueden equilibrar la resistencia y la conductividad eléctrica y térmica"; En segundo lugar, acumuló experiencia preliminar en mezcla, prensado y sinterización de polvos.

1.2.2 Nodos clave de innovación tecnológica

La aleación de tungsteno y cobre es inseparable de una serie de avances tecnológicos clave, que han impulsado su transformación de "muestras de laboratorio" a "materiales industriales".

El primer nodo clave apareció en la década de 1940. La madurez del proceso de infiltración resolvió el problema central de la "unión floja entre el tungsteno y el cobre". El proceso de sinterización anterior dificultaba la combinación completa del tungsteno y el cobre, mientras que el proceso de infiltración (presinterización del esqueleto de tungsteno y luego infiltración de cobre fundido en sus poros) mejoraba enormemente la densidad del material. En 1943, para resolver el problema de resistencia a altas temperaturas de los electrodos de ignición de las ametralladoras de los aviones, el ejército de los EE. UU. optimizó conjuntamente el proceso de infiltración con instituciones de investigación científica: al controlar la porosidad del esqueleto de tungsteno (ajustada al 20% ~ 30%) y la temperatura de fusión del cobre (con una precisión de 1100 ~ 1200 °C), la densidad de la aleación de tungsteno y cobre se incrementó a más del 95% y la resistencia y la conductividad aumentaron en un 40% en comparación con antes. Se utilizó con éxito en el sistema de encendido de ametralladoras de aviones. Esta fue la primera vez que una aleación de tungsteno y cobre se utilizó en la práctica a gran escala.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El segundo nodo clave fue el refinamiento de la tecnología de la pulvimetalurgia en la década de 1960. Con la aparición de los microscopios electrónicos y los equipos de control de temperatura de precisión, los investigadores pueden controlar con precisión el tamaño de partícula del polvo de tungsteno y del polvo de cobre (desde las primeras 100 mallas hasta más de 500 mallas) y la atmósfera de sinterización (introduciendo protección de gas inerte para evitar la oxidación). En 1962, Sumitomo Metal de Japón desarrolló el proceso de "sinterización al vacío con polvo ultrafino", que hizo que las partículas de tungsteno en la aleación de tungsteno y cobre se distribuyeran de manera más uniforme y la fase de cobre se llenara de manera más completa. No solo las propiedades mecánicas (la resistencia a la compresión superó los 600 MPa) y la conductividad eléctrica (la conductividad alcanzó más del 60% del cobre puro) fueron estables, sino que también se logró el procesamiento de productos de formas complejas (como láminas delgadas y electrodos de formas especiales), promoviendo su expansión desde el campo militar a la industria electrónica (como el disipador de calor de los primeros transistores).

El tercer nodo clave fue la introducción del concepto de "personalización funcional" en la década de 1980. Anteriormente, las aleaciones de tungsteno y cobre se basaban principalmente en una única proporción y las necesidades de los diferentes campos variaban enormemente: el campo aeroespacial requiere un tipo resistente a altas temperaturas con un alto contenido de tungsteno (más del 80%), y el campo de la electrónica requiere un tipo de alta conductividad con un alto contenido de cobre (más del 50%). En 1985, el Instituto de Investigación de Metales No Ferrosos de Beijing en China estableció un "modelo de correspondencia de rendimiento de relación tungsteno-cobre" para lograr una composición personalizada según la demanda: al ajustar la relación de gradiente del contenido de tungsteno del 50% al 90%, combinado con los parámetros de proceso correspondientes, la resistencia, la conductividad y la resistencia al calor de la aleación se pueden controlar con precisión. Este avance ha transformado las aleaciones de tungsteno y cobre de "materiales generales" a "materiales adaptables a distintos escenarios", y su rango de aplicación se ha expandido rápidamente.

1.2.3 Tendencias modernas de desarrollo

Al entrar en el siglo XXI, el desarrollo de aleaciones de tungsteno y cobre ha mostrado tres tendencias principales: "rendimiento extremo, aplicaciones diversificadas y procesos inteligentes", convirtiéndose en uno de los materiales clave en el campo de la fabricación de alta gama. El rendimiento extremo es la dirección central del desarrollo moderno. Se ha actualizado continuamente: a través de la tecnología de preparación de nanopulvos (como la molienda de bolas de plasma), el tamaño de partícula del polvo de tungsteno se puede controlar dentro de los 100 nanómetros y la interfaz con el cobre es más cercana. La conductividad del último producto ha alcanzado más del 85% del cobre puro y la resistencia a la compresión ha superado los 1000 MPa, superando ampliamente el nivel del siglo XX; En términos de resistencia a altas temperaturas, las aleaciones de tungsteno y cobre con alto contenido de tungsteno (90%) pueden mantener la estabilidad estructural a 1200 °C y, al agregar fases de refuerzo como el grafeno, la resistencia al desgaste aumenta en más del 30%, satisfaciendo las necesidades de escenarios extremos como la estación base de comunicaciones móviles de quinta generación y la cámara de combustión del motor aeroespacial. La diversificación de aplicaciones se refleja en la extensión desde los campos tradicionales a los campos emergentes de alta gama. Tradicionalmente, las aleaciones de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cobre y tungsteno se utilizan principalmente para contactos eléctricos, electrodos, etc., pero ahora se han ampliado a: empaquetado de chips (como sustrato de disipación de calor para chips de alta potencia, utilizando alta conductividad térmica para eliminar rápidamente el calor), vehículos de nueva energía (contactos conductores de relés de alto voltaje integrados, que pueden soportar altas corrientes y erosión por arco) y dispositivos experimentales de fusión nuclear (como materiales desviadores para resistir la erosión del plasma a alta temperatura). Según datos de la industria, desde 2020, la tasa de crecimiento anual de la demanda mundial de aleaciones de cobre y tungsteno en el campo de los semiconductores ha superado el 25%, convirtiéndose en un nuevo polo de crecimiento.

La tecnología inteligente es la base técnica que sustenta el desarrollo moderno. La producción tradicional de aleaciones de cobre y tungsteno se basa en la experiencia manual, pero ahora todo el proceso es controlable a través de "gemelos digitales" y líneas de producción automatizadas: desde el monitoreo del tamaño de partícula en línea en la etapa de mezcla de polvo, hasta la regulación de temperatura y presión en tiempo real en el proceso de sinterización, hasta pruebas no destructivas del rendimiento del producto terminado, todo se puede completar a través de sistemas inteligentes; La introducción de la tecnología de impresión 3D ha roto las limitaciones del moldeo: en 2022, el Instituto Fraunhofer en Alemania utilizó la tecnología de impresión 3D de metal para imprimir directamente componentes de disipación de calor de cobre y tungsteno con canales de flujo internos complejos. Las estructuras que no se pueden lograr con procesos tradicionales se pueden producir en masa, proporcionando nuevas soluciones para componentes integrados y con formas especiales.

Al mismo tiempo, el desarrollo moderno también enfrenta desafíos: como recurso estratégico, el tungsteno tiene grandes fluctuaciones de precios, lo que ha promovido el desarrollo de la tecnología de "reciclaje y reutilización de aleaciones de cobre y tungsteno" (la tasa de reciclaje actual ha alcanzado más del 80%); La competencia de materiales alternativos (como la cerámica de carburo de silicio y los materiales compuestos de cobre y aluminio) también ha obligado a las aleaciones de cobre y tungsteno a mantener sus ventajas mediante mejoras de rendimiento. En general, impulsadas por la demanda de fabricación de alta gama, las aleaciones de cobre y tungsteno están cambiando de "materiales auxiliares" a "materiales centrales", y su desarrollo está profundamente ligado a las innovaciones en ciencia y tecnología de vanguardia, y todavía hay un amplio margen para avances en el futuro.



CTIA GROUP LTD Aleación de cobre y tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 2 Características de la aleación de cobre y tungsteno

2.1 Análisis de las características de la aleación de cobre-tungsteno

La aleación de cobre y tungsteno tiene su origen en su estructura y composición compuesta únicas. No simplemente hereda las propiedades individuales del tungsteno y el cobre, sino que forma una serie de propiedades equilibradas y prácticas a través de la sinergia de ambos. Desde una perspectiva macroscópica, tiene una buena conductividad eléctrica y térmica similar a la de los metales, y una resistencia mecánica suficiente para hacer frente a condiciones de trabajo complejas; Desde una perspectiva de aplicación, el núcleo de sus características radica en el "equilibrio": encontrar el punto crítico entre dureza y tenacidad, resistencia a altas temperaturas y conductividad eléctrica y térmica para adaptarse a las necesidades industriales, lo que le permite desempeñar un papel en una variedad de escenarios con propiedades de material exigentes. Ya sea en piezas mecánicas que requieren fricción frecuente o en equipos eléctricos que enfrentan altas temperaturas y choques de corriente al mismo tiempo, las características de la aleación de cobre y tungsteno pueden reflejarse específicamente.

2.1.1 Mecanismo de formación de alta dureza y ventajas

La aleación de cobre y tungsteno es su característica distintiva que la distingue del cobre puro y de la mayoría de las aleaciones de cobre. La formación de esta característica está estrechamente relacionada con el efecto sinérgico de la estructura interna y también proporciona una base para su aplicación en escenarios de resistencia al desgaste. A diferencia de las propiedades blandas del cobre puro, la dureza de la aleación de cobre y tungsteno no proviene del fortalecimiento de un solo componente, sino de la optimización del rendimiento lograda a través del diseño estructural. Esto le permite mantener cierta plasticidad al tiempo que resiste la deformación causada por la fricción externa y la extrusión, lo que lo convierte en un material práctico y duradero.

2.1.1.1 Mecanismo microestructural

tungsteno proviene de su microestructura de "relleno de esqueleto". Dentro de la aleación, el tungsteno existe en forma de esqueleto continuo, que tiene una alta dureza inherente. Estas partículas de tungsteno están interconectadas para formar una red de soporte rígida en todo el material, al igual que el esqueleto de acero de un edificio, proporcionando soporte de dureza básico para la aleación. El cobre, como fase de relleno, se distribuye uniformemente en los poros del esqueleto de tungsteno. Aunque el cobre en sí tiene una dureza baja, su presencia no debilita la integridad del esqueleto de tungsteno; por el contrario, el cobre puede llenar los espacios entre las partículas de tungsteno, reducir los "puntos débiles" en la estructura del esqueleto y permitir que la presión externa se transmita al esqueleto de tungsteno a través de la fase de cobre, evitando daños estructurales causados por la concentración de tensión local.

Además, la unión de la interfaz entre el tungsteno y el cobre también tiene una influencia importante en la dureza. Durante el proceso de preparación, después del tratamiento adecuado, se formará una interfaz de unión estable entre las partículas de tungsteno y la fase de cobre. Esta unión puede evitar que las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

partículas de tungsteno se deslicen entre sí cuando se someten a fuerza, lo que fortalece aún más la rigidez de la estructura general. Por lo tanto, la alta dureza de la aleación de tungsteno y cobre no es el resultado de la acción de un solo componente, sino el resultado de la acción combinada del esqueleto rígido de tungsteno, el refuerzo de relleno de cobre y la unión de la interfaz. Esta microestructura le permite mantener la integridad estructural cuando se somete a fricción externa o extrusión.

2.1.1.2 Ventajas de las aplicaciones resistentes al desgaste

tungsteno muestra ventajas obvias en aplicaciones resistentes al desgaste. La esencia es que puede resistir la pérdida de superficie causada por la fricción a largo plazo y extender la vida útil de los componentes. En escenas que requieren contacto frecuente o movimiento relativo, la superficie del material es propensa a un desgaste gradual debido a la fricción, lo que eventualmente conduce a cambios en el tamaño del componente o fallas funcionales. su forma original y estabilidad dimensional durante mucho tiempo.

Al mismo tiempo, su ventaja en cuanto a resistencia al desgaste también se refleja en su adaptabilidad a las "fluctuaciones en las condiciones de fricción". En aplicaciones prácticas, el entorno de fricción a menudo no es constante y puede haber cambios de carga, fluctuaciones de temperatura, etc. La dureza de la aleación de cobre y tungsteno no disminuirá significativamente debido a ligeros aumentos de temperatura o cambios de carga, y puede continuar manteniendo la resistencia al desgaste en condiciones complejas. Por ejemplo, en algunas piezas de transmisión mecánica, incluso si están sujetas a diferentes grados de impacto de fricción durante mucho tiempo, sus superficies pueden permanecer planas y la precisión de la transmisión no se verá afectada por un desgaste excesivo, lo que extiende el ciclo de mantenimiento del equipo relacionado y reduce el costo y las pérdidas por tiempo de inactividad causadas por el reemplazo de componentes.

2.1.1.3 Comparación de dureza y ventajas con otras aleaciones

En comparación con el cobre puro y las aleaciones de cobre comunes, la ventaja de dureza de la aleación de cobre y tungsteno es muy obvia. El cobre puro tiene una textura suave y es propenso a deformarse en la superficie bajo una ligera fricción externa. Aunque la dureza de la mayoría de las aleaciones de cobre aumenta al agregar otros elementos, la dureza general sigue siendo "media a baja" y es difícil hacer frente a escenarios de fricción de alta intensidad. La aleación de cobre y tungsteno tiene una dureza mucho mayor que estos materiales debido a la presencia del esqueleto de tungsteno, y su grado de desgaste superficial será significativamente menor en las mismas condiciones de fricción.

En comparación con el tungsteno puro, la dureza de la aleación de cobre y tungsteno es ligeramente menor, pero tiene más ventajas en aplicaciones prácticas. Aunque el tungsteno puro tiene una dureza extremadamente alta, es frágil. Si se golpea ligeramente durante la fricción, es fácil que se rompa o se desprenda, lo que afecta la resistencia al desgaste. es más adecuado para el escenario compuesto de "fricción + impacto" que puede encontrarse en condiciones de trabajo reales. En comparación con algunas aleaciones a base de hierro, la dureza de la aleación de cobre y tungsteno puede no tener necesariamente una ventaja absoluta, pero es más competitiva en rendimiento además de la dureza. Las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aleaciones a base de hierro tienden a tener una conductividad eléctrica y térmica deficiente, mientras que la aleación de cobre y tungsteno puede mantener una alta dureza y al mismo tiempo tener una buena conductividad eléctrica y térmica, lo que la convierte en una opción irremplazable en escenarios donde se requieren tanto resistencia al desgaste como conductividad eléctrica (o conductividad térmica). Por ejemplo, en algunos componentes eléctricos que necesitan resistir la fricción de contacto y conducir la corriente, las aleaciones a base de hierro no pueden cumplir con los requisitos de conductividad eléctrica, mientras que las aleaciones de cobre y tungsteno pueden hacer ambas cosas.

2.1.2 Principio y rendimiento de la resistencia a la erosión por arco

La resistencia a la erosión del arco es una de las propiedades fundamentales de la aleación de cobre y tungsteno que se utiliza ampliamente en el campo eléctrico. En interruptores, relés y otros equipos de alto voltaje, inevitablemente se generan arcos cuando se enciende y se apaga la corriente. La alta temperatura y la energía del arco corroerán el material de contacto y provocarán fallas en los componentes. La aleación de cobre y tungsteno puede resistir eficazmente esta erosión y mantener un funcionamiento estable de los componentes a largo plazo debido a su composición y estructura únicas. Su resistencia a la erosión por arco no es el resultado de un solo factor, sino una manifestación de la influencia combinada de la composición del material, la microestructura y el mecanismo de acción del arco. También mostrará diferentes rendimientos debido a las diferencias en el entorno de uso, y hay una dirección clara para la optimización del rendimiento.

2.1.2.1 Mecanismo de erosión por arco

La erosión por arco se refiere al proceso de daño superficial y pérdida de materiales bajo la acción de un arco. Su principal fuerza impulsora proviene de la alta temperatura y energía liberada por el arco. Cuando se produce un arco, la temperatura local aumenta bruscamente, lo suficiente como para fundir o incluso evaporar la superficie del material; Al mismo tiempo, la fuerza eléctrica generada por el arco empujará las partículas de material fundido lejos de la superficie, formando pérdidas por salpicadura. Además, en un entorno de alta temperatura, el material también puede reaccionar químicamente con el medio circundante (como el oxígeno del aire) para generar sustancias frágiles, como óxidos, que se desprenden fácilmente bajo una acción mecánica o de arco posterior, lo que agrava aún más la erosión. Desde el punto de vista del proceso, la erosión por arco es un efecto compuesto de "daño térmico-pelado mecánico-degradación química": la alta temperatura primero destruye la integridad de la superficie del material, haciendo que el material de la superficie sea inestable; La fuerza eléctrica y el flujo de aire desprenden estas sustancias inestables; y la reacción química debilita la fuerza de unión de la superficie del material, haciendo más probable que la erosión continúe. Este mecanismo provocará que se formen gradualmente picaduras, grietas o deformaciones en la superficie del material, lo que en última instancia afectará la conductividad y la estabilidad estructural del componente.

2.1.2.2 Principio intrínseco de la resistencia a la erosión por arco

La aleación de tungsteno y cobre para resistir la erosión del arco se origina del efecto sinérgico del

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno y el cobre. Su principio interno se puede atribuir al triple mecanismo de "esqueleto resistente a altas temperaturas + disipación de calor eficiente + amortiguador autorreparador".

El tungsteno, como componente de alto punto de fusión, constituye el esqueleto rígido de la aleación. No se funde fácilmente por la alta temperatura del arco. Puede mantener la integridad de la estructura bajo la acción del arco y evitar daños a gran escala en la superficie. Al mismo tiempo, la presencia de tungsteno reduce la tasa de evaporación general del material y reduce la pérdida de material causada por las altas temperaturas.

El cobre, con su excelente conductividad térmica, conduce rápidamente el calor generado por el arco lejos del área de acción, evitando un aumento excesivo de la temperatura local, reduciendo así el grado de fusión y evaporación. Más importante aún, cuando la temperatura del arco es extremadamente alta, el cobre se derretirá antes que el tungsteno y el cobre fundido llenará los pequeños hoyos en la superficie, formando una "capa amortiguadora" temporal que puede absorber parte de la energía del arco y reducir el área del esqueleto de tungsteno directamente expuesto al arco, desempeñando así un papel protector.

Además, la fuerza de unión de la interfaz entre el tungsteno y el cobre es relativamente alta, lo que puede resistir el efecto de desgarro causado por la fuerza eléctrica del arco y reducir la pérdida por salpicadura de partículas de material. Este mecanismo interno de "resistencia al derretimiento del tungsteno, disipación del calor del cobre y antidesprendimiento sinérgico" permite que la aleación de tungsteno y cobre mantenga una buena integridad de la superficie bajo la acción repetida del arco.

2.1.2.3 Diferencias de rendimiento en distintos entornos de uso

La aleación de cobre y tungsteno no es estática y variará significativamente según los diferentes entornos de uso. Se ve afectado principalmente por factores como la temperatura ambiente, la composición de la atmósfera, la densidad de energía del arco y la carga mecánica.

En un entorno de alta temperatura, el entorno circundante ya tiene una temperatura base relativamente alta, lo que debilitará la eficiencia de disipación de calor del cobre, lo que dificultará que el calor en el área de acción del arco se difunda rápidamente, lo que puede intensificar la fusión y evaporación del material y acelerar la tasa de erosión.

En un ambiente con alto contenido de oxígeno o presencia de gases corrosivos (como dióxido de azufre y sulfuro de hidrógeno), la alta temperatura del arco provocará una reacción química más violenta entre el material y el gas, generando óxidos o sulfuros más frágiles, que son fáciles de desprender, acelerando así la erosión.

Cuando la densidad de energía del arco es alta (como en los escenarios de conmutación de alta corriente), incluso el alto punto de fusión del tungsteno no puede resistir completamente la alta temperatura instantánea, lo que puede provocar que el esqueleto de tungsteno se derrita parcialmente. En este momento, se mejorará el efecto amortiguador del cobre, pero el grado de erosión general seguirá siendo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mayor que el de los escenarios de arco de baja energía. Si hay vibración mecánica o presión al mismo tiempo, los productos de erosión en la superficie del material (como la capa solidificada probablemente después de la fusión) son más propensos a desprenderse debido a fuerzas externas, lo que expande aún más el área de daño y reduce la resistencia a la erosión del arco.

2.1.2.4 Formas de mejorar el rendimiento

La resistencia a la erosión del arco de la aleación de cobre y tungsteno, podemos comenzar desde tres aspectos: diseño del material, optimización del proceso y mejora de la función, y mejorar su capacidad para resistir el daño del arco a través de mejoras específicas. En el diseño de materiales, el equilibrio del rendimiento se puede optimizar ajustando la relación tungsteno-cobre: aumentar adecuadamente el contenido de tungsteno puede mejorar la estabilidad del esqueleto resistente a altas temperaturas y reducir la fusión a alta temperatura; Mientras que un contenido de cobre razonable puede garantizar la eficiencia de disipación del calor y evitar el sobrecalentamiento local. Para escenarios específicos de arco de alta energía, también se puede intentar agregar una pequeña cantidad de elementos antioxidantes de alto punto de fusión, que se pueden integrar en el esqueleto de tungsteno para mejorar su resistencia a la fusión y la oxidación sin reducir significativamente la conductividad térmica del cobre.

La optimización de procesos es un medio clave para mejorar el rendimiento. Al refinar el tamaño de partícula del polvo de tungsteno y del polvo de cobre, ambos se pueden distribuir de manera más uniforme en la microestructura, reduciendo los puntos débiles causados por la segregación de componentes locales; El uso de un proceso de sinterización al vacío o de sinterización con protección atmosférica puede reducir la porosidad dentro del material, mejorar la fuerza de unión de la interfaz tungsteno-cobre y reducir las salpicaduras de partículas bajo la acción del arco. Además, el tratamiento de fortalecimiento de la superficie del producto terminado (como la pulverización de plasma de un revestimiento resistente al desgaste) puede formar una barrera protectora adicional en la superficie para retrasar la erosión del sustrato por el arco. En términos de mejora funcional, al simular las condiciones reales de trabajo del arco, podemos diseñar una aleación de tungsteno y cobre con una "estructura de gradiente": el contenido de tungsteno en la superficie es mayor para mejorar la resistencia a la fusión y el contenido de cobre en el interior es mayor para garantizar la disipación del calor, de modo que el material puede desempeñar un papel específico a diferentes profundidades. Al mismo tiempo, desarrollamos tecnología de reciclaje y reutilización de aleaciones para extender la vida útil de los componentes reparando la superficie erosionada, lo que también mejora indirectamente la resistencia a la erosión del arco del material durante todo el ciclo de vida.

2.1.3 Análisis de las capacidades antiadherentes y antisoldantes

Las capacidades antiadhesivas y antisoldadura son propiedades cruciales de la aleación de cobre y tungsteno en escenarios de contacto mecánico y conexión eléctrica. La adhesión se refiere al fenómeno por el cual dos superficies de contacto están parcialmente unidas y son difíciles de separar bajo la acción de la presión o la temperatura; La soldadura es una adhesión más seria, lo que significa que la superficie de contacto se funde a alta temperatura y luego se enfría y solidifica para formar una conexión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

permanente. Ambas situaciones provocarán que los componentes se atasquen y fallen, y la aleación de cobre y tungsteno, con sus propias características, muestra ventajas obvias para resistir tales problemas. La base de su capacidad radica en reducir la "tendencia a la unión de la interfaz" de la superficie de contacto, lo que no solo evita la adhesión mecánica causada por la presión, sino que también previene la soldadura por fusión causada por la alta temperatura.

2.1.3.1 Causas de adherencia y soldadura

La causa de la adhesión está relacionada principalmente con el "estado de contacto de la superficie" y la "acción mecánica". Cuando las superficies de dos piezas están en estrecho contacto y bajo presión, las protuberancias microscópicas en la superficie de contacto se incrustarán entre sí. Si el material en sí tiene una plasticidad fuerte, las protuberancias pueden deformarse localmente y encajar entre sí. Al mismo tiempo, si la capa de óxido de la superficie o las impurezas se comprimen y destruyen, la superficie del metal fresco entrará en contacto directo, lo que generará una fuerza de adsorción debido a la difusión entre átomos y, eventualmente, conducirá a la adhesión local de la superficie de contacto. Es más probable que esta situación ocurra en escenarios con presión a largo plazo o movimiento relativo a baja velocidad.

La soldadura es el resultado de los efectos combinados de la "fusión a alta temperatura" y el "enfriamiento y solidificación". Cuando hay fuentes de calor, como arcos eléctricos, y altas temperaturas de fricción en la superficie de contacto, la superficie del material puede calentarse hasta un estado fundido y los metales fundidos en las dos superficies de contacto se mezclarán entre sí; A medida que la temperatura disminuye, los metales fundidos mezclados se solidifican, formando una conexión similar a la soldadura en la superficie de contacto. Además, si hay impurezas en la superficie de contacto (como residuos de aceite quemado), pueden formarse eutécticos de bajo punto de fusión a altas temperaturas, lo que promueve aún más la unión del metal fundido e intensifica el fenómeno de soldadura.

2.1.3.2 Rendimiento antiadherente

La aleación de cobre y tungsteno se refleja principalmente en el hecho de que no es fácil formar un enlace estable con otras partes en el estado de contacto. Incluso si ocurre un contacto breve, puede reducir el daño a la superficie durante la separación. cierta lubricidad (en relación al tungsteno puro), reduce el coeficiente de fricción durante el contacto y evita el agravamiento de la adsorción superficial debido al calor por fricción. Por lo tanto, en componentes con contacto de presión a largo plazo, la superficie de la aleación de cobre y tungsteno no es fácil de formar marcas de adhesión con el material correspondiente, y la fuerza requerida para la separación es menor, lo que puede mantener la integridad de la superficie de contacto.

En escenarios de contacto eléctrico, incluso si hay un ligero arco que provoca un aumento de la temperatura local, la aleación de cobre y tungsteno no es propensa a la adhesión debido a la fusión de la superficie. Esto se debe a que la conductividad térmica del cobre dispersará rápidamente el calor para evitar que la superficie continúe derritiéndose; Mientras que el alto punto de fusión del tungsteno evita

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la fusión de grandes áreas, lo que dificulta que la superficie de contacto forme una capa de unión estable y no se producirán daños por "desgarro" durante la separación.

2.1.3.3 Factores que afectan las capacidades antiadherentes y antisoldantes

La aleación de cobre y tungsteno no es fija y se verá afectada por el estado del propio material, las condiciones de contacto y los factores ambientales.

El estado de la superficie del propio material es un factor clave. Si hay impurezas como capas de óxido y manchas de aceite en la superficie, el acabado de la superficie se reducirá. Las impurezas pueden convertirse en "puntos de unión" para la adhesión bajo presión o alta temperatura, debilitando la capacidad antiadherente; Por el contrario, una superficie lisa que ha sido pulida tiene menos protuberancias microscópicas, un área de contacto más pequeña y un mejor rendimiento antiadherente. Además, la densidad de la aleación de cobre y tungsteno también tiene un impacto: los materiales con muchos poros internos son propensos a formar pequeños hoyos en la superficie, las impurezas son fáciles de depositar y es más probable que se produzca adhesión local.

La influencia de las condiciones de contacto se refleja principalmente en la presión, la temperatura y el movimiento relativo. Una presión excesiva aumentará la mordida microscópica de la superficie de contacto y promoverá la adhesión; La temperatura excesiva (incluso si no alcanza el punto de fusión) aumentará la tasa de difusión atómica y mejorará la adsorción superficial; y el movimiento relativo a alta velocidad sin lubricación puede agravar el daño de la superficie debido a la generación de calor por fricción, aumentando indirectamente el riesgo de adhesión.

Los factores ambientales, la humedad y la composición del medio son más importantes. Un ambiente de alta humedad acelerará la oxidación de la superficie, formando una capa de óxido suelta que se desprende fácilmente al entrar en contacto y se convierte en un medio de adhesión; Si hay gases corrosivos en el ambiente, se pueden formar compuestos frágiles en la superficie, que pueden quitar el metal de la superficie cuando se caen, reduciendo la adhesión, pero destruirán la integridad de la superficie y afectarán la resistencia de la soldadura.

2.1.4 Principio y aplicación de la excelente conductividad

La excelente conductividad eléctrica de la aleación de tungsteno y cobre es una de sus principales ventajas que la distinguen del tungsteno puro y de la mayoría de las aleaciones resistentes a altas temperaturas. Este rendimiento se deriva de las características de los propios componentes y también se beneficia del efecto sinérgico de la estructura compuesta. No persigue una única "conductividad extrema", sino que consigue una conductividad eléctrica "suficiente y estable" sobre la base de mantener una cierta resistencia mecánica y resistencia a altas temperaturas, lo que le permite desempeñar un papel en escenarios que necesitan lidiar con la conducción de corriente y condiciones de trabajo complejas al mismo tiempo. En principio, su conductividad es el resultado del movimiento de los electrones en el interior del metal; En términos de aplicación, esta propiedad lo convierte en un material clave que conecta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la "función eléctrica" y el "soporte estructural".

2.1.4.1 Naturaleza física y mecanismo de conducción de la conductividad

La esencia física de la conductividad es la capacidad de los electrones libres de un material de moverse de manera direccional bajo la acción de un campo eléctrico. Cuando hay un campo eléctrico externo, los electrones libres del material se liberarán de las restricciones de los núcleos atómicos y se moverán a lo largo de la dirección del campo eléctrico, formando una corriente eléctrica. Cuanto menos obstáculos haya al movimiento de los electrones (como vibración atómica, dispersión de impurezas, etc.), mejor será la conductividad.

La aleación de tungsteno y cobre depende principalmente del papel de la fase de cobre. El cobre es un buen conductor típico con una gran cantidad de electrones libres en su interior y sus átomos están dispuestos regularmente. El efecto de dispersión de los electrones durante el movimiento es débil, por lo que puede conducir la corriente de manera eficiente a través del canal de fase de cobre. Aunque el tungsteno en sí tiene una conductividad mucho menor que el cobre, como esqueleto no bloquea la continuidad de la fase de cobre, sino que mantiene la estabilidad del canal de la fase de cobre a través de la estructura de soporte. Además, la interfaz entre el tungsteno y el cobre está estrechamente unida, lo que reduce la pérdida por dispersión de electrones en la interfaz y garantiza aún más la eficiencia de la conductividad. Este mecanismo de "conductividad dominada por la fase de cobre y estructura estabilizada por la fase de tungsteno" permite que la aleación mantenga una conductividad excelente al tiempo que conserva las propiedades mecánicas.

2.1.4.2 Cambios en la conductividad en diferentes proporciones de componentes

La conductividad de la aleación de tungsteno y cobre mostrará una regularidad obvia con el cambio de la relación de composición de tungsteno y cobre. La tendencia principal es "cuanto mayor sea el contenido de cobre, mejor será la conductividad; cuanto mayor sea el contenido de tungsteno, más débil será la conductividad". Este cambio se debe a la diferencia esencial en la conductividad de ambos.

Cuando el contenido de cobre es alto, el canal conductor formado por la fase de cobre en la aleación es más completo y denso, el camino para el flujo de electrones es más suave y menos obstruido, por lo que la conductividad general está más cerca del nivel del cobre puro. En este momento, la fase de tungsteno existe en forma de partículas dispersas, lo que tendrá un ligero impacto en la continuidad de la fase de cobre, pero debido a que el contenido es bajo, no es suficiente para bloquear el canal conductor y la conductividad aún se puede mantener en un nivel alto.

A medida que aumenta el contenido de tungsteno, la proporción del esqueleto de tungsteno aumenta gradualmente, la distribución de la fase de cobre se dividirá por las partículas de tungsteno, algunos canales conductores pueden cortarse o estrecharse y los electrones necesitan evitar las partículas de tungsteno cuando fluyen, el camino se vuelve más largo y la dispersión aumenta y la conductividad disminuye en consecuencia. Con el tiempo, es difícil que los electrones se muevan libremente dentro de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la aleación y la conductividad se debilitará significativamente. Este cambio no es una "disminución monótona" lineal, sino que está estrechamente relacionado con la continuidad de la fase de cobre: siempre que la fase de cobre pueda permanecer básicamente continua, incluso si aumenta el contenido de tungsteno, la disminución de la conductividad es relativamente suave; Una vez que la fase de cobre esté completamente dividida, la conductividad disminuirá significativamente.

2.1.4.3 Ventajas de las aplicaciones conductoras en equipos eléctricos

En equipos eléctricos, la ventaja de la aplicación conductora de la aleación de tungsteno y cobre se refleja principalmente en "tener en cuenta tanto la conductividad como la adaptabilidad a las condiciones de trabajo", lo que puede llenar la brecha de rendimiento entre el cobre puro y el tungsteno puro en escenarios específicos.

En interruptores, relés y otros equipos de alto voltaje que necesitan encender y apagar corrientes con frecuencia, el material de contacto debe conducir la corriente y soportar la temperatura del arco y el impacto mecánico durante la conmutación. Aunque el cobre puro tiene una excelente conductividad, es fácil de fundir a altas temperaturas y carece de resistencia mecánica. Es propenso a deformarse o fallar por ablación después de un uso prolongado; Aunque el tungsteno puro es resistente a altas temperaturas y tiene alta resistencia, tiene mala conductividad y es difícil satisfacer las necesidades de conducción de gran corriente. La aleación de tungsteno y cobre puede hacer frente a ambos problemas: la fase de cobre garantiza un flujo de corriente eficiente y evita el calentamiento excesivo de los contactos; La fase de tungsteno resiste la temperatura del arco y el impacto mecánico, prolonga la vida útil de los contactos y reduce las fallas del equipo.

En piezas que requieren contacto deslizante, como escobillas de motor y deslizadores conductores, el material debe resistir la fricción y el desgaste mientras conduce la corriente. El cobre puro tiene poca resistencia al desgaste y el deslizamiento a largo plazo provocará una conductividad inestable debido al desgaste; Las aleaciones de cobre ordinarias tienen una resistencia al desgaste limitada y pueden reducir la conductividad debido a los elementos añadidos. La fase de tungsteno de la aleación de tungsteno-cobre mejora la resistencia al desgaste de la superficie y reduce las pérdidas durante el deslizamiento; La fase de cobre mantiene una conductividad estable. Incluso si hay un ligero desgaste en la superficie, la continuidad de la fase interna de cobre aún puede garantizar la conducción de corriente y garantizar la estabilidad del funcionamiento del equipo. Además, en algunos componentes que requieren la doble función de "conductividad + disipación de calor" (como los electrodos de dispositivos de alta potencia), la conductividad de la aleación de tungsteno y cobre y la conductividad térmica de la fase de cobre forman una sinergia: no solo conduce la corriente, sino que también elimina el calor generado cuando el dispositivo está funcionando, evitando el sobrecalentamiento local y afectando el rendimiento. Esta ventaja de "un material para múltiples usos" mejora aún más su valor de aplicación en equipos eléctricos.

2.1.5 Buena conductividad térmica

tungsteno y cobre es uno de los pilares fundamentales para su función en escenarios de alta temperatura

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y alta potencia. Este rendimiento no depende únicamente de un componente determinado, sino que es el resultado de la sinergia del tungsteno y el cobre en estructura y propiedades. No solo conserva la conductividad térmica eficiente del cobre, sino que también garantiza la estabilidad del proceso de conducción de calor a través de la estructura esquelética del tungsteno. En comparación con el cobre puro, su conductividad térmica se ve ligeramente comprometida, pero a cambio de un soporte mecánico más fuerte; En comparación con el tungsteno puro, su eficiencia de conductividad térmica mejora enormemente, lo que puede resolver el problema de la acumulación de calor. Esta propiedad de conductividad térmica "equilibrada" la hace irremplazable en escenarios donde es necesario manejar simultáneamente la transferencia de calor y la carga estructural.

2.1.5.1 Principios básicos de la conductividad térmica y mecanismo de conducción térmica

El principio básico de la conductividad térmica es la capacidad del calor de transferirse desde un área de alta temperatura a un área de baja temperatura a través de un movimiento microscópico dentro del material. Su esencia es la transferencia de energía cinética de moléculas, átomos o electrones: las partículas en el área de alta temperatura vibran más violentamente y transfieren energía a partículas adyacentes en el área de baja temperatura a través de la colisión, realizando gradualmente la difusión del calor.

El mecanismo de conductividad térmica de la aleación de tungsteno y cobre se basa principalmente en la "conductividad térmica electrónica" de la fase de cobre, complementada por la "conductividad térmica de fonones" de la fase de tungsteno. El cobre, como metal, tiene una gran cantidad de electrones libres en su interior. Después de que estos electrones ganan energía en el área de alta temperatura, su movimiento se intensifica y rápidamente transfieren calor al área de baja temperatura a través de colisiones. Esta es una forma eficiente de conductividad térmica; Mientras que la conductividad térmica del tungsteno depende principalmente de las vibraciones de la red (es decir, los "fonones"), y las vibraciones de los átomos cerca de la posición de equilibrio transfieren calor a través de la red. Aunque la eficiencia es menor que la conductividad térmica electrónica del cobre, es más estable. En la estructura de aleación, la fase de cobre forma un canal de conducción térmica continuo y el calor primero se difunde rápidamente a través de la fase de cobre. La integridad del canal de fase de cobre al mismo tiempo, evitando la rotura de la ruta de conducción térmica debido a la deformación por alta temperatura. Este mecanismo "dominado por la fase de cobre, asistido por la fase de tungsteno" permite que la aleación transfiera calor de manera eficiente y mantenga la estabilidad de la estructura de conducción térmica bajo choque térmico.

2.1.5.2 Relación entre la conductividad térmica y el efecto de disipación del calor

La conductividad térmica es la base fundamental del efecto de disipación de calor, y ambas muestran una relación de "correlación positiva": cuanto mejor sea la conductividad térmica del material, más rápido se transferirá el calor de la fuente de calor al mundo exterior y más significativo será el efecto de disipación de calor. Sin embargo, el efecto de disipación de calor no solo depende de la conductividad térmica, sino que también está relacionado con el área de disipación del material, el estado de contacto con el medio de disipación, etc. La ventaja de la aleación de cobre-tungsteno es que "amplifica el efecto de otras

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

condiciones de disipación de calor gracias a su eficiente conductividad térmica". Cuando la fuente de calor genera calor, la aleación de cobre y tungsteno con buena conductividad térmica puede conducir rápidamente el calor desde la superficie de la fuente de calor para evitar la acumulación local de calor; El calor conducido se transferirá al medio de disipación de calor, como el aire y el refrigerante, a través de la superficie del material. En este momento, si la conductividad térmica del propio material es insuficiente, incluso si el área de disipación de calor es grande, es difícil que el calor llegue a la superficie y el efecto de disipación de calor se reducirá en gran medida. Además, la conductividad térmica de la aleación de cobre y tungsteno es buena, lo que puede evitar que el calor forme "puntos calientes" (áreas locales de alta temperatura) dentro del material. Los puntos calientes suelen ser la clave para provocar fallas en los componentes debido al sobrecalentamiento. Por lo tanto, la conductividad térmica uniforme mejora indirectamente la confiabilidad de la disipación general del calor. Diseño de disipación para funcionar de manera más efectiva.

2.1.5.3 Valor de aplicación de la conductividad térmica en entornos de trabajo de alta temperatura

En un entorno de trabajo de alta temperatura, la conductividad térmica del material debe ser no solo "eficiente" sino también "estable", es decir, que no disminuya significativamente debido al aumento de la temperatura ambiente. El valor de aplicación de la conductividad térmica de la aleación de cobre y tungsteno se refleja en este punto. En las partes cercanas a la cámara de combustión de los motores aeroespaciales, la temperatura ambiente es muy alta y las piezas también generarán calor adicional debido al trabajo. Si la conductividad térmica es inestable, la acumulación de calor puede hacer que las piezas superen la temperatura de tolerancia. Aunque la fase de cobre en la aleación de cobre-tungsteno puede ablandarse a altas temperaturas, su conductividad térmica no se reducirá en gran medida mientras no alcance el punto de fusión; Además, el esqueleto de tungsteno puede mantener la estabilidad estructural y evitar que la fase de cobre se deforme debido a la alta temperatura y bloquee el camino de conducción de calor, por lo que puede conducir el calor continuamente y garantizar el funcionamiento seguro de las piezas a altas temperaturas.

En el sustrato de disipación de calor de los dispositivos semiconductores de alta potencia, se genera una gran cantidad de calor cuando el dispositivo está funcionando y la temperatura ambiente aumenta con el tiempo de trabajo. Cuando la temperatura de los materiales conductores térmicos ordinarios (como el aluminio puro) excede un cierto rango, la conductividad térmica caerá significativamente, lo que provocará una falla en la disipación del calor. La aleación de cobre y tungsteno puede mantener una conductividad térmica estable a temperaturas más altas, transferir continuamente el calor generado por el dispositivo al dispositivo de disipación de calor y evitar la degradación del rendimiento o daños al dispositivo debido al sobrecalentamiento.

Además, en las partes del electrodo de soldadura por arco, el electrodo no solo debe conducir la corriente, sino también soportar la alta temperatura instantánea generada por el arco. Si la conductividad térmica es mala, el propio electrodo se quemará rápidamente debido a la incapacidad de disipar el calor. La aleación de cobre y tungsteno puede conducir oportunamente el calor del arco a través de una conductividad térmica eficiente, reducir la temperatura del electrodo en sí, extender su vida útil y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

garantizar la estabilidad del proceso de soldadura. Esta característica de “mantener la eficiencia de conductividad térmica a altas temperaturas” lo convierte en un material clave que conecta la “generación de calor” y la “disipación de calor” en entornos de alta temperatura.

2.1.6 Resistencia a la corrosión y mecanismo

tungsteno no es su característica más destacada, pero muestra valor práctico en ambientes húmedos con medios ligeramente corrosivos. Su resistencia a la corrosión no se consigue mediante un solo componente, sino es el resultado de la sinergia del tungsteno y el cobre y la "resistencia pasiva" al proceso de corrosión. No solo evita la rápida oxidación del cobre puro en ciertos entornos, sino que también compensa los defectos de corrosión local del tungsteno estructural puro en medios complejos y puede mantener la estabilidad de la estructura y el rendimiento en una variedad de entornos industriales.

2.1.6.1 Influencia de diferentes entornos de corrosión

La diferencia en el entorno de corrosión afectará el grado de corrosión de la aleación de cobre y tungsteno, lo que se refleja principalmente en los tres aspectos del tipo de medio, la humedad y la temperatura. En un ambiente atmosférico húmedo, el vapor de agua formará una película de agua en la superficie de la aleación. Si hay una pequeña cantidad de contaminantes (como dióxido de azufre y sal) en el aire, la película de agua se convertirá en un electrolito débil y provocará una ligera corrosión electroquímica. La fase de cobre puede oxidarse y se formará una película de óxido en la superficie, pero esta película de óxido es densa y puede evitar que la corrosión se propague más hasta cierto punto. El tungsteno es más tolerante a este tipo de entorno y casi no se corroe, por lo que la tasa de corrosión general es lenta.

En medios ácidos o alcalinos el grado de corrosión se agravará significativamente. Los ambientes ácidos destruirán la película de óxido en la superficie del cobre, provocando que la fase de cobre continúe disolviéndose; Los ambientes alcalinos pueden reaccionar químicamente con el cobre para generar sustancias solubles, acelerando la pérdida de la fase de cobre. Ambiente seco de alta temperatura, la corrosión es principalmente oxidación. Las altas temperaturas acelerarán la reacción de oxidación del cobre y puede formarse una capa de óxido más gruesa en la superficie.

2.1.6.2 Mecanismo interno de resistencia a la corrosión

La aleación de tungsteno y cobre se puede resumir como el efecto sinérgico de "esqueleto resistente a la corrosión de la fase de tungsteno + autoprotección contra la oxidación de la fase de cobre + barrera de densidad estructural".

La fase de tungsteno en sí tiene una alta estabilidad química y no es fácil que reaccione con el medio en la mayoría de los entornos corrosivos comunes. El esqueleto continuo que forma proporciona el soporte básico para la resistencia a la corrosión de la aleación: incluso si la fase de cobre está ligeramente corroída, el esqueleto de tungsteno aún puede mantener su integridad estructural y evitar daños generales a la aleación. En un ambiente húmedo o ligeramente oxidante, se formará una película de óxido en la superficie del cobre. Aunque esta película provocará que el color de la superficie cambie, su textura es

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

relativamente densa y puede evitar que el medio siga en contacto con el cobre del interior. Equivale a formar una “barrera natural” para frenar la propagación continua de la corrosión.

Además, la estructura densa de la aleación también puede mejorar la resistencia a la corrosión. Al optimizar el proceso de preparación, la porosidad dentro de la aleación de cobre y tungsteno es baja, lo que reduce los canales por los que los medios corrosivos penetran en el interior; Al mismo tiempo, la interfaz entre el tungsteno y el cobre está estrechamente unida, evitando que el medio se acumule en la interfaz para formar puntos de corrosión locales, lo que reduce aún más el riesgo de corrosión. Este mecanismo de "resistencia a la corrosión del esqueleto, autoprotección contra la oxidación y resistencia estructural permite la penetración" de la aleación para mantener una buena estabilidad en entornos de corrosión no extrema.

2.1.6.3 Medios técnicos para mejorar la resistencia a la corrosión

Para mejorar la resistencia a la corrosión de la aleación de cobre y tungsteno, es necesario comenzar desde las tres direcciones de "bloquear el camino de la corrosión", "mejorar la protección de la superficie" y "optimizar la estructura interna", y reducir el impacto de los medios corrosivos en los materiales a través de medios técnicos específicos. El tratamiento de superficies es el medio técnico más directo. Se forma un revestimiento resistente a la corrosión en la superficie de la aleación mediante galvanoplastia (como el cromado o el niquelado). Este recubrimiento tiene una alta estabilidad química y puede aislar completamente la matriz de aleación del medio corrosivo. Al mismo tiempo, el recubrimiento en sí no se oxida ni se disuelve fácilmente, lo que reduce en gran medida la probabilidad de corrosión. El tratamiento de pasivación química también se puede utilizar para formar una película de óxido más densa y estable en la superficie de la fase de cobre a través de una solución específica para mejorar la capacidad de "autoprotección" sin afectar las propiedades centrales de la aleación, como la conductividad.

La optimización de la estructura interna puede mejorar la resistencia a la corrosión desde la raíz. Al refinar el tamaño de partícula del polvo de tungsteno y del polvo de cobre y mejorar la uniformidad de la mezcla, se puede reducir la segregación de componentes y la porosidad dentro de la aleación, y se puede evitar que el medio corrosivo se acumule localmente. El uso de procesos de sinterización avanzados (como el prensado isostático en caliente) puede mejorar la densidad de la aleación, eliminar microfisuras y huecos internos, bloquear los canales por los que los medios corrosivos penetran en el interior de la resistencia y mejorar la corrosión desde una perspectiva estructural. Añadir elementos auxiliares resistentes a la corrosión también es una vía técnica eficaz. La adición de una pequeña cantidad de elementos con fuerte resistencia a la corrosión (como cromo y silicio) a la aleación enriquecerá estos elementos en la fase de cobre o en la interfaz tungsteno-cobre, lo que no afectará la conductividad del cobre ni el efecto esqueleto del tungsteno, pero también mejorará la resistencia a la oxidación de la fase de cobre, o mejorará la fuerza de unión de la interfaz y reducirá la aparición de corrosión local.

2.2 Efecto de la relación de composición en las propiedades de la aleación de cobre-tungsteno

La aleación de cobre y tungsteno está compuesta de tungsteno (alta dureza, alto punto de fusión,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fragilidad) y cobre (buena plasticidad, conductividad eléctrica, conductividad térmica). La relación de composición de ambos (generalmente expresada como contenido de tungsteno, como W70Cu30, que significa que el tungsteno representa el 70 % y el cobre el 30 %) es el factor fundamental que determina su rendimiento. Dado que existen diferencias significativas en las propiedades mecánicas y físicas entre el tungsteno y el cobre, los cambios en la relación de composición conducirán directamente a cambios regulares en las propiedades mecánicas de la aleación (dureza, resistencia y tenacidad). Este cambio es el resultado del efecto sinérgico del "soporte del esqueleto de la fase de tungsteno" y del "amortiguador plástico de la fase de cobre".

2.2.1 Efecto sobre las propiedades mecánicas

La aleación de cobre y tungsteno es la encarnación del equilibrio entre la alta resistencia y dureza del tungsteno y la plasticidad y tenacidad del cobre. La aleación aumentará significativamente, pero la dureza y la resistencia disminuirán.

2.2.1.1 Efecto sobre la dureza

La aleación de cobre y tungsteno está estrechamente relacionada con la proporción de sus componentes, entre los cuales el elemento tungsteno juega un papel principal en la mejora de la dureza. Cuando el contenido de tungsteno en la aleación es bajo, la fase de cobre ocupa una posición dominante, formando una matriz continua con una pequeña cantidad de partículas de tungsteno dispersas incrustadas en ella. En este momento, la aleación es más blanda en su conjunto y su dureza es cercana a la del cobre puro. Esto se debe a que el cobre tiene una textura relativamente blanda y una capacidad limitada para resistir deformaciones externas como hendiduras y rayones. Por ejemplo, la aleación de cobre y tungsteno que contiene entre un 10% y un 20% de tungsteno tiene una dureza Brinell de aproximadamente 80-120HB, lo que es más adecuado para algunos escenarios que no requieren alta dureza pero requieren un buen rendimiento de procesamiento y otras propiedades (como la conductividad).

A medida que el contenido de tungsteno aumenta gradualmente, por ejemplo hasta alrededor del 50%, la estructura interna de la aleación cambia significativamente. Las partículas de tungsteno se aproximan entre sí y comienzan a formar un cierto grado de estructura de esqueleto. Aunque la fase de cobre todavía existe y llena los huecos en el esqueleto de tungsteno, el papel de soporte de la fase de tungsteno comienza a adquirir importancia en este momento. La dureza de la aleación aumenta significativamente, hasta 200-250HB. Este nivel de dureza permite que la aleación mantenga de forma eficaz la integridad de la superficie cuando se enfrenta a entornos de fricción y desgaste moderados, y es adecuada para piezas que están sujetas a cierta fricción, como los componentes de transmisión mecánica.

Cuando el contenido de tungsteno aumenta aún más al 70%-80% o incluso más, la fase de tungsteno ha formado un esqueleto continuo y sólido, y la fase de cobre solo se llena en los pequeños poros del esqueleto de tungsteno. En este momento, la dureza de la aleación es cercana a la del tungsteno puro, que puede superar los 300HB. Las aleaciones de cobre y tungsteno con alto contenido de tungsteno funcionan bien en condiciones de trabajo extremas de alto estrés y alto desgaste. Por ejemplo, los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

electrodos EDM frecuentemente están sujetos a choques de alta temperatura y alta presión generados por descarga durante el funcionamiento, y el material debe tener una dureza extremadamente alta para garantizar la precisión de la forma y la vida útil del electrodo; Los contactos de descarga de alto voltaje también requieren materiales de alta dureza para resistir la erosión del arco y el desgaste mecánico durante la apertura y el cierre frecuentes. Las aleaciones de cobre y tungsteno con alto contenido de tungsteno pueden satisfacer bien estas necesidades.

2.2.1.2 Impacto en la resistencia

En términos de resistencia, la resistencia a la tracción y a la compresión de las aleaciones de cobre y tungsteno muestran diferentes cambios debido a la influencia de la relación de composición. Para la resistencia a la tracción, cuando el contenido de tungsteno es bajo, la fase de cobre soporta la principal fuerza de tracción como una matriz continua. En este momento, la resistencia a la tracción de la aleación depende principalmente de la capacidad de soporte plástico del cobre. limitada, la resistencia a la tracción de la aleación aumenta lentamente. Por ejemplo, la resistencia a la tracción de una aleación de cobre y tungsteno que contiene un 30% de tungsteno es de aproximadamente 300-350 MPa.

A medida que el contenido de tungsteno aumenta al 50%-80%, la fase de tungsteno forma gradualmente una estructura de esqueleto semicontinua o incluso continua, y la fase de cobre llena los espacios en el esqueleto de tungsteno para desempeñar un papel en la unión y la transferencia de tensión. En este punto, cuando la aleación se somete a tensión, la tensión se puede transmitir y dispersar de manera más efectiva a través del esqueleto de tungsteno y la resistencia a la tracción mejora significativamente. Debido a que el tungsteno en sí tiene una alta resistencia, su estructura de esqueleto mejora en gran medida la capacidad de carga general de la aleación. Al mismo tiempo, la fase de cobre alivia el problema de la concentración de tensión local. Por ejemplo, la resistencia a la tracción de una aleación de tungsteno y cobre que contiene un 60% de tungsteno puede alcanzar entre 450 y 550 MPa. Cuando contiene entre un 70% y un 80% de tungsteno, la resistencia a la tracción aumenta aún más hasta aproximadamente 600-700 MPa.

Sin embargo, cuando el contenido de tungsteno continúa aumentando ($\geq 80\%$), la resistencia a la tracción disminuirá ligeramente después de alcanzar el valor máximo. Esto se debe a que la fase de cobre representa una proporción demasiado baja y no puede llenar completamente los espacios entre las partículas de tungsteno, lo que da como resultado un enlace de interfaz tungsteno-tungsteno debilitado. Cuando se someten a tensión, estas interfaces débiles son propensas a agrietarse primero, lo que a su vez provoca una fractura general, reduciendo la resistencia a la tracción de la aleación. Por ejemplo, una aleación de tungsteno y cobre que contiene 90% de tungsteno tiene una resistencia a la tracción de aproximadamente 600-650 MPa, ligeramente inferior a la de una aleación que contiene 80% de tungsteno.

En términos de resistencia a la compresión, la regla es relativamente simple y directa. A medida que aumenta el contenido de tungsteno, la resistencia a la compresión continúa aumentando. Porque durante el proceso de compresión, la aleación se basa principalmente en la estructura de esqueleto formada por la fase de tungsteno para resistir la deformación por compresión. Cuanto mayor sea el contenido de tungsteno, más fuerte será el esqueleto y mayor será la presión que puede soportar. Por ejemplo, una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aleación de tungsteno y cobre que contiene 90% de tungsteno tiene una resistencia a la compresión de más de 1000 MPa, mientras que una aleación que contiene 50% de tungsteno tiene una resistencia a la compresión de solo alrededor de 600-700 MPa.

2.2.1.3 Impacto en la tenacidad

La tenacidad de la aleación de tungsteno y cobre está determinada principalmente por la fase de cobre y está significativamente correlacionada negativamente con el contenido de tungsteno. Cuando el contenido de tungsteno es bajo ($\leq 50\%$), la fase de cobre existe en forma de matriz continua, lo que le confiere a la aleación una buena tenacidad. Cuando se somete a un impacto o una fuerza externa, la fase de cobre puede absorber una gran cantidad de energía a través de la deformación plástica, dispersar la tensión y reducir la posibilidad de generación de grietas y expansión. En este momento, aunque una pequeña cantidad de partículas de tungsteno dispersas tiene cierta influencia en la continuidad de la fase de cobre, no cambia el modo de absorción de energía general de la aleación, que es principalmente deformación plástica. La aleación tiene buena tenacidad al impacto. Por ejemplo, la tenacidad al impacto de una aleación de tungsteno y cobre que contiene un 30 % de tungsteno es de aproximadamente 15-20 J/cm², lo que está cerca del nivel de tenacidad del cobre puro. Puede mantener la integridad estructural en un entorno con ciertos impactos y es adecuado para algunas piezas estructurales que requieren cierta resistencia al impacto.

A medida que el contenido de tungsteno aumenta al 50%-80%, la fase de tungsteno forma gradualmente un esqueleto en la estructura interna de la aleación, y la fase de cobre cambia a una fase dispersa que llena los espacios en el esqueleto de tungsteno. Este cambio estructural conduce a una reducción significativa en el espacio de deformación plástica de la fase de cobre. Cuando se ve afectada por una fuerza externa, es difícil que la fase de cobre se deforme completamente como antes para absorber energía. La tensión se concentra fácilmente en la interfaz tungsteno-cobre, lo que provoca grietas en la interfaz. Por lo tanto, la tenacidad de la aleación disminuye significativamente con el aumento del contenido de tungsteno. Por ejemplo, la tenacidad al impacto de una aleación de tungsteno y cobre que contiene un 60% de tungsteno cae a 5-10 J/cm², punto en el cual la aleación es más susceptible a sufrir daños cuando se somete a un impacto. Cuando el contenido de tungsteno aumenta aún más a $\geq 80\%$, el esqueleto de tungsteno continuo casi no tiene capacidad de deformación plástica y la fase de cobre solo llena los pequeños espacios, lo que no puede aliviar eficazmente la concentración de tensión. Bajo carga de impacto, el esqueleto de tungsteno es muy fácil de romper directamente, la aleación absorbe muy poca energía, muestra una fragilidad evidente y la tenacidad al impacto es extremadamente baja. Por ejemplo, la tenacidad al impacto de una aleación de cobre y tungsteno que contiene un 90 % de tungsteno es de solo 1-3 J/cm², lo que está cerca del estado frágil del tungsteno puro. Esta aleación con alto contenido de tungsteno debe evitar estar sujeta a grandes impactos durante su uso y se utiliza principalmente en escenas con altos requisitos de dureza y resistencia, pero bajos requisitos de tenacidad.

2.2.2 Impacto en las propiedades físicas

Las aleaciones de cobre y tungsteno no son fijas, sino que cambian regularmente con el cambio de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

relación de composición de tungsteno y cobre. Esto se debe a que las propiedades físicas del tungsteno y del cobre son obviamente diferentes. Cuando la proporción de los dos en la aleación aumenta y disminuye, la aleación combinará las características de los dos metales para formar nuevas propiedades físicas. Ya sean propiedades relacionadas con las propiedades inherentes del material, como la densidad y el punto de fusión, o propiedades relacionadas con los cambios de temperatura, como el coeficiente de expansión térmica, la influencia de la relación de composición se puede ver claramente, y esta influencia también permite que la aleación de cobre y tungsteno se adapte a los requisitos de rendimiento físico de diferentes escenarios ajustando la composición.

2.2.2.1 Impacto en la densidad

tungsteno y cobre está estrechamente relacionada con la proporción de sus componentes, mostrando un patrón claro de cambio. El tungsteno, como metal de alta densidad, tiene un gran peso atómico y una disposición densa de átomos, lo que le confiere características de densidad extremadamente alta. Aunque la densidad del cobre se encuentra en un nivel medio entre los metales, es mucho menor que la del tungsteno. Cuando el contenido de tungsteno en el sistema de aleación está en un nivel bajo, la fase de cobre ocupa la posición principal en la estructura de la aleación y presenta un estado de distribución continua. En este momento, las características de densidad de la aleación se ven afectadas principalmente por la fase de cobre, y la densidad general está cerca del valor de densidad del cobre puro. En este caso, la aleación presenta ventajas en algunos escenarios que son sensibles al peso y tienen otras propiedades del material (como buena conductividad, cierto rendimiento de procesamiento, etc.). Por ejemplo, en algunos componentes de conexión interna de equipos electrónicos con estrictas restricciones de peso, las aleaciones de tungsteno y cobre con bajo contenido de tungsteno pueden cumplir con los requisitos de rendimiento eléctrico y al mismo tiempo reducir el peso general tanto como sea posible.

A medida que aumenta gradualmente el contenido de tungsteno en la aleación, la proporción de la fase de tungsteno de alta densidad en la estructura interna de la aleación continúa aumentando y su contribución a la densidad general de la aleación se vuelve cada vez más prominente. En este proceso, la estructura continua originalmente dominada por la fase de cobre se rompe gradualmente, las partículas de tungsteno comienzan a aproximarse entre sí y gradualmente construyen una estructura de esqueleto, y la fase de cobre llena los huecos en el esqueleto de tungsteno. Mayor que la de la fase de cobre, la densidad de la aleación aumenta constantemente con el aumento del contenido de tungsteno. Esta característica de aumento gradual de densidad permite que la aleación juegue un papel en escenarios de aplicación que necesitan resistir mayores fuerzas de impacto o requieren contrapesos estables.

Cuando el contenido de tungsteno en la aleación alcanza una alta proporción, la fase de tungsteno ha formado una estructura de esqueleto continua y estable en la aleación, y la fase de cobre solo se llena en los pequeños poros del esqueleto de tungsteno. En este momento, las características de densidad de la aleación están dominadas casi por completo por la fase de tungsteno, y la densidad de la aleación también está cerca de la densidad del tungsteno puro. Las aleaciones de cobre y tungsteno con alto contenido de tungsteno muestran un valor único en algunos campos especiales. Por ejemplo, en la fabricación de ciertas piezas en el campo nuclear aeroespacial, el material debe mantener la integridad estructural

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cuando se somete a presiones extremas y al impacto de un flujo de aire a alta velocidad. un papel clave, utilizando su alta densidad para absorber y dispersar la energía del impacto para garantizar el funcionamiento seguro del equipo.

2.2.2.2 Efecto sobre el punto de fusión

El patrón de variación del punto de fusión de las aleaciones es complejo y está estrechamente relacionado con la proporción de componentes. El tungsteno tiene un punto de fusión extremadamente alto, situándose entre los más altos entre los metales comunes. Esto se debe a su fuerte fuerza de enlace entre átomos y a su compleja estructura cristalina. El punto de fusión del cobre es mucho más bajo que el del tungsteno y la diferencia entre ambos puntos de fusión es significativa. Cuando el contenido de tungsteno en la aleación es bajo, la microestructura de la aleación se basa en la fase de cobre como matriz continua. En este momento, el punto de fusión de la aleación está determinado principalmente por las propiedades de la fase de cobre, y el punto de fusión general está cerca del punto de fusión del cobre puro. Sin embargo, dado que hay una pequeña cantidad de partículas de tungsteno dispersas en la aleación, estas partículas de tungsteno de alto punto de fusión aumentarán el punto de fusión de la aleación hasta cierto punto. Aunque este efecto de mejora no es muy significativo en la etapa de bajo contenido de tungsteno, ya ha aumentado el punto de fusión de la aleación hasta cierto punto en comparación con el cobre puro. Esta característica de punto de fusión permite que las aleaciones de tungsteno-cobre con bajo contenido de tungsteno se utilicen en algunos escenarios que no requieren un punto de fusión particularmente alto pero sí un cierto grado de resistencia a altas temperaturas y otras propiedades como buena conductividad eléctrica y conductividad térmica. Por ejemplo, en la fabricación de componentes de disipación de calor para algunos equipos electrónicos, este tipo de aleación puede mantener la estabilidad estructural y realizar buenas funciones de disipación de calor en un entorno donde se genera cierta cantidad de calor durante el funcionamiento normal del equipo.

A medida que el contenido de tungsteno en la aleación aumenta gradualmente, la estructura interna de la aleación cambia significativamente y la fase de tungsteno comienza a formar gradualmente una estructura de esqueleto. En este momento, la influencia de la fase de tungsteno de alto punto de fusión en el punto de fusión del sistema de aleación se vuelve cada vez más obvia. , por lo que la aleación en su conjunto necesita absorber más energía para alcanzar el estado de fusión, aumentando así en gran medida el punto de fusión de la aleación. En esta etapa, el aumento del punto de fusión de la aleación aumenta gradualmente con el aumento del contenido de tungsteno, mostrando una tendencia ascendente relativamente obvia. El contenido de tungsteno en la aleación de cobre y tungsteno y el aumento de su punto de fusión pueden garantizar que los componentes puedan funcionar de manera estable durante mucho tiempo en un entorno de alta temperatura sin derretirse ni deformarse debido al aumento de temperatura, lo que garantiza el funcionamiento normal del equipo. Cuando el contenido de tungsteno en la aleación alcanza un nivel alto, la estructura del esqueleto de tungsteno continua y estable domina, y la fase de cobre solo llena los pequeños poros del esqueleto de tungsteno. En este caso, la aleación muestra una estabilidad notable en entornos de temperaturas extremadamente altas. Por ejemplo, en la fabricación de componentes de la cámara de combustión de motores de aeronaves y de componentes de protección térmica para el reingreso a la atmósfera de naves espaciales, estos componentes se enfrentarán

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a un entorno de alta temperatura de miles de grados durante su funcionamiento. La aleación de tungsteno y cobre con alto contenido de tungsteno puede soportar temperaturas tan extremas debido a sus características de alto punto de fusión, evitando eficazmente que los componentes se derritan y deformen a altas temperaturas y garantizando el funcionamiento seguro de la aeronave o el motor. Al mismo tiempo, la presencia de la fase de cobre puede proporcionar a la aleación una buena conductividad térmica hasta cierto punto, ayudar a disipar el calor generado por la alta temperatura y mejorar aún más la confiabilidad de la aleación en entornos de alta temperatura.

2.2.2.3 Influencia en el coeficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica es un indicador importante para medir la estabilidad dimensional de un material cuando cambia la temperatura. Existe una estrecha relación entre el coeficiente de expansión térmica de la aleación de cobre y tungsteno y la proporción de componentes de la aleación. El cobre tiene un coeficiente de expansión térmica relativamente grande, lo que significa que cuando la temperatura cambia, el movimiento térmico de los átomos de cobre se intensifica y la distancia entre los átomos aumenta, lo que resulta en una expansión o contracción más obvia del tamaño general del material de cobre. estable y el cambio en la distancia entre átomos es relativamente pequeño cuando cambia la temperatura. Cuando el contenido de tungsteno en la aleación está en un nivel bajo, la fase de cobre domina la estructura de la aleación y presenta un estado de distribución continua. En este momento, las características de expansión térmica de la aleación están determinadas principalmente por la fase de cobre, y el coeficiente de expansión térmica de la aleación está cerca del valor del coeficiente de expansión térmica del cobre puro. De algunos equipos electrónicos, si se utiliza una aleación de cobre y tungsteno con un bajo contenido de tungsteno como componente de conexión, cuando el equipo funciona durante mucho tiempo y se calienta o la temperatura ambiente fluctúa mucho, debido al gran coeficiente de expansión térmica de la aleación, el componente de conexión puede aflojarse debido a la expansión y contracción térmica, lo que afecta la estabilidad de la conexión eléctrica y el rendimiento general del equipo.

A medida que aumenta gradualmente el contenido de tungsteno en la aleación, la proporción de la fase de tungsteno de bajo coeficiente de expansión en la estructura interna de la aleación continúa aumentando y su efecto inhibitorio sobre la expansión térmica general de la aleación se vuelve gradualmente prominente. En este proceso, la estructura continua originalmente dominada por la fase de cobre se rompe gradualmente y la fase de tungsteno comienza a formar una cierta estructura de esqueleto, y la fase de cobre llena los huecos en el esqueleto de tungsteno. Dado que el coeficiente de expansión térmica de la fase de tungsteno es mucho menor que el de la fase de cobre, juega un papel en la estabilización de la estructura y la limitación de la expansión térmica general en la aleación. A medida que aumenta aún más el contenido de tungsteno, el coeficiente de expansión térmica de la aleación disminuye gradualmente. Esta característica del cambio en el coeficiente de expansión térmica con el contenido de tungsteno hace que la aleación tenga un amplio potencial de aplicación en algunos escenarios con altos requisitos de coincidencia del coeficiente de expansión térmica.

Para garantizar que durante el funcionamiento del equipo, las piezas de conexión entre los diferentes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

componentes no provoquen concentración de tensiones debido a la diferencia en la expansión y contracción térmica causada por los cambios de temperatura, causando fallas o daños en la conexión, es necesario seleccionar materiales de embalaje con coeficientes de expansión térmica que coincidan con los de otros materiales de los componentes. Al ajustar el contenido de tungsteno en la aleación de tungsteno y cobre, su coeficiente de expansión térmica se puede ajustar con precisión dentro de un rango determinado, cumpliendo así los requisitos de coincidencia de coeficiente de expansión térmica de varios materiales de componentes electrónicos (como sustratos cerámicos, chips semiconductores, etc.), lo que garantiza que los equipos electrónicos puedan funcionar de manera estable y confiable en diferentes entornos de temperatura.

Cuando el contenido de tungsteno en la aleación alcanza una alta proporción, la estructura del esqueleto de tungsteno continua y estable domina la aleación, y la fase de cobre solo se llena en los pequeños poros del esqueleto de tungsteno. En este momento, el coeficiente de expansión térmica de la aleación se ha acercado al del tungsteno. Cuando la temperatura cambia, la estabilidad dimensional de la aleación mejora enormemente y la amplitud de expansión y contracción térmica se vuelve muy pequeña. un papel irremplazable en algunos campos de alta precisión, como la fabricación de instrumentos de precisión y la industria aeroespacial, que requieren una estabilidad dimensional extremadamente alta. Por ejemplo, en la fabricación de componentes de instrumentos ópticos para naves espaciales, estos instrumentos se enfrentarán a entornos de temperatura extremadamente complejos y drásticamente cambiantes en el espacio, desde el espacio profundo extremadamente frío del universo hasta el entorno de alta temperatura cercano al sol, y el rango de temperatura puede alcanzar cientos de grados Celsius. permanecen prácticamente inalterados ante cambios de temperatura tan extremos, lo que garantiza que no se vea afectado el rendimiento óptico de alta precisión de los instrumentos ópticos y proporciona un soporte de datos de observación estable y fiable para misiones de exploración espacial.

2.2.2.4 Efecto sobre la conductividad

tungsteno está estrechamente relacionada con la relación de composición. El cobre es un buen metal conductor con alta conductividad eléctrica, mientras que el tungsteno tiene una conductividad eléctrica relativamente baja. A medida que aumenta el contenido de tungsteno en la aleación, la conductividad eléctrica disminuirá gradualmente. Esto se debe a que el tungsteno tiene una gran distancia interatómica y una baja densidad de nubes de electrones. más defectos iónicos y átomos de impurezas, lo que dificulta la libre transmisión de electrones en la red. Cuando el contenido de tungsteno excede una determinada proporción, la tasa de disminución de la conductividad comienza a disminuir, probablemente porque las barreras electrónicas formadas por el mayor contenido de tungsteno comienzan a interactuar y restringen más el flujo de electrones. Por el contrario, aumentar el contenido de cobre aumentará la conductividad de la aleación porque las características de alta conductividad eléctrica del cobre pueden conducir mejor la corriente.

2.2.2.5 Efecto sobre la conductividad térmica

En términos de conductividad térmica, el cobre tiene una conductividad térmica significativamente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mayor que el tungsteno. Por lo tanto, en general, cuanto mayor sea el contenido de cobre en la aleación de tungsteno-cobre, mayor será la conductividad térmica. Esto se debe a que los metales puros conducen el calor principalmente a través de electrones libres, y el cobre tiene una concentración relativamente alta de electrones libres, lo que puede transferir el calor de manera más eficiente. aumento del coeficiente de expansión térmica. Al mismo tiempo, la conductividad térmica de la aleación también se ve afectada por otros factores, como la densidad. El gas es un mal portador de calor. Cuando existen poros en el material, la conductividad térmica disminuirá con el aumento de la porosidad, por lo que las aleaciones de tungsteno y cobre con alta densidad suelen tener una mayor conductividad térmica.

2.2.3 Impacto en las propiedades químicas

La aleación de cobre y tungsteno tiene buena estabilidad química. En términos de resistencia a la oxidación, el tungsteno tiene un punto de fusión más alto y una mejor resistencia a la oxidación. En términos de resistencia a la corrosión, el tungsteno y el cobre tienen cierta resistencia a la corrosión, y la aleación de cobre y tungsteno tiene buena resistencia a algunos productos químicos y entornos comunes. Sin embargo, en ciertos medios químicos específicos, como los ácidos oxidantes fuertes, el cobre puede sufrir reacciones de corrosión. En este momento, aumentar el contenido de tungsteno puede mejorar la resistencia a la corrosión de la aleación hasta cierto punto. Además, el contenido de impurezas y el proceso de preparación también afectarán las propiedades químicas de la aleación de cobre y tungsteno. Por ejemplo, un contenido demasiado alto de oxígeno provocará la oxidación de la aleación de cobre y tungsteno, reduciendo la resistencia y la conductividad de la aleación.

2.2.3.1 Efecto sobre la resistencia a la corrosión

tungsteno se ve afectada significativamente por su relación de composición y exhibe un rendimiento diverso en diferentes entornos corrosivos. El tungsteno en sí tiene una buena estabilidad química y puede mantener su estructura evitando que se corroa fácilmente en muchos medios corrosivos comunes. Cuando el contenido de tungsteno en la aleación es relativamente alto, la estructura de esqueleto formada por la fase de tungsteno puede proporcionar una base para que la aleación resista la corrosión hasta cierto punto. Por ejemplo, en algunos entornos débilmente ácidos, las aleaciones de tungsteno y cobre con alta fuerza de unión entre los átomos de tungsteno y la estructura electrónica relativamente estable dificultan que los iones en el medio corrosivo reaccionen químicamente con él, lo que dificulta una mayor penetración de la corrosión.

Sin embargo, el cobre es relativamente activo en ciertos entornos corrosivos. En algunas soluciones ácidas altamente oxidantes, como el ácido nítrico, el cobre experimenta fácilmente reacciones redox con el ácido nítrico para generar las correspondientes sales de cobre y liberar gas de óxido de nitrógeno. Cuando el contenido de cobre en la aleación es alto, el impacto negativo de esta actividad sobre la resistencia a la corrosión de la aleación se hará evidente. En tal entorno, la fase de cobre se convierte en el principal "paso" para la corrosión de la aleación, y el medio corrosivo reaccionará preferentemente con el cobre, lo que dará como resultado picaduras de corrosión, manchas de óxido y otros fenómenos en la superficie de la aleación, destruyendo así la estructura general de la aleación y reduciendo su

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rendimiento.

Pero en algunos entornos de soluciones acuosas neutras o débilmente alcalinas, la situación es diferente. En este momento, si el contenido de cobre está dentro de un rango determinado, el cobre puede formar una fina película de pasivación en la superficie de la aleación. El componente principal de esta película de pasivación son algunos óxidos o hidróxidos de cobre. Por ejemplo, en la selección de materiales de revestimiento para algunas tuberías de agua industriales, si se utiliza una aleación de tungsteno y cobre con un contenido moderado de cobre, esta propiedad de pasivación del cobre se puede utilizar para mantener la integridad del revestimiento de la tubería durante el contacto a largo plazo con el agua y reducir la aparición de problemas como la perforación por corrosión. Al mismo tiempo, la presencia de la fase de tungsteno también puede mejorar la resistencia estructural general de la aleación, de modo que la película de pasivación no se destruye fácilmente cuando se somete a fuerzas externas como el impacto del flujo de agua, lo que garantiza aún más la resistencia a la corrosión de la aleación.

2.2.3.2 Efecto sobre la resistencia a la oxidación a alta temperatura

La resistencia a la oxidación a alta temperatura es un indicador clave para medir el rendimiento de la aleación de cobre y tungsteno en un entorno de oxígeno a alta temperatura y está estrechamente relacionada con la relación de composición. El tungsteno tiene un punto de fusión extremadamente alto de 3410 °C y, a alta temperatura, se puede formar una película de óxido relativamente estable en su superficie. Los componentes principales de esta película de óxido son óxidos como WO_3 , que tienen buena densidad y estabilidad, y pueden evitar que el oxígeno se difunda más en la aleación, protegiendo así la aleación. Cuando el contenido de tungsteno en la aleación es alto, en un entorno de oxígeno a alta temperatura, se forma preferentemente una película de óxido compuesta principalmente de óxido de tungsteno en la superficie de la aleación. A medida que aumenta la temperatura y aumenta el tiempo, esta película de óxido continúa espesándose y, debido a su estructura estable, puede prevenir eficazmente una mayor reacción entre el oxígeno y el interior de la aleación, mejorando en gran medida la resistencia a la oxidación a alta temperatura de la aleación. Se utiliza una aleación de cobre y tungsteno con un alto contenido de tungsteno, que funcionará durante mucho tiempo a una temperatura de 1000 °C o incluso superior. La película de óxido estable formada en la superficie de la aleación puede garantizar que las piezas estructurales no se oxiden demasiado durante mucho tiempo, manteniendo sus propiedades mecánicas e integridad estructural.

Por el contrario, el cobre tiene un punto de fusión relativamente bajo de 1080 °C y se oxida relativamente rápido a altas temperaturas. Cuando el contenido de cobre en la aleación es alto, el cobre se oxidará a óxidos como Cu_2O o CuO más rápidamente en un entorno aeróbico de alta temperatura. En comparación con los óxidos de tungsteno, estos óxidos de cobre tienen una estructura relativamente suelta y no pueden formar una capa de barrera efectiva como la película de óxido de tungsteno. A medida que continúa el proceso de oxidación, los óxidos de cobre continúan acumulándose, lo que no solo consume el elemento cobre en la aleación, sino que también puede causar grietas y desprendimiento de la película de óxido, lo que facilita que el oxígeno penetre en la película de óxido y reaccione con otros componentes dentro de la aleación, reduciendo así la resistencia a la oxidación a alta temperatura de la aleación. En algunos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

materiales de contacto eléctrico que necesitan funcionar de forma estable durante mucho tiempo en un entorno aeróbico de alta temperatura, si se utiliza una aleación de tungsteno y cobre con un contenido de cobre demasiado alto, el contacto se oxidará rápidamente debido al aumento de temperatura durante el encendido y apagado frecuente. La película de óxido de cobre suelta que se forma en la superficie afectará la conductividad y la estabilidad del contacto y, en casos severos, incluso puede provocar que el contacto se atasque y falle.

Sin embargo, dentro de una relación de composición y un rango de temperatura específicos, pueden ocurrir algunas interacciones entre los óxidos de tungsteno y cobre, que tendrán un efecto complejo en la resistencia a la oxidación a alta temperatura de la aleación. La película de óxido tiene una cierta densidad y flexibilidad. No solo puede utilizar las propiedades de barrera del óxido de tungsteno, sino que también puede utilizar óxido de cobre para rellenar las pequeñas grietas en la película de óxido hasta cierto punto, mejorando así la resistencia a la oxidación a alta temperatura de la aleación en este rango de temperatura hasta cierto punto. Sin embargo, este efecto sinérgico tiene un requisito relativamente exigente en la relación de composición, y el contenido de tungsteno y cobre debe controlarse con precisión para lograr el mejor efecto de resistencia a la oxidación a alta temperatura.

2.3 CTIA GROUP LTD Aleación de cobre y tungsteno MSDS

La aleación de cobre y tungsteno es un material compuesto hecho de tungsteno (W) y cobre (Cu) a través del proceso de metalurgia de polvos, que generalmente contiene entre un 70% y un 90% de tungsteno y un 10% y un 30% de cobre, ampliamente utilizado en contactos eléctricos, interruptores de alto voltaje y electrodos de electromecanizado. Los usos del producto incluyen investigación científica y fabricación industrial, y las aplicaciones específicas pueden involucrar disipadores de calor, electrodos, etc. El propósito de la MSDS es proporcionar una guía de uso seguro para los trabajadores y el personal de rescate de emergencia, incluida la composición química, los peligros potenciales y las recomendaciones de manipulación.

Según la MSDS general de aleación de cobre y tungsteno, esta no suele clasificarse como material peligroso (de acuerdo con OSHA 29 CFR 1910.1200), por lo que no existe una palabra de advertencia o declaración de peligro específica.

y tungsteno incluye tungsteno (N.º CAS: 7440-33-7, contenido 70%-90%) y cobre (N.º CAS: 7440-50-8, contenido 10%-30%).

La aleación de cobre y tungsteno no es fácil de quemar en condiciones normales, pero el polvo generado durante el procesamiento puede provocar un incendio. Se recomienda utilizar agentes extintores de incendios a base de polvo seco, espuma o dióxido de carbono. Nunca utilice un chorro directo de agua para extinguir incendios de polvo metálico, ya que el agua puede provocar que la reacción se intensifique. Durante el calentamiento pueden liberarse humos de óxido metálico. Los bomberos deben usar aparatos de respiración autónomos para evitar la inhalación de humos tóxicos. tungsteno cumple con los requisitos del inventario TSCA y no presenta ningún riesgo ecológico significativo, pero los desechos de su

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

procesamiento pueden causar un ligero impacto en el medio ambiente. No se ha completado completamente una evaluación de seguridad química y se recomienda precaución y cumplimiento de las regulaciones locales.



CTIA GROUP LTD Aleación de cobre y tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm³)	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 Alloys

Power Equipment: Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

Electronics and Semiconductor Industry: Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

Electrical Discharge Machining (EDM): Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

Aerospace and Defense: High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

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 Correlación entre la microestructura y las propiedades de la aleación de tungsteno y cobre

La aleación de cobre y tungsteno tiene un amplio potencial de aplicación en los campos electrónico, de defensa e industrial debido a su excelente conductividad eléctrica, conductividad térmica, resistencia a altas temperaturas y resistencia a la corrosión por arco. La aleación de cobre y tungsteno está estrechamente relacionada con su microestructura. La morfología del grano, la distribución de fases y las características de la interfaz afectan directamente sus propiedades mecánicas, conductividad eléctrica y durabilidad.

3.1 Información sobre las características microestructurales de la aleación de tungsteno y cobre

La aleación de cobre y tungsteno es la base de su rendimiento, reflejando los procesos de mezcla, prensado, sinterización y posprocesamiento en el proceso de pulvimetalurgia. Las características microestructurales incluyen la morfología y el tamaño del grano, la distribución de fases y la interfaz, que se analizan mediante microscopios (como el microscopio electrónico de barrido SEM y el microscopio electrónico de transmisión TEM). El alto punto de fusión del tungsteno (3422 °C) lo mantiene sólido durante la sinterización, y el punto de fusión más bajo del cobre (1085 °C) forma una fase líquida, que humedece las partículas de tungsteno y llena los espacios, formando una estructura compuesta única. Esta estructura afecta directamente la conductividad eléctrica, la conductividad térmica, la dureza y la resistencia a la erosión del arco de la aleación. A continuación se analizarán en detalle la morfología del grano, el tamaño, la distribución de fases y la interfaz.

3.1.1 Morfología y tamaño del grano

Las aleaciones de cobre y tungsteno son el núcleo de las características microestructurales que determinan las propiedades mecánicas y térmicas de la aleación. La morfología del grano está compuesta principalmente por partículas de tungsteno. Como el tungsteno permanece sólido durante el proceso de sinterización, su morfología conserva las características del polvo inicial y suele ser poliédrica o casi esférica. La uniformidad de la morfología del grano afecta directamente la consistencia del rendimiento. La distribución regular de partículas de tungsteno ayuda a dispersar la tensión, mientras que la morfología irregular puede provocar puntos débiles locales.

El tamaño del grano se ve afectado significativamente por el proceso de preparación. El tamaño de partícula del polvo de tungsteno inicial suele estar en el rango de 1 a 10 micrones, que se puede reducir aún más a escala nanométrica mediante molienda de bolas de alta energía. La temperatura y el tiempo de sinterización juegan un papel importante en el tamaño del grano: las temperaturas más bajas retienen granos más pequeños y las temperaturas más altas posiblemente induzcan el crecimiento del grano. Durante el proceso de sinterización en fase líquida, la fluidez de la fase líquida de cobre promueve la reorganización y el crecimiento de las partículas de tungsteno, y el tamaño de grano suele estar entre 5 y 20 micrones, dependiendo del contenido de tungsteno y los parámetros del proceso. La aplicación de polvo de tungsteno a escala nanométrica puede controlar el tamaño del grano a nivel submicrónico,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mejorando significativamente el rendimiento.

La morfología y el tamaño del grano tienen un impacto significativo en el rendimiento. Un tamaño de grano más pequeño mejora la resistencia y la dureza de la aleación a través del efecto Hall-Page, y los granos finos aumentan la densidad del límite del grano, bloquean el movimiento de dislocación y mejoran la resistencia a la deformación. Por ejemplo, cuando el tamaño de partícula de tungsteno se reduce al nivel nanométrico, la dureza se puede aumentar entre un 20% y un 30%, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de alto desgaste, como electrodos de electromecanizado. El tamaño del grano también afecta la conductividad eléctrica y la conductividad térmica. Los granos demasiado pequeños pueden aumentar la resistencia del límite de grano y reducir la eficiencia de la transferencia de electrones y calor, pero la estructura de red de la fase de cobre puede compensar este defecto. La morfología de grano uniforme reduce los puntos de concentración de tensión y mejora la resistencia a la fatiga, especialmente en entornos de ciclos térmicos o choques mecánicos.

La optimización del proceso de preparación es la clave para controlar la morfología y el tamaño del grano. La sinterización por plasma de chispa (SPS) inhibe el crecimiento excesivo de grano y mantiene una estructura de grano fino mediante calentamiento rápido y alta presión. El prensado isostático en caliente (HIP) elimina la porosidad y mejora la consistencia de la distribución del grano a través de la presión omnidireccional. La adición de oligoelementos (como níquel o hierro) puede ajustar la energía del límite del grano y estabilizar la microestructura. La reducción del tamaño del grano también mejora la resistencia de la aleación a la erosión por arco. Las partículas finas de tungsteno dispersan la energía del arco y reducen el riesgo de fusión de la superficie. Las direcciones de optimización incluyen el desarrollo de nanopulvos ultrafinos o el uso de tecnología de fabricación aditiva para lograr un control de grano más preciso. En resumen, la morfología y el tamaño del grano de las aleaciones de tungsteno y cobre proporcionan un soporte básico para su desempeño, especialmente en escenarios donde se deben tener en cuenta tanto la resistencia como la conductividad.

3.1.2 Distribución de fases e interfaz

Las aleaciones de cobre y tungsteno son componentes importantes de las características microestructurales, que afectan directamente las propiedades mecánicas y las características funcionales de la aleación. El rendimiento y la calidad de la interfaz afectan la transferencia de carga y la difusión del calor.

La formación de la distribución de fases depende del proceso de sinterización. La sinterización en fase líquida es el paso clave. El cobre se funde por encima de 1085 °C, humedece las partículas de tungsteno y rellena los huecos por acción capilar. Cuando el contenido de tungsteno es alto (como W80/Cu20), la fase de cobre se distribuye de forma discontinua, rodeando partículas de tungsteno aisladas; Las partículas de tungsteno están incrustadas. La uniformidad de la distribución de fases se controla mediante procesos de molienda de bolas y mezcla de polvo de alta energía. Un tiempo de molienda de bolas demasiado corto puede provocar aglomeración de tungsteno, mientras que un tiempo de molienda de bolas demasiado largo puede introducir impurezas. Después de la sinterización, el enfriamiento y la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

solidificación de la fase de cobre fijan la estructura de distribución de la fase, y el prensado isostático en caliente puede optimizar aún más la uniformidad.

La calidad de la interfaz es clave para la correlación entre la distribución de fase y el rendimiento. La interfaz entre el tungsteno y el cobre está unida química y mecánicamente mediante sinterización en fase líquida, donde la fase líquida de cobre penetra en la superficie de las partículas de tungsteno y mejora la adhesión de la interfaz. Camino eficiente de transferencia de electrones y calor. Se logra una mayor resistencia de la interfaz agregando oligoelementos como el níquel, que mejora la humectabilidad y mejora la unión interfacial. Una interfaz débil puede provocar delaminación o agrietamiento, especialmente bajo tensión térmica o de arco.

La distribución de fases y la interfaz tienen efectos significativos en el rendimiento. La distribución uniforme de la fase mejora las propiedades integrales de la aleación, la fase de tungsteno proporciona dureza y resistencia a altas temperaturas, y la fase de cobre asegura la conductividad eléctrica y térmica. La calidad de la interfaz afecta directamente la resistencia a la erosión del arco, y una interfaz fuerte reduce la ablación concentrada de la energía del arco en el límite de fase. conductividad y conductividad térmica; Las aleaciones con alto contenido de tungsteno (como W90/Cu10) son adecuadas para aplicaciones de electrodos debido a su fase dominante de tungsteno, fuerte dureza y resistencia al desgaste. Los defectos interfaciales, como huecos o áreas no humedecidas, pueden degradar el rendimiento y deben eliminarse mediante la optimización del proceso.

La mejora en el proceso de preparación es la clave para optimizar la distribución y la interfaz de las fases. La sinterización al vacío reduce la oxidación y mantiene la interfaz pura; El calentamiento por etapas controla el flujo de la fase líquida de cobre y mejora la distribución de la fase. Las aleaciones de tungsteno y cobre brindan un apoyo importante para su desempeño, especialmente en escenarios donde se deben tener en cuenta la conductividad, la resistencia a altas temperaturas y la resistencia mecánica.

3.1.3 Porosidad y manifestación de defectos

tungsteno tiene características clave en la microestructura, que afectan directamente las propiedades mecánicas, la conductividad y la durabilidad de la aleación. La porosidad se refiere a los pequeños espacios que no se llenan completamente con la fase líquida de cobre durante el proceso de sinterización, y los defectos incluyen grietas, partículas no humedecidas o aglomeraciones de impurezas. Estos defectos estructurales generalmente se identifican mediante observación microscópica o pruebas de densidad (como el método de Arquímedes). La porosidad está estrechamente relacionada con la preparación del proceso. La porosidad excesiva puede reducir la densidad y afectar la consistencia del rendimiento.

El mecanismo de formación de poros está relacionado principalmente con las propiedades del polvo, la uniformidad de la mezcla del polvo y las condiciones de sinterización. El tamaño desigual de las partículas o la aglomeración del polvo de tungsteno inicial pueden generar una fase líquida de cobre local insuficiente, dejando microporos. Una presión insuficiente o una fluidez deficiente del polvo durante el prensado pueden generar huecos iniciales, y la sinterización a una temperatura demasiado baja (por

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ejemplo, por debajo de 1100 °C) o durante un tiempo insuficiente puede no lograr eliminar completamente estos huecos. La mojabilidad de la fase líquida de cobre también juega un papel clave. El ángulo de humectación entre el cobre y el tungsteno es relativamente alto (aproximadamente 30°-40°). Si se introducen impurezas en la atmósfera de sinterización (como un entorno oxidante), el efecto humectante se debilita y la porosidad aumenta. Los tamaños de poro típicos están en el rango de 1 a 10 micrones, y una distribución desigual puede resultar en la formación de macroporos (>20 micrones), lo que reduce significativamente el rendimiento.

Los defectos pueden manifestarse de diversas formas. Las grietas pueden ser causadas por estrés térmico o estrés por cambio de fase durante el prensado o enfriamiento. Especialmente cuando el contenido de tungsteno es alto, la contracción desigual de la fase de cobre puede provocar fácilmente grietas en la interfaz. Las partículas no humedecidas se refieren a partículas de tungsteno cuya superficie no está completamente penetrada por la fase líquida de cobre, lo que generalmente se debe a una temperatura de sinterización insuficiente o a un contenido de cobre demasiado bajo, y aparecen como partículas de tungsteno aisladas. Las aglomeraciones de impurezas (como óxidos o carburos) pueden provenir de las materias primas o del proceso de procesamiento y concentrarse en los límites de grano o interfaces, lo que afecta la transferencia de carga y la difusión del calor. La densidad de poros y defectos se puede reducir significativamente mediante prensado isostático en caliente (HIP) o sinterización por plasma por chispa (SPS), y la densidad puede alcanzar más del 98%.

La porosidad y los defectos tienen un impacto significativo en el rendimiento. La alta porosidad reduce la resistencia a la flexión y la dureza de la aleación porque los huecos se convierten en puntos de concentración de tensión que pueden causar fracturas fácilmente, especialmente en aplicaciones de alto desgaste, como los electrodos. La conductividad eléctrica y térmica también se ve afectada, ya que los poros aumentan la resistencia eléctrica y térmica, reduciendo la eficiencia de la transferencia de corriente y calor. La resistencia a la erosión del arco también se reduce y los poros tienden a convertirse en puntos de concentración de energía del arco, lo que acelera la fusión de la superficie. Defectos como grietas pueden propagarse por ciclos térmicos o choques mecánicos, acortando la vida útil. Las direcciones de optimización incluyen el uso de polvos a escala nanométrica para mejorar la uniformidad de las partículas, optimizar los parámetros de sinterización (como el calentamiento por etapas) para reducir la porosidad o rellenar defectos mediante recubrimientos de superficies. En resumen, el control de poros y defectos es la clave para mejorar el rendimiento de la aleación de cobre y tungsteno.

3.1.4 Diferencias estructurales bajo distintos procesos de preparación

Las aleaciones de cobre y tungsteno varían significativamente debido a los diferentes procesos de preparación. Los procesos comunes incluyen la pulvimetalurgia tradicional, la infiltración de cobre, la sinterización por plasma por chispa (SPS) y la fabricación aditiva (impresión 3D). Cada método tiene un efecto único en la morfología del grano, la distribución de fases, la porosidad y la calidad de la interfaz. La selección del proceso determina directamente el rendimiento de la aleación y debe optimizarse según los requisitos de la aplicación. La pulvimetalurgia convencional es un proceso ampliamente utilizado que implica la mezcla, prensado y sinterización de polvos. El polvo de tungsteno y el polvo de cobre se

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mezclan mediante molienda de bolas de alta energía, se prensan para darle forma y luego se sinterizan. Las características estructurales incluyen una distribución poliédrica de partículas de tungsteno, una red discontinua de fases de cobre y una porosidad típicamente entre el 5% y el 10%. La unión de la interfaz depende de la humectación de la fase líquida de cobre y la calidad está controlada por la temperatura y el tiempo de sinterización. Una temperatura más alta puede provocar el crecimiento del grano y reducir la uniformidad. Adecuado para sustratos de disipación de calor con altos requisitos de conductividad eléctrica y conductividad térmica.

El método de infiltración de cobre prepara la aleación sinterizando primero el esqueleto de tungsteno y luego infiltrando cobre líquido. El esqueleto de tungsteno forma una estructura porosa a una temperatura más alta y el cobre se infiltra y la llena. Las características estructurales son que la fase de tungsteno es un esqueleto continuo, la fase de cobre se distribuye uniformemente y la porosidad se puede reducir al 2%-5%. y el consumo de energía es alto. Es adecuado para aplicaciones de electrodos que requieren alta densidad.

La sinterización por plasma de chispa (SPS) utiliza corriente pulsada y presión mecánica, y el tiempo de sinterización es corto (varios minutos). Las características estructurales son partículas finas de tungsteno, distribución uniforme de la fase de cobre, porosidad inferior al 2% y límites de grano claros. El calentamiento rápido inhibe el crecimiento del grano y la fuerza de unión de la interfaz es fuerte, lo que es adecuado para aplicaciones de alta dureza y resistencia a la erosión por arco, como contactos. La desventaja es que el costo del equipo es alto y el ámbito de aplicación es limitado.

La fabricación aditiva (como la fusión selectiva por láser (SLM)) prepara aleaciones depositando polvo capa por capa. Las características estructurales son una distribución en gradiente de fases de tungsteno y cobre, tamaño de grano controlable y porosidad que depende de los parámetros del láser y puede ser inferior al 3% en condiciones optimizadas. La calidad de la interfaz es alta y se admiten geometrías complejas, pero la tensión térmica puede introducir microfisuras. Adecuado para piezas aeroespaciales personalizadas. Las diferencias de proceso afectan el rendimiento. La pulvimetalurgia tradicional es económica pero tiene una alta porosidad y es adecuada para la producción a gran escala; La infiltración de cobre tiene buena densidad pero alto costo; SPS ofrece un alto rendimiento pero es adecuado para lotes pequeños; La fabricación aditiva es flexible pero requiere la optimización del estrés térmico. Las direcciones de optimización incluyen la combinación de múltiples procesos (como SPS + infiltración de cobre) para mejorar la densidad o el uso de tecnología de monitoreo inteligente para ajustar los parámetros en tiempo real. En resumen, las diferencias estructurales en los procesos de preparación brindan diversas opciones para optimizar el rendimiento.

3.2 La relación intrínseca entre la microestructura y el rendimiento de la aleación de cobre y tungsteno

Existe una relación intrínseca entre la microestructura de la aleación de cobre y tungsteno y su rendimiento. La morfología del grano, la distribución de fases, la porosidad, los defectos y el proceso de preparación determinan conjuntamente su conductividad eléctrica, conductividad térmica, resistencia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mecánica y durabilidad. La optimización de la microestructura se logra mejorando la unión de la interfaz, reduciendo los defectos y controlando la relación de fases para cumplir con diferentes requisitos de aplicación.

El efecto del tamaño del grano en el rendimiento se refleja a través del efecto Hall-Page. Los granos finos aumentan la densidad del límite del grano, mejoran la resistencia y la dureza, pero pueden aumentar la resistencia y reducir la conductividad. La distribución de fase determina las rutas de conducción eléctrica y térmica, la red continua de la fase de cobre mejora el rendimiento y la fase de tungsteno mejora la resistencia a altas temperaturas. La porosidad y los defectos reducen la densidad, lo que afecta la resistencia a la flexión y la resistencia a la erosión por arco, y las estructuras densas mejoran significativamente el rendimiento. Mejora el rendimiento general.

La optimización de la microestructura debe combinarse con el escenario de aplicación. El sustrato de disipación de calor requiere una alta continuidad de la fase de cobre y el electrodo requiere una alta densidad de fase de tungsteno. Las investigaciones futuras pueden explorar estructuras nanocompuestas o diseños de gradientes funcionales para revelar aún más la conexión intrínseca entre la microestructura y el rendimiento.

3.2.1 Mecanismo del efecto de la estructura del grano sobre la resistencia

grano en la resistencia de la aleación de cobre y tungsteno se refleja principalmente en el efecto barrera de los límites del grano y la capacidad de dispersión de la tensión. La resistencia es la capacidad de una aleación para resistir la deformación o fractura y está directamente relacionada con el tamaño del grano y la morfología. Los granos más pequeños restringen el movimiento de las dislocaciones, un mecanismo de fortalecimiento clave, al aumentar la densidad de los límites de los granos. Resistencia de la aleación a la deformación. La distribución uniforme de los granos optimiza aún más este efecto, reduce los puntos de concentración de tensión local y mejora la capacidad de carga de la estructura general.

La morfología del grano también tiene una influencia importante en la resistencia. Los granos poliédricos regulares o casi esféricos pueden dispersar de manera más efectiva la carga aplicada y evitar la acumulación excesiva de tensión en una dirección específica. Por el contrario, los granos irregulares o planos pueden provocar una distribución desigual de la tensión y aumentar el riesgo de fractura. Durante el proceso de sinterización, la reorganización y el crecimiento de los granos están regulados por la temperatura y la presión, y la formación de granos finos depende de un enfriamiento rápido o de procesos de sinterización de corta duración, que mantienen la distribución densa de los límites de los granos. La fase de tungsteno actúa como un esqueleto de alta dureza y su estructura de grano proporciona un soporte rígido para la aleación, mientras que el efecto de unión de la fase de cobre mejora aún más la fuerza de conexión entre los granos.

Este mecanismo de acción permite que las aleaciones de cobre y tungsteno funcionen bien en aplicaciones que requieren alta resistencia. Por ejemplo, en entornos de alta carga o impacto mecánico, la estructura de grano fino puede resistir eficazmente la deformación y extender la vida útil de los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

componentes. El efecto del fortalecimiento del límite de grano también está relacionado con la densidad de la microestructura, y la reducción de poros o defectos mejora aún más la resistencia. Para optimizar la estructura del grano es necesario estabilizar los límites del grano controlando los parámetros de sinterización o introduciendo oligoelementos para mejorar las propiedades mecánicas integrales de la aleación, ejerciendo así un mayor potencial en escenarios de alta confiabilidad.

3.2.2 Mecanismo del efecto de la estructura del grano sobre la tenacidad

grano en la tenacidad de la aleación de cobre y tungsteno se refleja principalmente en la capacidad de absorción de energía de los límites del grano y la coordinación de la deformación plástica. La tenacidad es la capacidad de una aleación para absorber energía y resistir la fractura, que está estrechamente relacionada con el tamaño del grano y las características de la interfaz. Los granos más grandes generalmente tienen mayor plasticidad y pueden absorber energía a través del deslizamiento por dislocación y la deformación gemela, mejorando así la tenacidad. Sin embargo, los granos demasiado grandes pueden reducir la resistencia y provocar un desequilibrio en el rendimiento. Los granos más pequeños aumentan la resistencia del material al crecimiento de grietas al aumentar la densidad del límite de grano, pero pueden sacrificar algo de plasticidad y se debe buscar un equilibrio entre resistencia y tenacidad.

El efecto de la morfología del grano sobre la tenacidad también es significativo. La morfología de grano regular ayuda a transferir la tensión de manera uniforme y reduce el riesgo de iniciación y propagación de grietas. La fase de cobre actúa como una fase de enlace de bajo punto de fusión y su ductilidad proporciona una vía de absorción de energía adicional entre los granos. Cuando se aplica una carga externa, la fase de cobre puede sufrir una deformación plástica, amortiguando el efecto frágil de la fase de tungsteno. La microdeformación en los límites de grano también alivia la concentración de tensión local a través de mecanismos de absorción y redistribución de dislocaciones. Durante el proceso de sinterización, la fluidez de la fase líquida de cobre promueve la unión estrecha entre los granos y mejora la base de tenacidad de las características, mientras que el proceso de enfriamiento rápido ayuda a mantener la plasticidad de los granos finos.

Este mecanismo de acción permite que la aleación de cobre y tungsteno muestre una excelente tenacidad en entornos de carga dinámica o de impacto. Por ejemplo, en escenarios de acción de arco o vibración mecánica, la capacidad de deformación coordinada de la estructura del grano puede prevenir eficazmente la fractura frágil y extender la vida útil de los componentes. La mejora de la tenacidad también depende de la uniformidad de la microestructura. La reducción de poros o áreas no humedecidas mejora la eficiencia de la transferencia de carga.

3.2.3 Correlación entre la distribución de fases y la conductividad

La relación entre la distribución de fases y la conductividad eléctrica de la aleación de tungsteno y cobre se refleja principalmente en la continuidad de la fase de cobre y la dispersión de la fase de tungsteno. La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad de una aleación para transportar corriente eléctrica

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y está directamente relacionada con la uniformidad de la distribución de fases. El cobre es una fase altamente conductora y su red continua es la base de la conductividad eléctrica. Cuando la fase de cobre forma un camino pasante, los electrones pueden transferirse de manera eficiente, mejorando significativamente las propiedades conductoras de la aleación. La distribución dispersa de la fase de tungsteno como fase de mejora de baja conductividad no obstaculizará significativamente el flujo de corriente, pero un contenido de tungsteno demasiado alto puede aumentar la resistencia y reducir la conductividad general.

La uniformidad de la distribución de fase es fundamental para la conductividad eléctrica. La continuidad de la fase de cobre depende de la humectación y el llenado completos del cobre durante el proceso de sinterización en fase líquida. Si las partículas de tungsteno se aglomeran o la fase líquida de cobre es insuficiente, se pueden formar zonas discontinuas, aumentando la resistencia de contacto. La dispersión uniforme de la fase de tungsteno se controla mediante el proceso de mezcla de polvo. El tiempo de molienda de bolas y la uniformidad de la mezcla afectan directamente la calidad de la distribución de fases. El aumento adecuado de la temperatura de sinterización promueve el flujo de la fase líquida de cobre, mejora la conexión entre las fases y optimiza la conductividad eléctrica. La calidad de la interfaz también juega un papel auxiliar. La buena combinación entre tungsteno y cobre reduce la dispersión de electrones y mantiene una alta conductividad.

Esta asociación hace que las aleaciones de cobre y tungsteno destaquen en aplicaciones que requieren alta conductividad. Por ejemplo, en contactos eléctricos o sustratos de disipación de calor, la red continua de fases de cobre asegura una transmisión de corriente eficiente y satisface las necesidades de alta densidad de corriente. La optimización de la distribución de fases también afecta la resistencia a la erosión del arco. La distribución uniforme de la fase de cobre reduce los puntos de concentración de energía del arco y favorece indirectamente la estabilidad de las propiedades conductoras. Para optimizar la distribución de la fase es necesario ajustar el contenido de cobre o utilizar un proceso de sinterización de varios pasos para mejorar la estructura de red de la fase de cobre, mejorar la conductividad y cumplir con los requisitos de las aplicaciones eléctricas de alto rendimiento.

3.2.4 Correlación entre la distribución de fases y la conductividad térmica

de fases y la conductividad térmica de la aleación de tungsteno y cobre se reflejan principalmente en la conectividad de la fase de cobre y la dispersión de la fase de tungsteno. La conductividad térmica es la capacidad de una aleación para transferir calor y está directamente relacionada con la uniformidad de la distribución de fases. El cobre es una fase altamente conductora térmica y su red continua es la base para la conducción del calor. Una fase de mejora de baja conductividad térmica, la distribución dispersa de la fase de tungsteno no obstaculizará significativamente el flujo de calor, pero un contenido de tungsteno demasiado alto puede reducir la conductividad térmica general porque su conductividad térmica es inferior a la del cobre. La uniformidad de la distribución de fases es fundamental para la conductividad térmica. La continuidad de la fase de cobre depende del flujo completo y la penetración del cobre durante el proceso de sinterización en fase líquida. Si las partículas de tungsteno se aglomeran o la fase líquida de cobre se distribuye de manera desigual, pueden formarse puntos de resistencia térmica, lo que dificulta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la transferencia de calor. La dispersión uniforme de la fase de tungsteno se consigue mediante el proceso de mezcla de polvo. Una buena mezcla garantiza una conexión perfecta entre las fases y optimiza la ruta de conducción del calor. La regulación adecuada de la temperatura de sinterización promueve la humectación y el llenado de la fase líquida de cobre y mejora la eficiencia de transferencia de calor entre fases. La calidad de la interfaz también juega un papel importante en esto. La buena combinación entre tungsteno y cobre reduce la dispersión del calor y mantiene una difusión eficiente del calor.

Esta relación permite que las aleaciones de cobre y tungsteno destaquen en aplicaciones que requieren un alto rendimiento de disipación de calor. Por ejemplo, en electrónica de potencia o en equipos de alta temperatura, la red continua de fases de cobre puede dispersar rápidamente el calor para evitar la degradación del rendimiento causada por sobrecalentamiento. La optimización de la distribución de fases también afecta la resistencia a la erosión del arco. La distribución uniforme de la fase de cobre ayuda a difundir el calor de manera uniforme y a reducir el daño local por alta temperatura causado por los arcos. El ajuste de la distribución de fases requiere optimizar el contenido de cobre o utilizar un proceso de sinterización de varios pasos para garantizar que la fase de cobre forme una red de conducción de calor eficaz, mejorando así la conductividad térmica y cumpliendo con los requisitos de gestión térmica de alto rendimiento.

3.2.5 Efecto de los poros y defectos en la dureza

Los poros y defectos en la dureza de la aleación de cobre y tungsteno se reflejan principalmente en la densidad estructural y la distribución de la tensión. La dureza es la capacidad de una aleación para resistir la indentación o el desgaste de la superficie, lo que está directamente relacionado con la integridad de la microestructura. La porosidad, en forma de pequeños espacios, reduce la densidad general del material y debilita su capacidad para resistir la deformación. La microestructura juega un papel clave en el rendimiento de la dureza, y la presencia de poros y defectos debilita directamente la resistencia mecánica de la aleación.

La formación de poros suele estar relacionada con un relleno insuficiente o con una contracción del material durante la sinterización. Cuando la fase líquida de cobre no logra penetrar completamente los espacios entre las partículas de tungsteno, los huecos residuales se dispersarán dentro de la aleación. Estos poros son propensos a provocar concentración de tensiones bajo cargas externas, provocando que el material se deforme o se rompa a presiones más bajas. Defectos como grietas pueden generarse por estrés térmico durante el prensado o enfriamiento, especialmente en zonas de cambio de fase o grandes gradientes de temperatura. La expansión de las grietas reduce aún más la dureza. Las partículas no humedecidas existen aisladas debido a la falta de una unión efectiva con la fase de cobre, lo que debilita la capacidad portante de la estructura general. Estos factores trabajan juntos para reducir la resistencia superficial de la aleación.

La influencia de los poros y defectos en la dureza también se refleja en la estabilidad de las propiedades mecánicas. Una mayor porosidad produce una distribución desigual de la dureza y puede producirse un ablandamiento evidente en zonas locales. Especialmente en entornos de alto desgaste, los poros pueden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

convertirse fácilmente en el punto de inicio del desgaste. La presencia de defectos agrava este efecto y las grietas pueden propagarse bajo cargas repetidas, acelerando la falla del material. La optimización de la microestructura puede mejorar la dureza eliminando poros y reparando defectos, por ejemplo, mejorando el proceso de sinterización o utilizando tecnología de posprocesamiento para mejorar la densidad del material. La optimización de la microestructura puede mejorar significativamente la durabilidad de la aleación en escenarios de impacto mecánico o contacto superficial, haciéndola más adecuada para aplicaciones con altos requisitos de dureza, como electrodos o herramientas de corte.

3.2.6 Efecto de los poros y defectos en la resistencia a la corrosión

Los poros y defectos en la resistencia a la corrosión de la aleación de cobre y tungsteno se reflejan principalmente en la protección de la superficie y la penetración del medio. La resistencia a la corrosión es la capacidad de una aleación para resistir la erosión por medios ambientales, lo que está directamente relacionado con la integridad de la microestructura. Los poros, como espacios abiertos o cerrados, proporcionan un canal para que los medios corrosivos ingresen al interior, acelerando la degradación del material. corrosión o corrosión bajo tensión, reduciendo así la resistencia a la corrosión. La compacidad de la microestructura juega un papel decisivo en la resistencia a la corrosión.

La presencia de poros permite que el medio corrosivo penetre en la aleación, especialmente en un ambiente húmedo o ácido, donde el líquido acumulado en los poros puede provocar corrosión electroquímica. La fase de cobre, como fase de enlace, es susceptible al medio corrosivo y la presencia de poros intensifica la oxidación o disolución del cobre, debilitando la estabilidad general de la aleación. reacción a la corrosión, especialmente bajo altas temperaturas o acción de arco, donde los defectos pueden evolucionar rápidamente en daños graves. La aglomeración de impurezas también puede introducir sitios electroquímicamente activos adicionales, reduciendo aún más la resistencia a la corrosión.

El impacto de los poros y defectos en la resistencia a la corrosión también se refleja en el rendimiento durante el uso a largo plazo. Una mayor porosidad reduce la capacidad de protección de la superficie, especialmente cuando se expone a gases o líquidos corrosivos. Los productos de corrosión en los poros pueden bloquear los canales, pero no pueden evitar una mayor erosión. La presencia de defectos hace que la tasa de corrosión en áreas locales sea mayor que la tasa general. Especialmente en escenarios de corrosión bajo tensión o corrosión por fatiga, los defectos pueden provocar grietas en el material. oxidación mediante sinterización al vacío o utilizando recubrimientos superficiales para aislar medios corrosivos. La aleación optimizada puede mantener la estabilidad a largo plazo en entornos hostiles y es adecuada para aplicaciones que requieren alta resistencia a la corrosión, como equipos marinos o componentes de procesamiento químico.

3.3 Evolución de la microestructura de la aleación tungsteno-cobre

La aleación de cobre y tungsteno experimentará una evolución dinámica durante el proceso de preparación y uso. Su ley de cambio está impulsada por múltiples factores y afecta directamente el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rendimiento de la aleación. La evolución de la microestructura refleja la adaptabilidad y estabilidad del material bajo diferentes condiciones, involucrando el ajuste de la morfología del grano, la distribución de fases y las características de los defectos. impacto, enfatizando su importancia en la optimización de las aplicaciones de aleaciones.

3.3.1 Evolución causada por cambios en las proporciones de composición

El cambio en la relación de composición es un factor impulsor importante en la evolución de la microestructura de las aleaciones de tungsteno y cobre. La distribución del grano, la interfaz de fase y las características de los poros se ven afectadas por el ajuste de la relación de tungsteno a cobre. Cuando el contenido de tungsteno aumenta, sus partículas dominan la aleación y presentan una estructura de esqueleto más densa, mientras que la fase de cobre cambia gradualmente de una red continua a una fase de relleno dispersa. Este cambio hace que la morfología del grano se vuelva regular, el área de interfaz disminuya y la porosidad aumente debido a la fase líquida de cobre insuficiente. Por el contrario, cuando aumenta el contenido de cobre, la fluidez de la fase líquida de cobre aumenta, humedeciendo las partículas de tungsteno y llenando los huecos, haciendo que la distribución de la fase sea más uniforme, los límites de grano se difuminan gradualmente y la porosidad disminuye debido al efecto de relleno del cobre.

El ajuste de la relación de composición también desencadena la evolución de la interfaz de fase. Cuando el contenido de tungsteno es alto, la interfaz se manifiesta principalmente como contacto directo entre partículas de tungsteno y la fuerza de unión depende de las condiciones de sinterización; Cuando aumenta el contenido de cobre, la interfaz está dominada por la fase de cobre, se mejora el efecto humectante y se mejora la fuerza de unión interfacial, pero se puede introducir estrés térmico. Alto, los granos permanecen de mayor tamaño y cuando la proporción de cobre es alta, los granos se refinan debido a la reorganización de la fase líquida. Esta evolución afecta directamente la densidad de la microestructura y luego ajusta las propiedades mecánicas y eléctricas de la aleación.

Esta ley de evolución permite que las aleaciones de tungsteno y cobre se adapten a diferentes requisitos de aplicación. Por ejemplo, aumentar la relación de tungsteno mejora la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la erosión del arco, lo que lo hace adecuado para entornos de alto desgaste; Aumentar la proporción de cobre mejora la conductividad eléctrica y térmica, lo que lo hace adecuado para sustratos de disipación de calor. El control de la evolución requiere optimizar el proceso de mezcla de polvos y los parámetros de sinterización para asegurar el desarrollo coordinado entre la relación de composición y la microestructura.

3.3.2 Transformación estructural durante el tratamiento térmico

El proceso de tratamiento térmico es una etapa importante en la evolución de la microestructura de las aleaciones de tungsteno y cobre. Provoca cambios como el crecimiento del grano, la recombinación de fases y la eliminación de defectos mediante la regulación de la temperatura, el tiempo y la atmósfera. En la etapa inicial del calentamiento, la fase de cobre se funde primero debido a su punto de fusión más bajo,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

humedece las partículas de tungsteno y llena los poros, lo que hace que la distribución de fases tienda a ser uniforme. A medida que la temperatura aumenta, los granos comienzan a reorganizarse y crecer. Las partículas de tungsteno pueden ajustar su morfología debido a la difusión térmica y los límites de los granos gradualmente se vuelven claros o fusionados. El tratamiento térmico a largo plazo puede provocar que los granos sean demasiado grandes, que aparezca tensión térmica en la interfaz y que los poros se reduzcan o redistribuyan debido a la contracción del material.

El tratamiento térmico también induce un cambio en la estructura de fases. La fluidez de la fase líquida de cobre mejora la conexión entre las partículas de tungsteno, y se pueden llenar algunas áreas no humedecidas y se mejora la fuerza de unión interfacial. Sin embargo, una temperatura demasiado alta puede provocar que el cobre se volatilice u oxide, lo que afecta la estabilidad de la distribución de fases. Defectos como grietas o aglomeraciones de impurezas pueden desaparecer o migrar durante el tratamiento térmico, especialmente en condiciones asistidas por presión, y la microestructura tiende a ser densa. El proceso de enfriamiento corrige estos cambios. El enfriamiento rápido retiene los granos finos y el enfriamiento lento promueve el crecimiento del grano y la estabilización de la fase.

Esta transformación estructural permite ajustar las propiedades de las aleaciones de cobre-tungsteno. Por ejemplo, un tratamiento térmico adecuado mejora la uniformidad y la resistencia del material, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de contacto que requieren alta confiabilidad; El sobrecalentamiento puede reducir la tenacidad y los parámetros deben controlarse cuidadosamente. La optimización del tratamiento térmico debe combinarse con procesos específicos, como el calentamiento por etapas o la protección en atmósfera inerte, para lograr la evolución ideal de la microestructura.

3.3.3 Retroalimentación del entorno de uso sobre la estructura

El entorno de uso en la microestructura de la aleación de cobre y tungsteno se refleja en el ajuste estructural y la degradación causada por las condiciones externas, que involucran factores como la temperatura, la humedad, la corriente y el estrés mecánico. En un entorno de alta temperatura, la fase de cobre puede ablandarse o fundirse parcialmente, la conexión entre las partículas de tungsteno se ve afectada por el estrés térmico y pueden aparecer microgrietas o descamación en la interfaz. La exposición prolongada a ambientes húmedos o corrosivos hace que la fase de cobre sea susceptible a la oxidación o erosión, y los poros se convierten en el canal de entrada para medios corrosivos, acelerando la degradación estructural. Bajo la acción del arco, los granos superficiales pueden remodelarse debido a la ablación a alta temperatura y la expansión de poros y defectos agrava la destrucción de la microestructura.

El entorno de tensión mecánica tiene una retroalimentación significativa sobre la estructura. La carga repetida puede provocar deformación o fractura del grano, la formación de nuevas grietas en la interfaz y la expansión de los poros debido a la concentración de tensión. Cuando pasa la corriente, la temperatura alta local induce la recombinación de fases, la fase de cobre puede migrar o volatilizarse y la estructura del esqueleto de tungsteno queda expuesta gradualmente. Los cambios cíclicos en el entorno de uso, como los ciclos térmicos o la conmutación de arco, hacen que la microestructura se adapte o se deteriore gradualmente, y los límites de grano y la distribución de fases pueden sufrir ajustes dinámicos, lo que

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

afecta el rendimiento a largo plazo.

Esta retroalimentación hace que la aleación de cobre y tungsteno muestre una durabilidad diferente en diferentes entornos. Por ejemplo, en escenarios de arco de alta temperatura, los ajustes estructurales mejoran la resistencia a la corrosión; Mientras que en ambientes húmedos, la degradación acelera la atenuación de la vida. La retroalimentación ambiental proporciona una base para optimizar el diseño, y la degradación estructural se puede mitigar mediante recubrimientos de superficie o control ambiental.

3.4 Estrategia de control de la microestructura de la aleación de tungsteno-cobre

tungsteno tiene como objetivo optimizar la morfología del grano, la distribución de fases, las características de los poros y la calidad de la interfaz a través de una variedad de medios técnicos para mejorar la conductividad eléctrica, la conductividad térmica, la resistencia mecánica y la durabilidad de la aleación. El control de la microestructura es la clave para lograr aplicaciones de alto rendimiento, abarcando el refinamiento del proceso de preparación, la optimización de la adición de elementos de aleación y la exploración en profundidad de la relación entre la estructura y el rendimiento. Estas estrategias se adaptan a las diversas necesidades de contactos eléctricos, electrodos de soldadura y componentes de alta confiabilidad mediante el ajuste de los parámetros del proceso y el diseño de la composición del material.

3.4.1 Métodos de control basados en el proceso de preparación

El método de control basado en el proceso de preparación es la base para regular la microestructura de la aleación de tungsteno-cobre. Las características microscópicas se pueden ajustar con precisión optimizando los enlaces de mezcla, prensado, sinterización y posprocesamiento. El proceso de mezcla de polvos es el punto de partida de la regulación, y sentar las bases para el desempeño posterior. El ajuste de parámetros durante el proceso de mezcla de polvo, como el tiempo de molienda y la selección del medio, afecta el tamaño y la morfología de las partículas de polvo. Las partículas finas ayudan a mejorar la resistencia, mientras que las partículas más grandes pueden mejorar la tenacidad. Seleccionar el rango de tamaño de partícula de polvo apropiado es la clave para controlar el tamaño del grano, y el diseño del proceso debe personalizarse de acuerdo con el rendimiento objetivo.

El proceso de prensado forma el polvo aplicando presión, determinando preliminarmente la disposición del grano y la distribución de los poros. La uniformidad de la presión afecta directamente la compacidad del cuerpo verde. Una presión demasiado baja puede generar una estructura suelta y aumentar la porosidad refleja, mientras que una presión demasiado alta puede causar la ruptura de partículas o concentración de tensión. El diseño de la matriz de prensado y la optimización de los parámetros del proceso pueden controlar eficazmente la densidad y la precisión geométrica del cuerpo verde, proporcionando una base estable para la sinterización. La microestructura del cuerpo verde después de presionar preliminarmente las características de distribución de tungsteno y cobre, y la fase de cobre comienza a mostrar su potencial de humectación, preparándose para la sinterización en fase líquida. El perfeccionamiento del proceso de prensado ayuda a reducir los defectos iniciales y sienta una buena base

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

para la optimización posterior de la estructura.

El proceso de sinterización es la etapa central de la regulación de la microestructura. Se utiliza un tratamiento de alta temperatura para lograr la unión de fases y reducir la porosidad. La sinterización en fase líquida es un método común. El cobre se funde a alta temperatura, humedece las partículas de tungsteno y llena los espacios, mejorando la unión interfacial. El control de la temperatura y el tiempo de sinterización es clave. Entorno de gas inerte, puede prevenir la introducción de impurezas oxidativas, mantener la pureza del tungsteno y el cobre y optimizar la distribución de fases. La tecnología de sinterización asistida por presión o calentamiento por etapas mejora aún más la microestructura, reduce la porosidad y mejora la densidad, y es particularmente adecuada para aplicaciones que requieren alta resistencia y resistencia a la corrosión. La optimización del proceso de sinterización garantiza la uniformidad y estabilidad de la microestructura.

Los procesos de postratamiento proporcionan un medio complementario para ajustar la microestructura. El prensado isostático en caliente elimina la porosidad residual a través de la presión omnidireccional, mejora la consistencia de la distribución del grano y mejora el rendimiento general del material. Los tratamientos de superficie, como técnicas de pulido o recubrimiento, pueden reparar defectos y mejorar la resistencia a la corrosión y la resistencia a la erosión por arco. El proceso de tratamiento térmico regula el crecimiento del grano y la estabilidad de la fase y equilibra la resistencia y la tenacidad ajustando la temperatura y la velocidad de enfriamiento. La elección de diferentes métodos de postratamiento depende de los requisitos específicos de la aplicación. Por ejemplo, las aplicaciones de alta conductividad pueden priorizar la limpieza de la superficie, mientras que las aplicaciones de alta resistencia al desgaste pueden requerir un tratamiento de endurecimiento. El método de control basado en el proceso de preparación permite que la microestructura de la aleación de cobre y tungsteno se adapte a diversos requisitos de rendimiento, proporcionando un soporte sólido para componentes de alta confiabilidad.

3.4.2 Métodos de optimización de la adición de elementos de aleación

El tipo y contenido de elementos añadidos afectan directamente la morfología del grano, la distribución de fases, la unión de la interfaz y las características de los defectos, con el objetivo de mejorar la conductividad eléctrica, la conductividad térmica, la resistencia mecánica o la resistencia a la corrosión. Los elementos añadidos comunes incluyen níquel, hierro o cobalto, que pueden interactuar con el tungsteno y el cobre a través de afinidad química o acción física para optimizar la microestructura.

El níquel, como elemento aditivo común, puede mejorar significativamente la mojabilidad del cobre al tungsteno. Después de agregar níquel, se mejora la fluidez de la fase líquida de cobre durante la sinterización en fase líquida, lo que hace que la interfaz entre las partículas de tungsteno sea más cercana y reduce el área no humedecida y los poros. Este efecto de mejora de la humectación mejora la uniformidad de la distribución de fases, mejorando así la densidad y la resistencia del material. El níquel también puede formar compuestos estables en los límites del grano, inhibiendo el crecimiento del grano, manteniendo una estructura de grano fino y ayudando a mejorar la resistencia de la aleación a la deformación. La adición de hierro aumenta principalmente la tasa de difusión durante la sinterización,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mejora la penetración mutua entre el tungsteno y el cobre, mejora la calidad de la interfaz y mejora la eficiencia de transferencia de carga. Debido a su ductilidad, el cobalto puede proporcionar soporte de tenacidad adicional en la microestructura y amortiguar el efecto frágil de la fase de tungsteno. La optimización de los elementos añadidos también implica controlar su distribución y contenido. La adición excesiva puede introducir aglomeración de impurezas o separación de fases, debilitando la estabilidad de la microestructura, por lo que se debe lograr un equilibrio mediante proporciones precisas y ajustes del proceso. La introducción de elementos aditivos generalmente se completa en la etapa de mezcla de polvos, mezclándolos con polvos de tungsteno y cobre para asegurar su dispersión uniforme. Durante el proceso de sinterización, los elementos añadidos pueden formar una fase eutéctica de bajo punto de fusión con el cobre, acelerar la formación de la fase líquida y optimizar aún más la microestructura. Un tratamiento térmico posterior o un tratamiento de superficie pueden estabilizar aún más el efecto de los elementos añadidos y mejorar su contribución al rendimiento.

Este método de optimización permite que la microestructura de la aleación de cobre y tungsteno se adapte a los requisitos de aplicación específicos. Por ejemplo, en electrodos que requieren alta resistencia, la adición de níquel mejora la unión y la densidad de la interfaz; En contactos que requieren alta tenacidad, la adición de cobalto mejora la resistencia al impacto. La regulación de los elementos añadidos también favorece la mejora de la resistencia a la corrosión y a la erosión por arco, y prolonga la vida útil al reducir los defectos y optimizar la distribución de fases. Las futuras direcciones de desarrollo incluyen la exploración de nuevos elementos agregados o fases compuestas, la combinación de tecnología de diseño inteligente y la optimización dinámica de la microestructura para mejorar aún más el rendimiento integral de las aleaciones de cobre y tungsteno.

3.4.3 Relación entre la regulación estructural y el desempeño

La regulación estructural y el rendimiento de las aleaciones de tungsteno-cobre se refleja en el hecho de que la optimización de la microestructura afecta directamente su conductividad eléctrica, conductividad térmica, resistencia mecánica y durabilidad. Esta relación se logra mediante el ajuste de la morfología del grano, la distribución de fases, las características de los poros y la calidad de la interfaz, lo que refleja el papel decisivo de la microestructura en el rendimiento macroscópico. un cierto efecto sobre la tenacidad. La uniformidad de la distribución de fase determina la eficiencia de los caminos de conducción eléctrica y térmica. La red continua de la fase de cobre optimiza la transferencia de electrones y calor, mientras que la dispersión de la fase de tungsteno proporciona soporte para la resistencia a altas temperaturas y al desgaste.

El control de poros y defectos es un vínculo clave en la relación entre la regulación estructural y el rendimiento. La reducción de poros mejora la densidad del material, mejora la resistencia a la flexión y la resistencia de la superficie, al tiempo que reduce la resistencia térmica y la resistencia eléctrica y mejora la conductividad eléctrica y térmica. La eliminación de defectos como grietas o partículas no humedecidas reduce los puntos de concentración de tensiones y mejora la resistencia a la fatiga y a la corrosión. La mejora de la calidad de la interfaz favorece indirectamente las propiedades mecánicas y la resistencia a la erosión del arco al mejorar la unión entre las fases de fuerza, optimizando la transferencia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de carga y la eficiencia de difusión del calor. La exhaustividad de la regulación estructural reside en su capacidad de equilibrar las restricciones mutuas entre estas propiedades para satisfacer las necesidades de diversas aplicaciones.

Esta relación permite optimizar las propiedades de las aleaciones de cobre y tungsteno en función de ajustes microestructurales. Por ejemplo, en sustratos de disipación de calor con altos requisitos de conductividad, la distribución continua de las fases de cobre y la reducción de la porosidad mejoran significativamente el rendimiento; En electrodos con altos requisitos de resistencia al desgaste, los granos finos y los esqueletos de tungsteno densos mejoran la durabilidad. La estrategia de regulación estructural también revela las limitaciones del desempeño. Los granos demasiado finos pueden reducir la tenacidad y un contenido demasiado alto de tungsteno puede aumentar la fragilidad. Se necesita una regulación integral para lograr un equilibrio en el desempeño.



CTIA GROUP LTD Aleación de cobre y tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 4 Tecnología de preparación de aleación de tungsteno y cobre

El proceso de preparación de [la aleación de tungsteno y cobre](#) es la clave para producir materiales compuestos de alto rendimiento e involucra una variedad de métodos técnicos para lograr una combinación uniforme de tungsteno y cobre. La aleación de tungsteno y cobre se utiliza ampliamente en los campos eléctrico, electrónico e industrial debido a su excelente conductividad eléctrica, conductividad térmica, resistencia a altas temperaturas y resistencia a la corrosión por arco. El objetivo del proceso de preparación es optimizar la microestructura y el rendimiento de la aleación mediante el control de las materias primas, los parámetros del proceso y las condiciones del equipo. Diferentes métodos de preparación, como la infiltración al vacío, la pulvimetalurgia y la infiltración de cobre, tienen sus propias características y son adecuados para escenarios de aplicación específicos.

4.1 Preparación de aleación de tungsteno-cobre mediante infiltración al vacío

La preparación de la aleación de tungsteno y cobre mediante infiltración al vacío es un método de preparación que infiltra cobre líquido en el interior del esqueleto de tungsteno a alta temperatura, con el objetivo de formar una estructura compuesta densa y uniforme. Este proceso utiliza el alto punto de fusión del tungsteno y el bajo punto de fusión del cobre para preparar un esqueleto de tungsteno poroso mediante sinterización, y luego funde el cobre en un entorno de vacío y lo infiltra. Las impurezas en el aire, evitan reacciones de oxidación y garantizan una buena unión entre el líquido de cobre y el esqueleto de tungsteno. El proceso incluye la preparación del esqueleto de tungsteno, la infiltración de cobre y el enfriamiento y solidificación. distribución de fase uniforme. La optimización del proceso se centra en mejorar la uniformidad de la penetración, reducir la porosidad y mejorar la unión de la interfaz para satisfacer diversos requisitos de aplicación.

4.1.1 Principio de infiltración y requisitos del equipo

La preparación de una aleación de tungsteno y cobre mediante infiltración al vacío se basa en las características de permeabilidad del cobre líquido en un entorno de vacío. El cobre se infiltra en el interior del esqueleto de tungsteno a alta temperatura para formar un material compuesto uniforme. El núcleo del proceso de infiltración es que el bajo punto de fusión del cobre lo convierte en líquido al calentarlo y utiliza la acción capilar y el efecto de la gravedad para infiltrarse en los pequeños poros del esqueleto poroso de tungsteno. Como material de alto punto de fusión, el tungsteno permanece sólido y forma un esqueleto estable para brindar soporte a la penetración del cobre. El entorno de vacío elimina el oxígeno y las impurezas del aire para evitar reacciones de oxidación y garantizar que el líquido de cobre pueda humedecer completamente la superficie de tungsteno. La temperatura y el grado de vacío durante el proceso de infiltración regulan la fluidez y la profundidad de penetración del líquido de cobre, lo que afecta directamente la microestructura y las propiedades de la aleación. esqueleto de tungsteno. La calidad de la interfaz y la distribución de los poros se convierten en factores importantes para determinar el rendimiento. Se requiere equipo especializado para lograr este proceso. El equipo principal es un horno de infiltración al vacío equipado con un sistema de calentamiento de alta temperatura y una bomba de vacío eficiente para mantener un entorno de vacío estable para evitar la oxidación y los residuos de gas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El sistema de calentamiento utiliza tecnología de calentamiento por resistencia o calentamiento por inducción, y debe tener la capacidad de calentar de manera uniforme y controlar con precisión la temperatura para garantizar que el cobre se derrita completamente y penetre en cada rincón del esqueleto de tungsteno. La bomba de vacío debe tener una alta velocidad de bombeo y una baja tasa de fugas para lograr un estado de baja presión y evitar la interferencia de impurezas. El molde o crisol se utiliza para sostener el esqueleto de tungsteno y contener el cobre líquido. El material debe ser resistente a altas temperaturas y no tener reacción química con el tungsteno y el cobre para evitar contaminación o daños estructurales. Se utilizan equipos auxiliares como sensores de temperatura y sistemas de monitoreo de presión para monitorear los parámetros del proceso en tiempo real para garantizar la consistencia operativa. En conjunto, estos dispositivos garantizan la eficiencia y confiabilidad del proceso de infiltración al vacío y garantizan que la microestructura de la aleación cumpla con los requisitos de rendimiento esperados.

4.1.2 Pasos del proceso y optimización de parámetros

La preparación de una aleación de cobre y tungsteno mediante infiltración al vacío es un proceso sistemático que implica operaciones coordinadas en múltiples etapas para garantizar que la microestructura y las propiedades de la aleación cumplan con los objetivos esperados. El proceso comienza con la preparación y el moldeo del polvo de tungsteno, y se forma un esqueleto de tungsteno poroso mediante prensado o sinterización preliminar. En esta etapa se debe prestar atención a la porosidad y resistencia mecánica del esqueleto para proporcionar un canal adecuado para la posterior infiltración de cobre. Se coloca en un horno de infiltración al vacío, se agrega una cantidad adecuada de material de cobre, se sella el cuerpo del horno y se inicia el sistema de vacío para eliminar el oxígeno y las impurezas del aire para crear un ambiente puro para la infiltración. La etapa de calentamiento es el núcleo del proceso. La temperatura debe aumentarse gradualmente hasta superar el punto de fusión del cobre, lo que permite que el líquido de cobre se derrita y se infiltre naturalmente en un entorno de vacío. tiempo de procesamiento, optimizando la distribución de fases y la unión de interfaces. La etapa de enfriamiento controla la velocidad de enfriamiento para fijar la microestructura y evitar defectos o inhomogeneidades causados por el estrés térmico. El buen progreso de cada paso depende del control preciso de los parámetros del proceso para garantizar la calidad del producto final.

El foco de la optimización de parámetros está en la coordinación de la temperatura, el vacío y el tiempo. El control de la temperatura debe realizarse en etapas. La etapa de precalentamiento de baja temperatura reduce el choque térmico, la etapa de alta temperatura asegura la fusión completa del cobre y la etapa de transición intermedia equilibra la distribución del calor para evitar el sobrecalentamiento local. El ajuste del vacío afecta directamente el efecto humectante y el contenido de impurezas del líquido de cobre. Un vacío demasiado bajo puede provocar que el gas residual afecte la penetración. Un vacío demasiado alto requiere un equilibrio entre la complejidad del equipo y la eficiencia del proceso, y debe ajustarse dinámicamente según las necesidades reales. La optimización del tiempo implica la asignación de tiempo para cada etapa de calefacción, aislamiento y refrigeración. Un corte demasiado corto puede provocar una penetración insuficiente o poros residuales, y un corte demasiado largo puede provocar un tamaño de grano excesivo o volatilización del cobre, lo que afecta el rendimiento. El flujo del proceso también

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

debe considerar el pretratamiento del esqueleto de tungsteno, como la limpieza de la superficie o el ajuste de los poros, para mejorar la capacidad de penetración del cobre. El ajuste dinámico de los parámetros se logra mediante simulación de procesos y verificación experimental para garantizar la densidad y uniformidad de la microestructura y brindar soporte para la mejora del rendimiento.

La optimización de los pasos del proceso afecta significativamente el rendimiento de la aleación. La distribución uniforme de la temperatura y un tiempo de penetración suficiente pueden mejorar la conductividad eléctrica y térmica, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de sustrato de disipación de calor; El entorno de vacío estable y la velocidad de enfriamiento apropiada mejoran la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión, lo que lo hace adecuado para componentes de electrodos. temperatura, nivel de vacío y profundidad de penetración para mejorar la eficiencia del proceso y la calidad del producto. Este método proporciona una garantía confiable para la producción industrial de aleaciones de tungsteno y cobre.

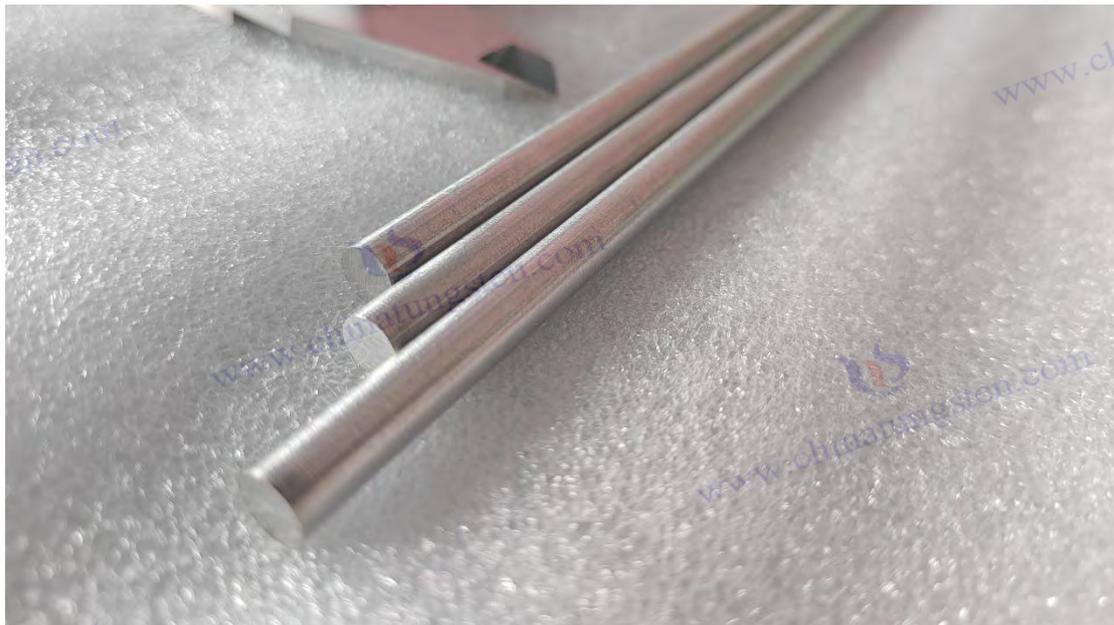
4.1.3 Ventajas y limitaciones del proceso

La preparación de una aleación de tungsteno y cobre mediante infiltración al vacío muestra ventajas significativas debido a sus características de proceso únicas, pero también tiene ciertas limitaciones. Estas características determinan conjuntamente su ámbito de aplicación y dirección de optimización. Una de las ventajas es su alta densidad. La penetración total del líquido de cobre en un entorno de vacío puede reducir significativamente la porosidad y mejorar la resistencia y estabilidad general del material. Esta estructura densa proporciona a la aleación excelentes propiedades mecánicas y durabilidad, haciéndola especialmente adecuada para aplicaciones sujetas a elevadas cargas. Otra ventaja es la distribución uniforme de la fase. Lo bueno La combinación del esqueleto de tungsteno y la fase de cobre optimiza la conductividad eléctrica y térmica, lo que hace que la aleación funcione bien en entornos de alta corriente y alta temperatura. La protección del entorno de vacío reduce la introducción de impurezas oxidativas, mantiene la pureza del material y establece una base confiable para el uso a largo plazo. Además, la controlabilidad del proceso permite producir formas complejas o piezas de gran tamaño, satisfaciendo diversas necesidades de procesamiento y demostrando su flexibilidad.

Sin embargo, el proceso también tiene algunas limitaciones. La complejidad del equipo y los costos operativos son altos, y los requisitos de mantenimiento del horno de vacío y el equipo auxiliar relacionado son estrictos, lo que aumenta la entrada de producción y limita su aplicación en escenarios sensibles a los costos. El ciclo del proceso es largo e implica operaciones de múltiples etapas. Se necesita mucho tiempo desde la preparación del esqueleto de tungsteno hasta la infiltración de cobre, lo que puede afectar la eficiencia de la producción en masa. El riesgo de volatilización del cobre o infiltración desigual puede existir bajo ciertas condiciones, especialmente cuando la porosidad del esqueleto de tungsteno no coincide o el grado de vacío es insuficiente, lo que afecta la estabilidad de la calidad del producto. Además, el proceso depende en gran medida de la pureza de la materia prima y del pretratamiento. Cualquier defecto o falta de homogeneidad en la materia prima puede transmitirse al producto final, requiriendo control de calidad adicional y ajustes del proceso. Estas ventajas y limitaciones en conjunto configuran los escenarios de aplicación de las aleaciones de cobre y tungsteno preparadas por infiltración

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

al vacío. Las ventajas le dan una ventaja en campos que requieren un alto rendimiento, como los contactos de interruptores de alto voltaje, donde la alta densidad y conductividad de la aleación garantizan un rendimiento de conmutación confiable; En electrodos de soldadura por resistencia, la distribución de fase uniforme y la resistencia a altas temperaturas favorecen su uso a largo plazo. En el campo aeroespacial, las piezas de cobre-tungsteno con formas complejas, como disipadores de calor y contactos eléctricos, también se benefician de este proceso. Las limitaciones sugieren que es necesario complementarlo con otros métodos, como la pulvimetalurgia, para reducir costes o mejorar la eficiencia.



CTIA GROUP LTD Aleación de cobre y tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

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 Alloys

Power Equipment: Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

Electronics and Semiconductor Industry: Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

Electrical Discharge Machining (EDM): Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

Aerospace and Defense: High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

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 Métodos de prueba de rendimiento y caracterización de la aleación de cobre-tungsteno

La aleación de cobre y tungsteno es un medio importante para evaluar su conductividad eléctrica, conductividad térmica, resistencia mecánica y durabilidad, que determinan directamente su efecto de aplicación en los campos eléctricos, electrónicos e industriales. El método de prueba cubre la medición de propiedades físicas, propiedades mecánicas y propiedades eléctricas, y revela la relación entre la microestructura y las propiedades macroscópicas de la aleación a través de operaciones estandarizadas y técnicas de caracterización avanzadas.

5.1 Prueba de propiedades físicas de la aleación de cobre y tungsteno

tungsteno tiene como objetivo evaluar sus propiedades físicas básicas, como densidad, conductividad eléctrica y conductividad térmica, que están estrechamente relacionadas con su microestructura y proceso de preparación. La prueba de densidad refleja la compacidad de la aleación, lo que afecta directamente la conductividad eléctrica y la resistencia mecánica; La prueba de conductividad eléctrica evalúa la capacidad de transmisión de electrones, lo cual es adecuado para contactos eléctricos; La prueba de conductividad térmica mide la eficiencia de dispersión de calor, lo cual es clave para las aplicaciones de disipación de calor. Las pruebas de propiedades físicas se llevan a cabo mediante métodos no destructivos o mínimamente destructivos para garantizar la integridad de la muestra y al mismo tiempo proporcionar un respaldo de datos confiable. Los resultados de las pruebas proporcionan una base para la optimización del proceso y la mejora del rendimiento. Esta sección se centrará en el método de prueba de densidad y en los estándares y operaciones de prueba de dureza.

5.1.1 Método de prueba de densidad

El método de prueba de densidad se utiliza para medir la masa de volumen unitario de la aleación de cobre y tungsteno, que refleja la compacidad y el contenido de porosidad de su microestructura y es un indicador importante para evaluar la calidad de la preparación. El principio de prueba se basa en el principio de Arquímedes. Midiendo la diferencia de peso de la muestra en el aire y el líquido, se calcula su densidad real. una balanza de precisión, se registra su peso en el aire y luego se sumerge en un líquido de densidad conocida (como agua destilada) para medir su peso flotante en el líquido. La diferencia de peso se combina con la densidad del líquido para obtener el volumen de la muestra y, finalmente, la densidad se calcula dividiendo la masa por el volumen.

El método de prueba requiere condiciones experimentales estrictas para garantizar la precisión. La temperatura del líquido debe mantenerse constante para evitar la influencia de la expansión térmica en el valor de la densidad; La precisión de la balanza debe ser suficiente para detectar pequeños cambios de peso y reducir los errores de medición. No deben quedar burbujas adheridas a la superficie de la muestra, lo que se puede lograr mediante desgasificación al vacío o tratamiento de superficie. Durante la prueba, se toman múltiples mediciones y se obtiene el promedio para eliminar errores accidentales. La prueba de densidad es adecuada para detectar la porosidad y la uniformidad en el proceso de preparación. Una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

densidad más baja puede indicar un mayor contenido de porosidad, mientras que una densidad más alta refleja una mejor compacidad. Los resultados de las pruebas proporcionan una base directa para optimizar el proceso de sinterización y reducir los defectos, y se utilizan ampliamente en el control de calidad y la evaluación del rendimiento.

5.1.2 Normas y operaciones de prueba de dureza

Los estándares y operaciones de prueba de dureza se utilizan para evaluar la capacidad de la aleación de cobre y tungsteno para resistir la indentación o el desgaste de la superficie, lo que refleja sus propiedades mecánicas y durabilidad. El principio de prueba se basa en aplicar una carga específica a la superficie de la muestra con un penetrador estandarizado, medir la profundidad o el área de la sangría e indicar indirectamente la capacidad del material para resistir la deformación. Los estándares de prueba comunes incluyen dureza Brinell, dureza Rockwell y dureza Vickers, que son adecuadas para diferentes rangos de dureza y características de la muestra. La dureza Brinell aplica una gran carga a través de un penetrador de bola de acero, lo cual es adecuado para materiales más blandos o uniformes; El medidor de dureza Rockwell utiliza un cono de diamante o una bola de acero para medir rápidamente muestras delgadas o la dureza de la superficie; La dureza Vickers utiliza un penetrador de pirámide cuadrangular de diamante, que es adecuado para áreas pequeñas o estructuras complejas.

El proceso de operación requiere primero la preparación de una superficie de muestra plana, eliminando las asperezas mediante esmerilado o pulido y asegurando que el penetrador esté en pleno contacto con la superficie. Seleccione el estándar de prueba y el tipo de penetrador adecuados, y determine la carga y el tiempo de sangría según el tamaño de la muestra y el rango de dureza esperado. Después de aplicar la carga, retire el penetrador, mida las características geométricas de la sangría, como el diámetro o la longitud diagonal, y utilice un microscopio o un instrumento especial para obtener una lectura precisa. Es necesario repetir la prueba en varios puntos para eliminar la influencia de la falta de homogeneidad de la superficie y calcular el valor promedio para obtener resultados representativos. Durante el funcionamiento, se debe prestar atención a la temperatura y la humedad ambiente para evitar que factores externos interfieran con la precisión de la medición. Las pruebas de dureza son de gran importancia en la evaluación del rendimiento. La alta dureza generalmente se asocia con granos finos y una estructura densa, lo que refleja la resistencia al desgaste de la aleación, que es adecuada para aplicaciones de corte con electrodos o herramientas. Los resultados de la prueba también se pueden utilizar para detectar defectos en el proceso de preparación, como poros o áreas no humedecidas, que pueden provocar una reducción de la dureza local. Las operaciones estandarizadas garantizan la comparabilidad de los resultados de las pruebas y proporcionan una base científica para la selección de materiales y la mejora de procesos.

5.1.3 Método de prueba de conductividad

El método de prueba de conductividad se utiliza para evaluar la capacidad de la aleación de cobre y tungsteno para transmitir corriente. Refleja la conectividad de la fase de cobre en su microestructura y la efectividad del camino conductor. Es un indicador clave para medir las propiedades eléctricas de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aleación. El principio de prueba se basa en la ley de Ohm. Midiendo la corriente de la muestra a un voltaje específico, se calcula su conductividad. Utilice el método de cuatro sondas o el método de dos sondas para realizar la medición. El método de cuatro sondas coloca cuatro electrodos en la superficie de la muestra, aplica corriente y mide voltaje respectivamente y elimina la interferencia de resistencia de contacto; El método de dos sondas mide directamente el voltaje y la corriente en ambos extremos, lo que es adecuado para muestras más largas. El proceso de prueba debe realizarse en un entorno de temperatura y humedad constantes para evitar que factores ambientales afecten la conductividad. La muestra debe estar firmemente en contacto con el electrodo y se puede lograr una buena conexión mediante una abrazadera o una pasta conductora. Después de aplicar una corriente estable, registre los valores de voltaje y corriente, calcule la resistividad y conviértala en conductividad según la geometría de la muestra. La influencia del proceso de preparación en la distribución de las fases de cobre. Una mayor conductividad suele estar asociada a una red continua de fases de cobre, lo que refleja una buena microestructura.

5.1.4 Método de prueba de conductividad térmica

El método de prueba de conductividad térmica se utiliza para evaluar la capacidad de la aleación de cobre y tungsteno para transferir calor. Refleja la influencia de la distribución de fases y la calidad de la interfaz en su microestructura sobre la conducción del calor y es un indicador importante para medir el rendimiento de disipación del calor. El principio de prueba se basa en la ley de Fourier. La conductividad térmica se calcula midiendo la tasa de transferencia de calor en la muestra. El proceso de operación primero prepara una muestra de forma regular. método transitorio. El método de estado estable mide el gradiente de temperatura aplicando un flujo de calor constante en ambos extremos de la muestra; El método transitorio calienta brevemente la superficie de la muestra, registra el cambio de temperatura a lo largo del tiempo e infiere la difusividad térmica. El proceso de prueba debe llevarse a cabo en un entorno de temperatura controlada, utilizando una fuente de calor y termopares o sensores infrarrojos para medir la distribución de la temperatura. El método de estado estable requiere temperaturas estables en ambos extremos de la muestra y un flujo de calor uniforme, y se requieren materiales de aislamiento térmico para reducir la disipación de calor lateral; La ley transitoria requiere equipos de respuesta rápida, como un medidor de destello láser, para capturar los cambios de temperatura. Las dimensiones geométricas y las superficies de contacto de la muestra deben coincidir con el equipo de prueba para garantizar una ruta de transferencia de calor clara. Tome el valor promedio de múltiples pruebas para eliminar errores experimentales. La prueba de conductividad térmica es adecuada para evaluar el impacto de los procesos de preparación en la conectividad de las interconexiones de cobre. Una mayor conductividad térmica generalmente se asocia con una distribución de fase uniforme y una baja porosidad, lo que es adecuado para aplicaciones de sustrato de disipación de calor. Los resultados de las pruebas proporcionan una base científica para optimizar el rendimiento de la gestión térmica y, en el futuro, la tecnología de imágenes térmicas se puede combinar para mejorar la precisión de la medición.

5.2 Evaluación de las propiedades químicas de la aleación de cobre y tungsteno

La aleación de cobre y tungsteno tiene como objetivo estudiar su resistencia a la corrosión y estabilidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

química en diferentes entornos, lo que refleja la influencia de la microestructura en la adaptabilidad ambiental, que es la clave para garantizar la confiabilidad a largo plazo. Los métodos de evaluación incluyen pruebas de inmersión, medición de la tasa de corrosión y análisis de superficie, que simulan el entorno de uso para observar la reacción química y el comportamiento de degradación de la aleación. La prueba observa los cambios en la superficie al exponer la muestra durante un tiempo prolongado; La medición de la tasa de corrosión calcula la tasa de reacción por pérdida de peso o reducción de espesor; El análisis de superficies, como la microscopía electrónica de barrido o la espectroscopia fotoelectrónica de rayos X, se utiliza para detectar la composición y distribución de los productos de corrosión.

El proceso de evaluación necesita controlar parámetros ambientales como la temperatura, la humedad y la concentración del medio para evitar interferencias externas. Tome muestras regularmente, límpielas y séquelas, observe el peso o la superficie y registre la tendencia de los cambios. Tome el valor promedio de múltiples pruebas para eliminar factores accidentales. La evaluación del desempeño químico es adecuada para detectar la sensibilidad del cobre a la corrosión. La porosidad y los defectos pueden acelerar la penetración del medio y reducir la estabilidad. Los resultados de la evaluación proporcionan una base para optimizar el tratamiento de superficies y seleccionar recubrimientos resistentes a la corrosión, que se utilizan ampliamente en equipos marinos y componentes de procesamiento químico.

5.2.1 Entorno y métodos de prueba de resistencia a la corrosión

El entorno y el método de prueba de resistencia a la corrosión se utilizan para evaluar la resistencia a la corrosión de la aleación de cobre y tungsteno en diferentes medios, lo que refleja la adaptabilidad de su microestructura y composición al entorno químico y son la clave para garantizar la estabilidad a largo plazo. El entorno de prueba debe simular las condiciones de uso reales, como entornos húmedos, ácidos o salados, para reproducir posibles escenarios de corrosión. El proceso de operación primero prepara una muestra plana, limpia la superficie para eliminar las impurezas y garantiza que los resultados de la prueba no se vean afectados por la contaminación. Los entornos de prueba comúnmente utilizados incluyen cámaras de niebla salina, tanques de inmersión en solución ácida o cámaras de calor húmedo. Las cámaras de niebla salina simulan entornos marinos o industriales, las soluciones ácidas como el ácido sulfúrico o el ácido clorhídrico simulan las condiciones de procesamiento químico y las cámaras de calor húmedo simulan los efectos combinados de la alta humedad y temperatura.

Los métodos de prueba incluyen el método de pérdida de peso y el método electroquímico. un microscopio. La prueba de resistencia a la corrosión es adecuada para detectar la sensibilidad del cobre a la corrosión relativa. La porosidad y los defectos pueden acelerar la penetración del medio y afectar la estabilidad. Los resultados de las pruebas proporcionan una base para optimizar la protección de la superficie y seleccionar aplicaciones resistentes a la corrosión. En el futuro, se podrá desarrollar un entorno de acoplamiento multifactorial para mejorar la importancia práctica de la prueba.

5.2.2 Método de prueba del rendimiento antioxidante

El método de prueba de resistencia a la oxidación se utiliza para evaluar la resistencia a la oxidación de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la aleación de cobre y tungsteno en entornos de alta temperatura o que contienen oxígeno, lo que refleja la resistencia de su microestructura a la oxidación y es un indicador importante para aplicaciones de alta confiabilidad. El principio de prueba se basa en exponer la muestra a una atmósfera oxidante para observar la formación de la capa de óxido superficial y el grado de degradación del material. El proceso de operación primero prepara la muestra, pule la superficie para eliminar el óxido y asegura que el estado inicial sea consistente. Los métodos comunes incluyen la prueba de oxidación a alta temperatura y la prueba de oxidación cíclica.

Durante la prueba, es necesario registrar el tiempo de calentamiento, la temperatura y el espesor de la capa de óxido, tomar muestras periódicamente, limpiarlas y pesarlas y calcular el incremento de masa o el cambio de superficie. El análisis por microscopio o difracción de rayos X se puede utilizar para detectar la composición y distribución de los productos de oxidación. El entorno de prueba debe mantener una concentración de oxígeno estable para evitar la interferencia de otros gases. Tome el valor promedio de múltiples pruebas para eliminar errores experimentales. La prueba de rendimiento antioxidante es adecuada para detectar la tendencia a la oxidación de la fase de cobre a alta temperatura. La estabilidad de la fase de tungsteno juega un papel protector y los poros pueden agravar la oxidación. Los resultados de las pruebas proporcionan orientación para optimizar los procesos de alta temperatura y seleccionar recubrimientos antioxidantes. En el futuro, la tecnología de monitoreo en tiempo real se puede combinar para mejorar la precisión de las pruebas y el valor de la aplicación.

5.3 Tecnología de caracterización de la microestructura de la aleación de cobre y tungsteno

Las técnicas de caracterización incluyen el microscopio óptico, el microscopio electrónico de barrido y el microscopio electrónico de transmisión. El microscopio óptico se utiliza para observar características superficiales macroscópicas, el microscopio electrónico de barrido proporciona análisis de morfología y composición de alta resolución, y el microscopio electrónico de transmisión estudia en profundidad los límites de grano y las interfaces de fase. El proceso de operación primero prepara la muestra, que necesita ser cortada, molida y pulida. Algunas tecnologías requieren dilución o grabado para mejorar el contraste. El proceso de prueba requiere la selección de condiciones apropiadas según la tecnología. La observación con microscopía óptica requiere una tinción adecuada, la microscopía electrónica de barrido requiere un entorno de vacío y un ajuste del haz de electrones, y la microscopía electrónica de transmisión requiere una preparación de muestras de alta precisión. Los resultados del análisis cuantifican el tamaño del grano y la distribución de los poros a través del software de procesamiento de imágenes y determinan la composición de la fase en combinación con el análisis del espectro de energía. La tecnología de caracterización es adecuada para detectar la influencia del proceso de preparación en la microestructura, y el refinamiento del grano y la uniformidad de la distribución de fases mejoran el rendimiento. base científica para la optimización de procesos y el control de defectos y, en el futuro, se puede combinar con tecnología de imágenes tridimensionales para caracterizar completamente la microestructura.

5.3.1 Método de observación con microscopio metalográfico

El método de observación del microscopio metalográfico se utiliza para observar las características

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

microestructurales de las aleaciones de tungsteno y cobre, como la morfología del grano, la distribución de fases y la porosidad, y revelar la influencia del proceso de preparación en la microestructura. El principio de prueba se basa en la reflexión o transmisión de luz visible a través de la superficie de la muestra para ampliar y observar detalles microscópicos. El proceso de operación requiere primero la preparación de la muestra, que implica cortar, esmerilar y pulir para obtener una superficie plana, seguido de un grabado químico o pulido electrolítico para mejorar el contraste entre las fases de tungsteno y cobre y hacer que los límites de grano y de fase sean más visibles. La muestra se fija en la platina y se ajustan el foco y la fuente de luz del microscopio para observar la microestructura con diferentes aumentos. Durante la prueba, es necesario seleccionar un modo de iluminación apropiado, como campo brillante o campo oscuro, para mejorar la visibilidad de características específicas. El operador registra la imagen a través del ocular o del sistema de imágenes digitales para analizar el tamaño del grano, la uniformidad de la distribución de fases y los defectos. Observe diferentes áreas varias veces para garantizar la representatividad y excluir la influencia de la falta de homogeneidad local. La observación al microscopio metalográfico es adecuada para la evaluación preliminar del efecto del proceso de preparación. El refinamiento del grano o la optimización de la distribución de fases generalmente se asocia con una mejora del rendimiento.

5.3.2 Aplicación del análisis mediante microscopio electrónico de barrido

El análisis de microscopía electrónica de barrido se utiliza para caracterizar la microestructura y la distribución de la composición de las aleaciones de cobre y tungsteno con alta resolución, revelando características sutiles de la morfología del grano, interfaces de fase y defectos. El principio de prueba se basa en el haz de electrones que bombardea la superficie de la muestra, generando electrones secundarios y electrones retrodispersados para generar información morfológica y composicional. El proceso de operación primero prepara la muestra, que necesita ser cortada, molida, pulida y sometida a un tratamiento conductor, como pulverización de oro o recubrimiento de carbono, para evitar efectos de carga. La muestra se coloca en una cámara de vacío y se ajustan los parámetros del haz de electrones, como el voltaje de aceleración y la distancia de trabajo, para escanear la superficie de la muestra. Durante la prueba, la imagen del electrón secundario proporciona detalles morfológicos de la superficie, la imagen del electrón retrodispersado resalta el contraste de las diferentes fases y el análisis del espectro de dispersión de energía (EDS) determina la distribución de los elementos. El operador puede ajustar la ampliación y el modo del detector para observar los límites del grano, los poros y la distribución de fases. Escanee diferentes áreas varias veces para garantizar la exhaustividad y combine el software para procesar los datos. El análisis por microscopía electrónica de barrido es adecuado para detectar cambios microscópicos causados por el proceso de preparación, como poros reducidos o interfaces mejoradas, y los resultados relevantes guían la optimización del rendimiento.

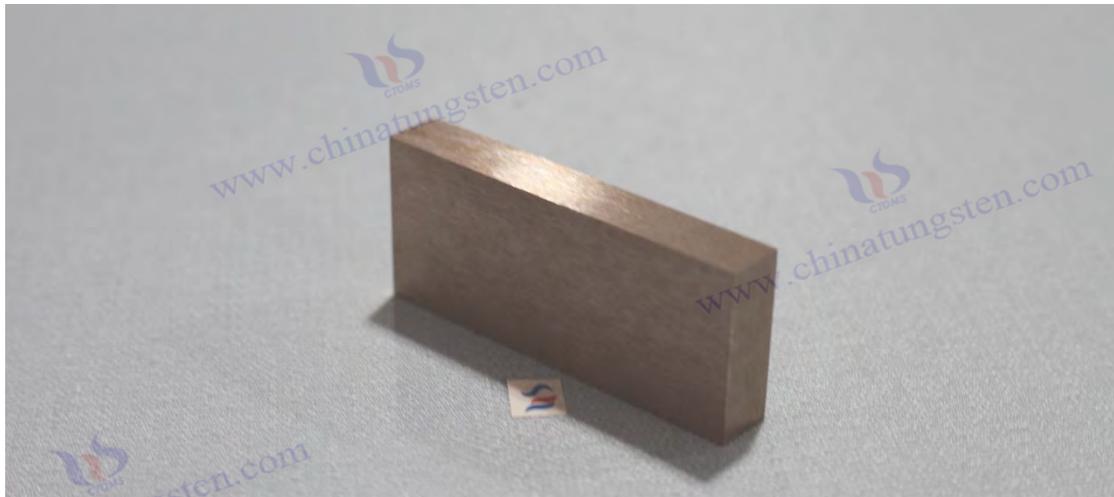
5.3.3 Análisis de la estructura por difracción de rayos X

El análisis de la estructura por difracción de rayos X se utiliza para determinar la estructura cristalina, la composición de fases y los parámetros reticulares de las aleaciones de cobre y tungsteno, y para explorar la relación entre la microestructura y el rendimiento. El principio de prueba se basa en la difracción Bragg

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de rayos X con el plano del cristal de muestra para producir líneas espectrales características que reflejan la disposición atómica dentro del material. Proceso de operación Preparar muestras en polvo o planas, moler hasta obtener un tamaño de partícula apropiado o pulir la superficie para evitar efectos de textura. Coloque la muestra en el difractómetro de rayos X, ajuste los ángulos de la fuente de rayos X y del detector y escanee un cierto rango de ángulos 2θ .

Durante la prueba, se registra la posición y la intensidad de los picos de difracción, se analizan las características de la fase cristalina del tungsteno y el cobre y se detectan posibles impurezas u óxidos. El operador puede utilizar el software para ajustar la forma del pico y determinar el tamaño del grano y la tensión. Se promedian múltiples mediciones para eliminar errores del instrumento. Los resultados proporcionan una base para la optimización de la microestructura y la predicción del rendimiento y, en el futuro, la tecnología de radiación sincrotrón se puede combinar para mejorar la precisión.



CTIA GROUP LTD Aleación de cobre y tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 6 Campos de aplicación múltiples de la aleación de cobre y tungsteno

Las aleaciones de cobre y tungsteno se benefician de sus propiedades físicas y químicas únicas y abarcan múltiples industrias, como la eléctrica, la aeronáutica, la electrónica y la fabricación industrial. Su excelente conductividad eléctrica, conductividad térmica, resistencia a altas temperaturas y resistencia a la erosión del arco lo convierten en una opción ideal para componentes de alto rendimiento. Las áreas de aplicación están en constante expansión e involucran interruptores de potencia de bajo voltaje, disyuntores de alto voltaje, disipadores de calor y electrodos EDM. Las aleaciones de cobre y tungsteno satisfacen diversos requisitos de rendimiento a través de diferentes procesos de preparación y diseños estructurales.

6.1 Aplicación de la aleación de cobre y tungsteno en el campo eléctrico

La aleación de cobre y tungsteno se usa ampliamente en el campo, especialmente en escenas que requieren alta conductividad y resistencia a la erosión del arco. El campo eléctrico incluye interruptores de potencia de bajo voltaje, disyuntores de alto voltaje y contactos eléctricos. La aleación de tungsteno y cobre cumple con los requisitos de alta corriente, alto voltaje y conmutación frecuente debido a su alto punto de fusión del tungsteno y la alta conductividad del cobre . actuación. En los interruptores de potencia de bajo voltaje, la aleación de cobre y tungsteno es un componente clave que mejora significativamente la confiabilidad y durabilidad del equipo.

6.1.1 Aplicación en interruptores de potencia de baja tensión

tungsteno en interruptores de potencia de bajo voltaje es una manifestación importante de la aleación de cobre y tungsteno en el campo eléctrico, especialmente en componentes de contacto. Los interruptores de potencia de bajo voltaje se utilizan para controlar el encendido y apagado de los circuitos. Las frecuentes acciones de conmutación y la generación de arcos imponen requisitos estrictos a los materiales. La optimización de procesos garantiza la estabilidad del rendimiento. Esta sección discutirá en detalle los requisitos de rendimiento de los componentes principales, las formas de aplicación y el efecto de mejorar la vida útil.

6.1.1.1 Requisitos de rendimiento de los materiales de los componentes centrales de los interruptores de potencia de baja tensión

Los requisitos de rendimiento de los materiales para los componentes centrales de los interruptores de potencia de bajo voltaje, como contactos y electrodos, cubren múltiples aspectos para garantizar la seguridad y confiabilidad del equipo. En primer lugar, el material debe tener una excelente conductividad eléctrica para transmitir la corriente eficientemente y reducir la pérdida de energía y la generación de calor. Una buena conductividad térmica es otro requisito clave, que puede dispersar rápidamente el calor generado por arcos o corrientes altas para evitar el sobrecalentamiento local. En segundo lugar, el material debe tener una alta resistencia a la erosión del arco para resistir la ablación de la superficie causada por los arcos durante la conmutación para garantizar la estabilidad en el uso a largo plazo.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Además, la resistencia a altas temperaturas es crucial y los componentes centrales deben soportar temperaturas extremas sin deformarse ni fundirse cuando se desconectan las corrientes altas. La resistencia mecánica y la resistencia al desgaste también son necesarias para soportar acciones de conmutación mecánica frecuentes y evitar el desgaste o la rotura. La resistencia a la corrosión ayuda a mantener el rendimiento en entornos húmedos o industriales. Por último, el material debe tener la dureza adecuada para soportar la presión de contacto y mantener la tenacidad suficiente para evitar la fractura frágil. Estos requisitos determinan conjuntamente la selección del material de los componentes del interruptor de potencia de bajo voltaje, y la aleación de cobre y tungsteno es la primera opción debido a su rendimiento integral.

6.1.1.2 Aplicación de aleación de cobre-tungsteno en componentes de contacto

tungsteno en los conjuntos de contactos de interruptores de potencia de bajo voltaje varía según los requisitos de diseño y las condiciones de uso. Una forma común es convertir la aleación de cobre y tungsteno en material de contacto, que se utiliza directamente para los contactos móviles y estáticos del interruptor, y soporta frecuentes operaciones de encendido y apagado con su alta conductividad y resistencia a la erosión del arco. La aleación generalmente se prepara con un mayor contenido de tungsteno (como WCu 70/30 o WCu 80/20). El tungsteno proporciona resistencia a altas temperaturas y soporte antidesgaste, y el cobre asegura la continuidad de la ruta conductora. Otra forma es una estructura compuesta, que utiliza una aleación de cobre y tungsteno como capa de superficie de contacto, combinada con otros sustratos como cobre o acero, e integrada mediante soldadura o ajuste a presión para optimizar el equilibrio entre costo y rendimiento.

En las aplicaciones, las aleaciones de cobre y tungsteno también se pueden fabricar en formas específicas, como contactos redondos o rectangulares, a través de pulvimetalurgia o procesos de infiltración al vacío para adaptarse al diseño de diferentes interruptores. Los tratamientos de superficie, como el pulido o el recubrimiento, pueden mejorar aún más la resistencia a la corrosión y la tolerancia al arco. En algunos escenarios de alta demanda, las aleaciones de cobre y tungsteno se procesan en estructuras multicapa con una capa con alto contenido de tungsteno en el interior para mejorar la durabilidad y una capa con alto contenido de cobre en el exterior para mejorar la conductividad. La forma de instalación del conjunto de contactos generalmente está atornillada o empotrada para garantizar un contacto estable con el cuerpo del interruptor. Estas formas de aplicación aprovechan al máximo las características de las aleaciones de cobre y tungsteno para satisfacer las diversas necesidades de los interruptores de potencia de bajo voltaje.

6.1.1.3 Efecto de la aplicación en la vida útil de los interruptores de potencia de baja tensión

tungsteno en los componentes de contacto del interruptor de potencia de bajo voltaje mejora significativamente la vida útil del equipo debido a su excelente rendimiento. En primer lugar, la alta resistencia de la aleación a la erosión del arco reduce la ablación y la pérdida de material en la superficie de contacto, extendiendo los ciclos de encendido y apagado del interruptor. La resistencia a altas temperaturas garantiza la estabilidad de los contactos al desconectarse con corrientes elevadas, lo que reduce fallas mecánicas o degradación del rendimiento causadas por sobrecalentamiento. En segundo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

lugar, la buena conductividad eléctrica y térmica reducen el efecto térmico de la resistencia, reducen la velocidad de envejecimiento de los contactos y mejoran la confiabilidad del funcionamiento a largo plazo. La resistencia mecánica y la resistencia al desgaste admiten acciones de conmutación frecuentes, lo que reduce el riesgo de desgaste o rotura de los contactos y extiende aún más la vida útil. Además, la distribución uniforme de la fase y la baja porosidad de la aleación de tungsteno y cobre mejoran la integridad estructural general del contacto y reducen las fallas prematuras causadas por defectos microscópicos. La resistencia a la corrosión también juega un papel protector, especialmente en ambientes húmedos o industriales, reduciendo los efectos negativos de la oxidación o erosión de la superficie sobre la vida. Después de la aplicación, se extiende el intervalo de mantenimiento de los interruptores de potencia de bajo voltaje, se reduce la tasa de fallas y se mejora la eficiencia operativa general. escenarios de uso de alta frecuencia, como sistemas de control industrial o electrodomésticos. La aplicación de aleación de cobre y tungsteno proporciona a los equipos una vida útil más larga y mayores beneficios económicos. En el futuro, el efecto de prolongación de la vida útil se puede mejorar aún más optimizando las relaciones de aleación y el tratamiento de la superficie.

6.1.2 Aplicación en interruptores de alta tensión

La aplicación en interruptores de alto voltaje es una manifestación importante de la aleación de cobre-tungsteno en el campo eléctrico, jugando especialmente un papel clave en escenarios que requieren el manejo de alto voltaje y arcos fuertes. Los interruptores de alto voltaje se utilizan para el control y la protección de circuitos en sistemas de energía, involucrando equipos como disyuntores de alto voltaje, seccionadores e interruptores de puesta a tierra. Estos dispositivos generarán arcos fuertes al conmutar corrientes de alto voltaje, lo que impone exigencias extremadamente altas en el rendimiento del material. Interruptores de alto voltaje debido a su excelente conductividad, resistencia a altas temperaturas y resistencia a la erosión del arco. Su microestructura está optimizada mediante procesos de pulvimetalurgia o infiltración al vacío para garantizar un rendimiento estable en condiciones de trabajo extremas. En las aplicaciones, la aleación de cobre y tungsteno se utiliza principalmente para contactos, electrodos móviles y estáticos y dispositivos de extinción de arco, lo que mejora significativamente la confiabilidad y la vida útil de los interruptores. En esta sección se analizará en detalle el entorno de trabajo de los interruptores de alto voltaje y los estándares de tolerancia del material de los componentes centrales, el rendimiento de la aleación de tungsteno y cobre para adaptarse a las necesidades de los interruptores de alto voltaje y las diferencias de aplicación de la aleación de tungsteno y cobre en interruptores de alto voltaje de diferentes niveles de voltaje.

6.1.2.1 Entorno de trabajo de interruptores de alto voltaje y estándares de tolerancia de materiales para componentes centrales

El entorno de trabajo de los interruptores de alto voltaje es extremadamente severo e implica los efectos combinados de alta temperatura, alta presión, arcos fuertes y estrés mecánico, lo que plantea muchos requisitos en los estándares de tolerancia del material de los componentes centrales. En primer lugar, la alta temperatura en el ambiente de trabajo se genera principalmente por arcos. La energía que se libera instantáneamente cuando se desconecta la corriente puede provocar que la temperatura local aumente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bruscamente. El material debe tener una excelente resistencia a altas temperaturas y ser capaz de no derretirse ni perder su forma a altas temperaturas de miles de grados. Los componentes centrales, como los contactos y los electrodos, deben soportar esta carga de calor extrema manteniendo la integridad estructural. En segundo lugar, el entorno de alto voltaje está acompañado de alto voltaje. La continuidad y resistencia del arco requieren que el material tenga una resistencia extremadamente alta a la erosión del arco para evitar la ablación de la superficie o la pérdida de material y extender la vida útil. Además, las frecuentes acciones de conmutación mecánica provocan choques y vibraciones. El material debe tener suficiente resistencia mecánica y resistencia al desgaste para resistir el riesgo de desgaste y fractura para garantizar la estabilidad del funcionamiento a largo plazo. La resistencia a la corrosión es otro estándar de tolerancia clave, especialmente en entornos exteriores o industriales, donde los interruptores de alto voltaje pueden estar expuestos a la humedad, la niebla salina o los productos químicos. El material debe ser capaz de resistir la oxidación y la corrosión y mantener el rendimiento eléctrico. La conductividad eléctrica y la conductividad térmica son igualmente importantes. La transmisión de corriente eficiente y la disipación de calor pueden reducir el efecto del calentamiento resistivo, reducir el riesgo de sobrecalentamiento local y proteger los componentes circundantes. La dureza del material debe ser moderada, para que pueda soportar la presión de contacto sin agrietarse por excesiva fragilidad. Al mismo tiempo, la tenacidad debe ser suficiente para absorber la energía del impacto. En respuesta a estos requisitos, normas internacionales e industriales como IEC 62271 y ANSI/IEEE C37.04 han establecido puntos de referencia de rendimiento para materiales de interruptores de alto voltaje, que abarcan pruebas de resistencia al arco, pruebas de estabilidad térmica y evaluaciones de durabilidad mecánica. Los materiales deben verificarse según estos estrictos estándares para garantizar un rendimiento excelente en el complejo entorno de los interruptores de alto voltaje. Las aleaciones de cobre y tungsteno cumplen estos requisitos debido a su rendimiento integral y se convierten en el material preferido.

6.1.2.2 Rendimiento de la aleación de cobre y tungsteno para cumplir con los requisitos de los interruptores de alto voltaje

En primer lugar, el alto punto de fusión y la dureza del tungsteno confieren a la aleación una excelente resistencia a las altas temperaturas y a la erosión del arco. Cuando el interruptor de alto voltaje desconecta la corriente de alto voltaje, el calor extremo generado por el arco es absorbido y dispersado eficazmente por la fase de tungsteno, evitando que el contacto se derrita o se produzca una ablación severa. La alta conductividad del cobre garantiza la transmisión eficiente de corriente, reduce el efecto térmico resistivo y proporciona una ruta conductora estable para el dispositivo de extinción de arco. La microestructura de la aleación se optimiza mediante pulvimetalurgia o proceso de infiltración al vacío.

tungsteno es particularmente importante en los interruptores de alto voltaje. La eficiente capacidad de disipación de calor puede transferir rápidamente el calor del arco al área circundante, reducir la temperatura local del contacto y extender la vida útil. La resistencia mecánica y la resistencia al desgaste permiten realizar frecuentes acciones de conmutación. La tenacidad de la aleación se ve mejorada por la ductilidad de la fase de cobre, reduciendo el riesgo de grietas causadas por impacto o vibración. El tratamiento superficial de la fase de cobre puede mejorar aún más la resistencia a la corrosión. En la aplicación real de interruptores de alto voltaje, la aleación de cobre y tungsteno también exhibe una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

excelente estabilidad de contacto eléctrico, reduce la resistencia de contacto y la generación de calor y mejora la confiabilidad general del equipo. Para diferentes relaciones, como WCu 70/30 o WCu 80/20, la aleación puede ajustar su rendimiento según las necesidades específicas. WCu 80/20 es más adecuado para escenarios de arco alto, mientras que WCu 70/30 es superior en situaciones donde se requiere mayor conductividad. Estas características de rendimiento hacen que la aleación de cobre y tungsteno sea una opción ideal para los componentes centrales de los interruptores de alto voltaje.

6.1.2.3 Diferencias de aplicación de la aleación de tungsteno-cobre en interruptores de alto voltaje de diferentes niveles de voltaje

Las aleaciones de tungsteno y cobre en interruptores de alto voltaje de diferentes niveles de voltaje se reflejan principalmente en los diferentes requisitos de voltaje, corriente e intensidad de arco, lo que afecta la relación de aleación, el proceso de preparación y el diseño del componente. Los niveles de voltaje de los interruptores de alto voltaje generalmente se dividen en voltaje medio (1 kV a 35 kV), alto voltaje (35 kV a 230 kV) y voltaje ultra alto (por encima de 230 kV). Cada nivel tiene formas de aplicación y requisitos de rendimiento significativamente diferentes para las aleaciones de cobre y tungsteno. En los interruptores de media tensión, la intensidad del arco es relativamente baja y la aleación de cobre y tungsteno generalmente se prepara mediante un proceso de pulvimetalurgia con una relación WCu 70/30, centrándose en optimizar la conductividad y la resistencia al desgaste. Los componentes de contacto son en su mayoría formas geométricas simples, lo que enfatiza la rentabilidad y la estabilidad a largo plazo. La resistencia de la aleación a la erosión del arco es suficiente para hacer frente a las operaciones de conmutación en entornos de media tensión.

Los interruptores de alto voltaje (como 110 kV a 230 kV) enfrentan arcos eléctricos y cargas térmicas más fuertes. Las aleaciones de tungsteno y cobre tienden a utilizar proporciones de contenido de tungsteno WCu 80/20 o superiores para mejorar la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la erosión del arco. El proceso de preparación puede combinarse con infiltración al vacío para garantizar una mayor densidad y uniformidad. El diseño del contacto a menudo adopta una estructura multicapa o una forma compuesta, con una capa interna de tungsteno alto para resistir arcos y una capa externa de cobre alto para optimizar la conductividad. A medida que aumenta el tamaño y el peso de los componentes, es necesario tener en cuenta la resistencia mecánica y la gestión térmica. A menudo se utiliza un recubrimiento de superficie o un tratamiento térmico para mejorar la durabilidad. Los interruptores de voltaje ultra alto tienen requisitos máximos de rendimiento del material. La energía del arco es extremadamente grande. Las aleaciones de tungsteno y cobre pueden utilizar relaciones WCu 90/10 para preparar contactos con formas complejas y dispositivos de extinción de arco mediante tecnología de fabricación aditiva o pulverización de plasma.

Estas diferencias reflejan el impacto de los niveles de voltaje en la aplicación de aleaciones de cobre y tungsteno. Los escenarios de bajo voltaje se centran en el costo y la conductividad, los escenarios de voltaje medio y alto enfatizan la resistencia al arco y la gestión térmica, y los escenarios de voltaje ultra alto buscan un rendimiento extremo y estructuras complejas. El proceso de preparación y el posprocesamiento deben ajustarse según el nivel de voltaje. En el futuro, se podrá utilizar un diseño

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

inteligente y una combinación de múltiples tecnologías para adaptarse a las necesidades de niveles de voltaje más altos y ampliar aún más el alcance de aplicación.

6.1.3 Aplicación de relés e interruptores automáticos de aire

La aleación de cobre y tungsteno en relés e interruptores automáticos de aire es una manifestación importante de la aleación de cobre y tungsteno en el campo eléctrico, especialmente en escenarios que requieren protección y control eléctrico de alta confiabilidad. Como dispositivos de control de señales de baja potencia, los relés dependen de contactos para realizar el encendido y apagado de los circuitos, y las acciones mecánicas frecuentes imponen requisitos sobre la durabilidad de los materiales. Los disyuntores de aire se utilizan para proteger los circuitos contra daños por sobrecarga o cortocircuito. Sus sistemas de extinción de arco necesitan soportar altas corrientes y arcos fuertes, lo que requiere materiales de alto rendimiento. La aleación de cobre y tungsteno se ha convertido en el material principal para los contactos de relés y las cámaras de extinción de arco de los interruptores de aire debido a su excelente conductividad, resistencia al desgaste y resistencia a la erosión del arco.

6.1.3.1 Requisitos de resistencia al desgaste del material del relé e idoneidad de la aleación de cobre y tungsteno

Los requisitos de resistencia al desgaste de los relés para los materiales se deben a sus frecuentes acciones de conmutación mecánica y a la presión de contacto, que afectan directamente la vida útil y la confiabilidad de los contactos. La resistencia al desgaste es un requisito fundamental porque cuando los relés conmutan señales de baja potencia, los contactos deben soportar el contacto físico repetido y la separación. El funcionamiento a largo plazo puede provocar desgaste de la superficie, transferencia o adhesión de material, lo que a su vez provoca una mayor resistencia de contacto o fallas. El material también debe tener suficiente dureza para resistir la indentación y mantener al mismo tiempo la tenacidad adecuada para evitar fracturas frágiles causadas por un endurecimiento excesivo. La conductividad eléctrica es otro requisito clave, ya que garantiza una ruta de baja resistencia para favorecer la transmisión de señales; La resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la erosión del arco ayudan a manejar condiciones ocasionales de alta corriente o arco. Además, la resistencia a la corrosión es particularmente importante en ambientes húmedos o industriales para evitar que la oxidación o la contaminación afecten el rendimiento.

La aleación de cobre y tungsteno muestra una adaptabilidad extremadamente alta y cumple con los requisitos de resistencia al desgaste de los relés. Su fase de tungsteno proporciona alta dureza y resistencia al desgaste, resistiendo el desgaste superficial causado por el contacto frecuente y alargando la vida del contacto. La fase de cobre aporta una excelente conductividad, garantizando la estabilidad de la transmisión de la señal y reduciendo el efecto térmico de la resistencia. La densidad, mejora la unión de la interfaz entre el tungsteno y el cobre y reduce los puntos de concentración de tensión mecánica. La resistencia a la erosión del arco admite conmutaciones ocasionales de alta energía, mientras que la resistencia a la corrosión está garantizada por la estabilidad química del tungsteno. En aplicaciones prácticas, el uso de aleaciones de cobre y tungsteno (como WCu 70/30) en los contactos del relé reduce

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

significativamente la tasa de desgaste y extiende la vida útil del equipo, especialmente en operaciones de alta frecuencia o entornos hostiles. En el futuro, sus propiedades antidesgaste se podrán mejorar aún más mediante el endurecimiento de la superficie o la adición de oligoelementos.

6.1.3.2 Ubicación de instalación y realización de la función de aleación de cobre y tungsteno en el relé

La aleación de cobre y tungsteno en el relé se concentra principalmente en el conjunto de contactos, y la posición específica y la realización de la función están estrechamente relacionadas con sus requisitos de diseño. El contacto es el componente central del relé, encargado de realizar el encendido y apagado del circuito. La aleación de cobre y tungsteno generalmente se utiliza para fabricar un contacto móvil o un contacto estático, que se instala entre el mecanismo de accionamiento mecánico y la base del relé. La forma de instalación es principalmente soldadura o prensado para fijar el contacto de aleación de cobre y tungsteno en el sustrato de cobre o acero para garantizar la conexión eléctrica y la estabilidad mecánica. La elección de la posición de instalación debe tener en cuenta la presión de contacto y la distribución del arco. La superficie de contacto generalmente se pule para optimizar el área de contacto y reducir la resistencia.

En términos de realización funcional, los contactos de aleación de cobre y tungsteno utilizan su alta conductividad para garantizar la transmisión confiable de señales de baja potencia, y la fase de cobre proporciona una ruta conductora continua. La alta dureza y resistencia al desgaste de la fase de tungsteno favorecen la conmutación mecánica frecuente, evitan el desgaste o la adhesión y mantienen la estabilidad del contacto a largo plazo. La capacidad de resistir la erosión del arco juega un papel importante en condiciones de alto voltaje o sobrecarga, reduciendo el daño del arco a los contactos y protegiendo la estructura interna del relé. La ubicación de la instalación también puede incluir electrodos auxiliares o piezas de aislamiento de arco. La aleación de cobre y tungsteno ayuda a extinguir el arco o disipar el calor gracias a su resistencia a altas temperaturas. En algunos relés de alta demanda, la aleación de cobre y tungsteno está diseñada como una estructura multicapa, con una capa interna de alto contenido de tungsteno para mejorar la durabilidad y una capa externa de alto contenido de cobre para optimizar la conductividad. La eficacia de la realización funcional depende del control de la precisión de la instalación y de la optimización del proceso, como la calidad de la soldadura y el tratamiento de la superficie. En el futuro, la consistencia de la instalación se puede mejorar mediante la tecnología de automatización del ensamblaje.

6.1.3.3 Requisitos de rendimiento de los materiales para sistemas de extinción de arco de interruptores automáticos de aire

Un sistema de extinción de RC de disyuntores de aire se deriva de las condiciones de trabajo extremas cuando se desconecta alta corriente y necesita cumplir requisitos estrictos en muchos aspectos. En primer lugar, el sistema de extinción de arco debe tener una excelente resistencia a la erosión del arco, porque el arco fuerte generado cuando se desconecta la corriente alta quemará la superficie del material, y el material debe ser capaz de soportar múltiples choques de arco sin fallar. La resistencia a altas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperaturas es la clave. La temperatura del arco puede alcanzar miles de grados. El material debe mantener la integridad estructural a altas temperaturas para evitar la fusión o la deformación. En segundo lugar, la conductividad eléctrica y la conductividad térmica son cruciales. La transmisión de corriente y la disipación de calor eficientes pueden reducir los efectos térmicos resistivos, reducir el sobrecalentamiento local y proteger los componentes circundantes. La resistencia mecánica y la resistencia al desgaste soportan el movimiento frecuente de las rejillas o contactos de extinción de arco y resisten el estrés mecánico y el desgaste.

La resistencia a la corrosión es particularmente importante en ambientes exteriores o industriales para evitar que la humedad o los productos químicos corroan el material y mantener el rendimiento a largo plazo. La dureza del material debe ser moderada, para que pueda soportar arcos y presiones mecánicas sin agrietarse por excesiva fragilidad. La tenacidad debe absorber la energía del impacto. El diseño del sistema de extinción de arco también requiere que el material tenga la capacidad de extinguir arcos rápidamente y cooperar con el efecto de soplado del arco del medio de aire para interrumpir rápidamente el arco. Las normas internacionales como IEC 60947 y ANSI/IEEE C37.13 han establecido puntos de referencia de rendimiento para los materiales de extinción de arco, incluidas pruebas de resistencia al arco y pruebas de estabilidad térmica. Los materiales deben verificarse según estas normas para garantizar un rendimiento excelente en el complejo entorno de los interruptores automáticos de aire. La aleación de cobre y tungsteno cumple estos requisitos debido a su rendimiento integral y se ha convertido en la principal opción para los sistemas de extinción de arco.

6.1.3.4 Principio de aplicación de la aleación de cobre y tungsteno en la cámara de extinción de arco del disyuntor de aire

La aleación de cobre y tungsteno en la cámara de extinción de arco de los interruptores automáticos de aire se basa en su excelente rendimiento cuando se trabaja con alta corriente, especialmente en el control de arco y la gestión térmica. En aplicación, la aleación de desconexión de cobre y tungsteno se utiliza principalmente para rejillas de extinción de arco, contactos y componentes desconectores. Con su alta resistencia a la erosión del arco y a las altas temperaturas, puede soportar las condiciones extremas de desconexión. El principio es que cuando el circuito de aire desconecta la corriente alta, se genera un interruptor de arco en el espacio de contacto y el alto punto de fusión y la dureza de la fase de tungsteno absorben eficazmente la energía del arco para evitar la ablación de la superficie o la pérdida de material. La alta conductividad eléctrica y térmica de la fase de cobre transmite rápidamente la corriente y dispersa el calor, reduce la temperatura local y coopera con el soplado de aire para acelerar la extinción del arco.

La optimización de la microestructura es la clave del principio de aplicación. La distribución uniforme de tungsteno y cobre se logra mediante pulvimetalurgia o un proceso de infiltración al vacío, que reduce la porosidad y mejora la densidad para garantizar una distribución uniforme de la energía del arco. Los componentes de aleación de tungsteno y cobre en la cámara de extinción de arco están diseñados como estructuras segmentadas. La tenacidad absorbe la tensión mecánica y evita la propagación de grietas. La resistencia a la corrosión protege los componentes de las influencias ambientales y prolonga su vida útil. El principio de aplicación también incluye la sinergia con el medio aéreo. La superficie de la aleación de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno y cobre forma una capa protectora de óxido bajo la acción del arco para ayudar a interrumpirlo . Los efectos de gestión y extinción de arco se pueden optimizar mediante el diseño de gradiente funcional.

6.1.4 Aplicación en seccionadores y seccionadores de puesta a tierra

La aleación de cobre y tungsteno en seccionadores y seccionadores de puesta a tierra es una manifestación importante de la aleación de cobre y tungsteno en el campo eléctrico, especialmente en los escenarios de operaciones de aislamiento y puesta a tierra en sistemas de energía. Los seccionadores se utilizan para aislar circuitos en condiciones sin carga para evitar el encendido accidental, mientras que los seccionadores de puesta a tierra proporcionan una conexión a tierra segura durante el mantenimiento o las fallas y deben soportar el impacto de las corrientes de cortocircuito. La aleación de cobre y tungsteno se ha convertido en el material central de estos interruptores debido a su excelente conductividad, resistencia a altas temperaturas y resistencia mecánica. La microestructura de la aleación se optimiza mediante pulvimetalurgia o un proceso de infiltración al vacío para garantizar un rendimiento estable en condiciones de exposición a largo plazo y corrientes extremas. Interruptores y criterios de selección de aleación de cobre tungsteno en seccionadores y seccionadores de puesta a tierra.

6.1.4.1 Requisitos de resistencia a la intemperie para materiales de seccionadores expuestos a entornos a largo plazo

Los requisitos de resistencia a la intemperie de los materiales en entornos de exposición a largo plazo para los seccionadores se derivan del hecho de que generalmente se instalan al aire libre o en entornos industriales y deben soportar la influencia de diversos factores naturales y humanos. En primer lugar, la resistencia a la intemperie debe incluir la resistencia a la corrosión. Los seccionadores suelen estar expuestos a la lluvia, a la niebla salina o a los gases de escape industriales. Los materiales deben resistir la oxidación, el óxido o la erosión química y mantener la conductividad eléctrica y la integridad mecánica. En segundo lugar, la resistencia al envejecimiento por UV es un requisito importante. La exposición prolongada a la luz solar puede provocar la degradación de la superficie del material, y este debe tener propiedades antifotodegradación para evitar la degradación del rendimiento. Además, la resistencia a altas y bajas temperaturas es crucial. Los cambios en la temperatura ambiente pueden inducir estrés térmico. El material debe permanecer estable bajo condiciones climáticas extremas, como altas temperaturas en verano o frío intenso en invierno. También debe considerarse la resistencia a la humedad. Un ambiente húmedo puede provocar fallas en la capa de aislamiento de la superficie o corrosión eléctrica, lo que afecta el funcionamiento seguro.

La durabilidad mecánica es otro requisito clave. El funcionamiento frecuente o las cargas de viento de los seccionadores pueden provocar vibración y desgaste. El material debe tener suficiente dureza y resistencia a la fatiga para evitar grietas o deformaciones. La conductividad eléctrica y la conductividad térmica deben mantenerse durante la exposición a largo plazo para garantizar la confiabilidad del funcionamiento del aislamiento. Las normas internacionales como IEC 62271-102 han establecido requisitos de pruebas de intemperismo para materiales desconectores, incluidas pruebas de niebla salina,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pruebas de exposición a rayos UV y pruebas de ciclo de temperatura. El material debe pasar estas pruebas para demostrar su estabilidad a largo plazo en ambientes exteriores.

6.1.4.2 Diseño de aplicación de aleación de cobre y tungsteno en la parte de contacto conductora del seccionador

La aleación de cobre y tungsteno en la parte de contacto conductora del seccionador se centra en su rendimiento en la operación de aislamiento sin carga. La parte de contacto conductora incluye el contacto móvil, el contacto estático y el terminal de conexión. La aleación de cobre y tungsteno generalmente se prepara en una proporción WCu 70/30 o WCu 80/20 y se forma una estructura de alta densidad mediante pulvimetalurgia. El contacto, y la superficie se pule para optimizar el área de contacto, reducir la resistencia y el calor. La forma de instalación generalmente está atornillada o soldada para garantizar una conexión eléctrica estable con el cuerpo principal del seccionador. Algunos diseños también incluyen un mecanismo de carga de resorte para mantener una presión de contacto constante.

El diseño de la aplicación también tiene en cuenta la optimización de la microestructura. La fase de tungsteno proporciona alta dureza y resistencia al desgaste para soportar el contacto mecánico a largo plazo, mientras que la fase de cobre asegura una transmisión de corriente eficiente. La resistencia de la aleación a la erosión del arco juega un papel en operaciones ocasionales de alto voltaje para evitar la ablación de la superficie. Se puede utilizar una estructura compuesta en el diseño, utilizando una aleación de tungsteno y cobre como capa de contacto combinada con un sustrato de cobre o aluminio para reducir costos y mejorar la conductividad general. Los tratamientos de superficie, como el plateado o el recubrimiento, pueden mejorar la resistencia a la corrosión y la conductividad y adaptarse a entornos exteriores. El diseño también debe considerar la adaptación a la expansión térmica.

6.1.4.3 Requisitos de resistencia del material y conductividad para seccionadores de puesta a tierra cuando están sometidos a corriente de cortocircuito

Los requisitos de conductividad y resistencia del material del interruptor de puesta a tierra cuando se lo somete a corrientes de cortocircuito se derivan de su función de protección crítica en condiciones de falla. Las corrientes de cortocircuito pueden alcanzar miles de amperios y la energía que se libera instantáneamente impone exigencias extremadamente altas al material. En primer lugar, el material debe tener una excelente resistencia mecánica para resistir la fuerza electromagnética y la fuerza de impacto causadas por la corriente de cortocircuito y evitar que el contacto se deforme o se rompa. La resistencia también debe soportar la acción mecánica de la operación de puesta a tierra para garantizar un contacto estable. La conductividad es el requisito principal y la transmisión de corriente eficiente puede conducir rápidamente la energía de cortocircuito a tierra, lo que reduce los daños al equipo y los riesgos para el personal. El material también debe tener una alta conductividad térmica para dispersar rápidamente el calor del cortocircuito y evitar que el sobrecalentamiento local provoque fusión o falla.

La resistencia a altas temperaturas es fundamental. Las corrientes de cortocircuito pueden provocar arcos de alta temperatura y los materiales deben mantener la integridad estructural en condiciones térmicas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

extremas. La resistencia a la erosión del arco admite múltiples operaciones de cortocircuito y reduce la erosión de la superficie que afecta la vida útil. La resistencia a la corrosión es particularmente importante en los interruptores de puesta a tierra exteriores para evitar que la humedad o la niebla salina afecten la conductividad. La dureza y la tenacidad deben estar equilibradas: la dureza debe resistir la presión de contacto y la tenacidad debe absorber la energía del impacto. Las normas internacionales como IEC 62271-102 e IEEE C37.41 establecen requisitos de pruebas de resistencia y conductividad para los materiales de los interruptores de puesta a tierra, incluidas pruebas de resistencia a cortocircuitos y evaluaciones de estabilidad térmica. La aleación de cobre y tungsteno cumple estos requisitos debido a su alta resistencia y conductividad, y el rendimiento se puede mejorar en el futuro mediante la optimización de la relación de aleación.

6.1.4.4 Mecanismo de aleación de cobre y tungsteno para garantizar el funcionamiento seguro del interruptor de puesta a tierra

tungsteno que garantiza el funcionamiento seguro de los interruptores de puesta a tierra se basa en su rendimiento integral en condiciones de cortocircuito. El mecanismo se refleja primero en una alta conductividad. La fase de cobre proporciona una ruta de corriente continua, conduce rápidamente la energía de cortocircuito a tierra, reduce el voltaje del sistema y protege el equipo. de contacto de puesta a tierra. La microestructura de la aleación se optimiza mediante infiltración al vacío o mediante un proceso de pulvimetalurgia. La densidad reduce la porosidad, mejora la resistencia al impacto y la estabilidad térmica y soporta la carga instantánea de corriente de cortocircuito.

El mecanismo de resistencia mecánica y tenacidad soporta la acción mecánica de la operación de puesta a tierra. La fase de tungsteno proporciona dureza para resistir fuerzas electromagnéticas, y la fase de cobre mejora la ductilidad, absorbe la energía del impacto y evita la propagación de grietas. El mecanismo de conductividad térmica dispersa rápidamente el calor del cortocircuito, reduce la temperatura local y protege los componentes circundantes. El mecanismo de resistencia a la corrosión resiste la erosión ambiental a través de la estabilidad química del tungsteno, y el tratamiento de la superficie de la fase de cobre mejora aún más la resistencia a la intemperie. En las aplicaciones, las aleaciones de tungsteno y cobre a menudo se utilizan para fabricar contactos o conectores, diseñados como estructuras multicapa. La capa alta de tungsteno resiste los arcos y la capa alta de cobre optimiza la conductividad. Combinado con el arco de soplado o la estructura segmentada del interruptor de puesta a tierra, el arco se extingue más rápido. En el futuro, se podrá utilizar el monitoreo inteligente para evaluar el rendimiento de la aleación en tiempo real y mejorar la seguridad.

6.1.4.5 Criterios de selección de aleación de cobre-tungsteno en seccionadores y seccionadores de puesta a tierra

tungsteno en seccionadores y seccionadores de puesta a tierra se basan en una evaluación exhaustiva de los requisitos de la aplicación y las condiciones ambientales. En primer lugar, la conductividad es el criterio fundamental. La aleación debe garantizar una transmisión de corriente eficiente. El contenido de cobre suele estar entre el 20 % y el 40 % . 90/10, y el proceso de preparación necesita optimizar la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

densidad. La resistencia mecánica y la resistencia al desgaste requieren que la aleación tenga granos finos y baja porosidad para soportar el funcionamiento mecánico y el uso a largo plazo. La resistencia a la corrosión y a la intemperie son consideraciones importantes en la selección. Para ambientes exteriores se deben seleccionar aleaciones con tratamiento de superficie o recubrimiento mejorado. El coeficiente de expansión térmica debe coincidir con el sustrato para reducir la tensión térmica. El costo y la procesabilidad también afectan la selección. Para las piezas complejas se puede dar prioridad a la pulvimetalurgia y se pueden utilizar estructuras compuestas en escenarios sensibles a los costos. pruebas.

6.2 Aplicación de la aleación de cobre y tungsteno en el campo de la electrónica

La aleación de cobre y tungsteno se utiliza ampliamente en el campo de la electrónica, especialmente en escenarios que requieren un procesamiento de alta precisión y una gestión térmica eficiente. El campo de la electrónica cubre electrodos de mecanizado por electrochispa (EDM), disipadores de calor de empaquetado electrónico y conectores de circuitos de alta frecuencia. La aleación de cobre y tungsteno satisface las necesidades de fabricación de precisión y gestión térmica con su alta resistencia al desgaste del tungsteno y la alta conductividad del cobre. vida. En el encapsulado electrónico, su bajo coeficiente de expansión térmica y conductividad térmica favorecen la disipación del calor de circuitos integrados de alta densidad. En aplicaciones de alta frecuencia, la conductividad de la aleación garantiza la estabilidad de la transmisión de la señal.

6.2.1 Requisitos de rendimiento de los electrodos EDM y ventajas de la aleación tungsteno-cobre

Los requisitos de rendimiento de los electrodos EDM están estrechamente relacionados con las ventajas de las aleaciones de cobre y tungsteno. El rendimiento integral de la aleación hace que ocupe una posición importante en el mecanizado de alta precisión. La electroerosión elimina materiales de la pieza de trabajo mediante una descarga de chispa eléctrica, lo que impone requisitos estrictos en cuanto a la conductividad, la resistencia al desgaste y la resistencia a altas temperaturas de los materiales del electrodo. Las relaciones WCu 70/30 y WCu 80/20 son opciones comunes, logrando un equilibrio entre conductividad y resistencia al desgaste respectivamente. La microestructura de la aleación se optimiza a través de la metalurgia de polvos o el proceso de infiltración al vacío para garantizar una baja porosidad y una distribución uniforme de la fase, mejorar la precisión del mecanizado y la vida útil. En esta sección se analizarán en detalle los requisitos del índice de rendimiento del proceso EDM para los materiales de los electrodos, los requisitos para las diferencias de rendimiento de los electrodos en diferentes escenarios de mecanizado, el análisis de adaptabilidad de la aleación de cobre y tungsteno en términos de conductividad y resistencia al desgaste, la comparación de las ventajas de rendimiento en comparación con los materiales de electrodos tradicionales y los criterios de selección de aleaciones de electrodos de cobre y tungsteno en equipos EDM comunes.

6.2.1.1 Requisitos del índice de rendimiento de los materiales de los electrodos para el proceso EDM

Los requisitos de rendimiento del material del electrodo en el proceso EDM se derivan de su principio único de eliminación del material de la pieza de trabajo a través de una descarga de chispa eléctrica, que

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

involucra múltiples propiedades clave. En primer lugar, el material debe tener una conductividad excelente para garantizar una transmisión de corriente eficiente, generar una descarga de chispa estable y reducir la pérdida de energía y las irregularidades durante el procesamiento. La conductividad eléctrica afecta directamente la eficiencia de descarga, especialmente en el mecanizado fino, donde se requiere que los electrodos proporcionen una ruta de baja resistencia. La conductividad térmica es otro indicador fundamental. La buena capacidad de disipación de calor puede transferir rápidamente el calor generado por la descarga al exterior del electrodo, evitando que el sobrecalentamiento local provoque deformación del electrodo o quemaduras en la superficie de la pieza de trabajo. La resistencia al desgaste es un requisito clave. La descarga entre el electrodo y la pieza de trabajo durante la electroerosión provocará pérdida de material.

La resistencia a la erosión por arco es igualmente importante. Las descargas frecuentes pueden provocar ablación o transferencia de material en la superficie del electrodo. El material debe soportar arcos de alta energía sin deteriorarse rápidamente. La resistencia a altas temperaturas es esencial. La temperatura alta local en el momento de la descarga puede alcanzar miles de grados, como agujeros profundos o estructuras finas. La resistencia a la corrosión es especialmente importante al procesar ciertas piezas químicamente activas, para evitar daños en la superficie del electrodo o contaminación de la superficie de la pieza de trabajo. La precisión del procesamiento requiere que el electrodo tenga baja porosidad y una microestructura uniforme para garantizar la uniformidad de la descarga y evitar defectos de procesamiento. Normas internacionales como ISO 14132 y JIS B 6402 han establecido puntos de referencia de rendimiento para los materiales de electrodos EDM, incluidas pruebas de conductividad, pruebas de resistencia al desgaste y evaluación de la estabilidad térmica. Las aleaciones de cobre y tungsteno cumplen estos requisitos gracias a sus amplias propiedades y se convierten en el material preferido para la electroerosión.

6.2.1.2 Diferentes requisitos de rendimiento de los electrodos en diferentes escenarios de procesamiento

Las diferentes demandas de rendimiento de los electrodos en diferentes escenarios de procesamiento reflejan los diversos requisitos de los materiales de la pieza de trabajo, la precisión y la eficiencia del procesamiento, y afectan directamente la proporción y la forma de aplicación de la aleación de cobre y tungsteno. En escenarios de precisión, como el procesamiento de moldes, microengranajes o componentes electrónicos de precisión, el electrodo debe tener una precisión de procesamiento y una calidad de superficie extremadamente altas, y requiere baja porosidad y una estructura de grano fino para garantizar la uniformidad de la descarga. La conductividad debe ser estable para soportar un control preciso de la corriente y la resistencia al desgaste por corte debe ser excelente para reducir la pérdida de electrodos y extender la vida útil. La relación WCu 70/30 comúnmente utilizada tiene una proporción moderada de fase de cobre, lo que garantiza la conductividad y mantiene una cierta resistencia al desgaste. En escenarios de procesamiento aproximado, como la eliminación de grandes volúmenes de material o la apertura de cavidades de molde aproximado, se enfatiza la descarga eficiente y la eliminación rápida del material. La conductividad y la resistencia a altas temperaturas son más importantes y los requisitos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de resistencia al desgaste son relativamente bajos. Se puede seleccionar la relación WCu 60/40 para mejorar la conductividad y acelerar el procesamiento.

Al procesar materiales con alto punto de fusión o alta dureza (como acero de tungsteno, carburo de tungsteno o aleación de titanio), el electrodo debe tener mayor resistencia a las altas temperaturas y a la erosión del arco. Son más adecuados WCu 80/20 o aleaciones con mayor contenido de tungsteno. También es necesario mejorar la conductividad térmica para dispersar el calor de alta energía y reducir la zona de la pieza de trabajo afectada por el calor. En escenarios de procesamiento de orificios profundos o geometría compleja, el electrodo debe tener buena resistencia mecánica y procesabilidad, soportar estructuras delgadas o formas complejas, y resistencia al desgaste y a la corrosión para soportar usos múltiples. A menudo se utiliza una relación WCu 70/30 combinada con un proceso de pulido de superficie. Al procesar materiales no conductores (como cerámica), se requiere un diseño de electrodo auxiliar y los requisitos de conductividad se combinan con los materiales auxiliares. Se puede seleccionar WCu 60/40 con alto contenido de cobre. Diferentes escenarios también involucran velocidad y costo de procesamiento. El corte de precisión tiende a ser con materiales de alta precisión y alta durabilidad, y el procesamiento en bruto tiende a ser rentable y eficiente. En el futuro, la relación de aleación y los parámetros del proceso se pueden ajustar dinámicamente para adaptarse a las necesidades de procesamiento diversificadas y mejorar aún más el rendimiento del electrodo.

6.2.1.3 Análisis de la compatibilidad de la aleación de cobre-tungsteno en términos de conductividad y resistencia al desgaste

El análisis de compatibilidad de la aleación de cobre y tungsteno en términos de conductividad y resistencia al desgaste refleja sus ventajas únicas como electrodo EDM. La conductividad la proporciona principalmente la fase de cobre. La alta conductividad del cobre garantiza una transmisión de corriente eficiente, produce una descarga de chispa eléctrica estable y reduce la pérdida de energía y las irregularidades durante el procesamiento. La microestructura de la aleación se optimiza mediante pulvimetalurgia o proceso de infiltración al vacío. Las relaciones 60/40 funcionan bien en conductividad y son adecuadas para escenarios que requieren procesamiento de alta eficiencia. La conductividad térmica y la conductividad eléctrica se complementan. La alta conductividad térmica de la fase de cobre transfiere rápidamente el calor de descarga al exterior del electrodo, reduce la temperatura local y evita la deformación o el agrietamiento, especialmente en el corte de precisión.

La resistencia al desgaste se debe principalmente a la fase de tungsteno, cuya alta dureza y propiedades antidesgaste resisten la pérdida de material causada por la descarga de chispas. Los granos finos y la estructura de baja porosidad mejoran la estabilidad de la superficie y reducen el desgaste y la erosión de los electrodos, especialmente en el mecanizado de alta energía. La resistencia a altas temperaturas de la fase de tungsteno favorece una descarga de alta energía. El WCu 80/20 tiene un mejor rendimiento en resistencia al desgaste y a la erosión por arco, y es adecuado para procesar materiales de alta dureza. La unión de la interfaz entre el tungsteno y el cobre se logra mediante la optimización del proceso, reduciendo el riesgo de pelado y manteniendo la resistencia al desgaste a largo plazo. El análisis de compatibilidad muestra que la aleación de tungsteno y cobre puede lograr un equilibrio entre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conductividad y resistencia al desgaste ajustando la relación tungsteno-cobre. WCu 70/30 es una opción general que tiene en cuenta ambos rendimientos, mientras que WCu 80/20 es más adecuado para requisitos de alta resistencia al desgaste.

6.2.1.4 Ventajas de rendimiento en comparación con los materiales de electrodos tradicionales

En comparación con los materiales de electrodos tradicionales, como el cobre puro, el tungsteno puro y el grafito, la aleación de tungsteno y cobre muestra una superioridad significativa en la comparación de ventajas de rendimiento. En primer lugar, en comparación con el cobre puro, la aleación de tungsteno y cobre tiene una mayor resistencia a las altas temperaturas y a la erosión del arco. El cobre puro es fácil de fundir o deformar en una descarga de alta energía, mientras que la fase de tungsteno de la aleación de tungsteno y cobre mejora la estabilidad térmica y extiende la vida útil del electrodo. La aleación de tungsteno y cobre se acerca a su nivel optimizando la distribución de la fase de cobre. También tiene resistencia al desgaste y reduce la pérdida, lo que es particularmente evidente en el procesamiento a largo plazo. En comparación con el tungsteno puro, la conductividad eléctrica y la conductividad térmica de la aleación de cobre y tungsteno mejoran enormemente. La baja conductividad eléctrica del tungsteno puro limita la eficiencia de descarga, mientras que la fase de cobre de la aleación de tungsteno y cobre compensa esta deficiencia y es adecuada para un procesamiento eficiente.

En comparación con los electrodos de grafito, la aleación de tungsteno y cobre tiene mejor resistencia mecánica y resistencia al desgaste. El grafito es fácil de romper o desgastar durante el procesamiento de formas complejas, mientras que la aleación de tungsteno y cobre admite un procesamiento de orificios profundos y de precisión, y tiene una mayor precisión de procesamiento. El grafito tiene una alta conductividad, pero su resistencia a las altas temperaturas y a la erosión del arco no es tan buena como la de la aleación de tungsteno y cobre. Presenta grandes pérdidas al procesar materiales de alta dureza y cortes con poca rugosidad superficial. La baja porosidad y la microestructura uniforme de la aleación de tungsteno y cobre garantizan la consistencia del procesamiento, mientras que el grafito puede causar una descarga desigual debido a su porosidad. Comparación exhaustiva, la aleación de tungsteno y cobre tiene ventajas en durabilidad, precisión y adaptabilidad a múltiples escenarios, especialmente en los requisitos de alta precisión, larga vida útil y procesamiento complejo, los materiales tradicionales como el cobre puro, el tungsteno puro y el grafito son difíciles de igualar.

6.2.1.5 Criterios de selección de aleaciones de electrodos de tungsteno-cobre en equipos de electroerosión comunes

Los electrodos de aleación de tungsteno y cobre en los equipos EDM comunes se basan en una evaluación integral de las características del equipo y los requisitos de procesamiento, lo que afecta directamente la calidad y la eficiencia del procesamiento. En primer lugar, la conductividad es el estándar fundamental. La aleación debe coincidir con los parámetros de descarga del equipo. La relación de WCu 60/40 a WCu 80/20 se selecciona según la intensidad de la corriente y la precisión del procesamiento. El procesamiento de materiales de alta dureza o escenarios de alta energía requiere un mayor contenido de tungsteno. Es más adecuado WCu 80/20 o WCu 90/10. El proceso de preparación debe garantizar una baja porosidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

para reducir las pérdidas. La resistencia a altas temperaturas admite descargas de alta energía, y la selección debe considerar la potencia máxima de descarga y los parámetros de pulso del equipo.

La resistencia mecánica y la procesabilidad afectan la formación de electrodos. Las formas complejas o estructuras delgadas requieren aleaciones fáciles de cortar, y la rugosidad de la superficie debe coincidir con la precisión del procesamiento. La relación WCu 70/30 se utiliza a menudo para equilibrar estos dos aspectos. La resistencia a la corrosión es importante cuando se procesan piezas químicamente activas, y la selección puede incluir el recubrimiento de la superficie o la mejora del revestimiento. También hay que tener en cuenta el coste y la disponibilidad. WCu 70/30 es una opción económica y adecuada para el procesamiento general. Los equipos de alta gama pueden utilizar altas proporciones de tungsteno para cumplir con requisitos de alta durabilidad. Los fabricantes de equipos proporcionan pautas técnicas y la selección debe confirmarse mediante pruebas de resistencia al desgaste, verificación de conductividad y pruebas de procesamiento. Normas internacionales como la ISO 14132 proporcionan referencias de rendimiento.

6.2.2 Papel en el campo de la microelectrónica

El campo de la microelectrónica tiene requisitos extremadamente estrictos en cuanto al rendimiento de los materiales. Requiere una buena conductividad eléctrica y térmica para garantizar una transmisión eficiente de señales electrónicas y calor, y un coeficiente de expansión térmica adecuado para adaptarse a los componentes centrales, como los chips. También debe tener una cierta resistencia estructural para satisfacer las necesidades de envasado de precisión. Con su combinación única de propiedades, la aleación de cobre y tungsteno juega un papel importante en este campo y se ha convertido en un material clave para conectar dispositivos centrales con circuitos externos y resolver problemas de disipación de calor.

6.2.2.1 Requisitos de precisión y estabilidad de los materiales para dispositivos microelectrónicos

Los requisitos de precisión y estabilidad de los dispositivos microelectrónicos para los materiales se derivan de su alta integración y tamaño minúsculo, lo que afecta directamente el rendimiento y la confiabilidad de los dispositivos. En primer lugar, la precisión requiere que el material tenga una exactitud dimensional y una planitud de superficie extremadamente altas. Los dispositivos microelectrónicos, como chips y sensores, suelen estar en el nivel micrométrico o nanométrico. El material debe lograr baja rugosidad y consistencia a través de un procesamiento de precisión para garantizar la uniformidad de la conexión eléctrica y la conducción térmica. La conductividad eléctrica es un indicador clave. El material debe proporcionar una ruta de baja resistencia para soportar la transmisión de señales de alta velocidad y evitar la atenuación o interferencia de la señal. La conductividad térmica es igualmente importante. La disipación de calor eficiente puede reducir la temperatura de funcionamiento del chip y evitar la degradación del rendimiento o fallas debido al sobrecalentamiento.

La estabilidad requiere que el material mantenga un rendimiento constante en el funcionamiento a largo plazo, y la resistencia a altas temperaturas es fundamental. La temperatura de funcionamiento del chip

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

puede alcanzar más de 150 °C y el material no debe perder su forma ni oxidarse a altas temperaturas. La resistencia a la fatiga y la estabilidad mecánica soportan ciclos térmicos frecuentes y tensiones mecánicas para evitar microfisuras o delaminación entre capas. Un coeficiente de expansión térmica bajo es un requisito importante, que coincida con la expansión térmica de los materiales a base de silicio (como los sustratos de chips) para reducir la deformación térmica o la fractura causada por la tensión de deformación térmica. La resistencia a la corrosión y la estabilidad química son particularmente importantes en ambientes húmedos o ácidos para evitar que la degradación del material afecte la vida útil del dispositivo. Normas internacionales como JEDEC JESD22 e IPC-6012 han establecido puntos de referencia de rendimiento para materiales microelectrónicos, incluidas pruebas de ciclo térmico y evaluación de confiabilidad. Las aleaciones de cobre y tungsteno cumplen estos requisitos debido a su rendimiento integral y se han convertido en el material preferido en el campo de la microelectrónica.

6.2.2.2 Aplicación de la aleación de cobre y tungsteno en el encapsulado microelectrónico

La aleación de cobre y tungsteno en el encapsulado microelectrónico adopta diversas formas, dependiendo del tipo de encapsulado y de los requisitos de gestión térmica. Una forma común es convertir una aleación de cobre y tungsteno en un sustrato disipador de calor, que se utiliza directamente para el empaquetado de chips. La relación WCu 85/15 o WCu 90/10 se prepara mediante un proceso de pulvimetalurgia, el espesor suele estar entre 0,5 mm y 2 mm y la superficie se pule para optimizar el contacto térmico. Otra forma es una estructura compuesta, que utiliza una aleación de cobre y tungsteno como capa disipadora de calor, combinada con un sustrato de cerámica (como AlN) o metal (como Cu-Mo), e integrada mediante soldadura por difusión o ajuste a presión para equilibrar la expansión térmica y la conductividad térmica. En la aplicación, la aleación también se puede procesar en formas complejas, como disipadores de calor con microcanales, para satisfacer las necesidades de empaquetado de alta densidad.

La forma de instalación se fija principalmente mediante unión o pernos para garantizar un contacto cercano con el chip o la carcasa del paquete. El tratamiento de superficies, como el niquelado o el enchapado en oro, puede mejorar la resistencia a la corrosión y la soldabilidad, y adaptarse a una variedad de procesos de envasado. En algunas aplicaciones de alto rendimiento, la aleación de cobre y tungsteno está diseñada como un material de gradiente funcional, y el contenido de tungsteno disminuye desde el sustrato hasta la superficie para optimizar la adaptación térmica y la conductividad con el chip. En el embalaje, la aleación también se utiliza para marcos de cables o interconexiones, y la relación WCu 70/30 favorece la transmisión de señales y la disipación del calor.

6.2.2.3 Mecanismos para mejorar la eficiencia de disipación de calor y la vida útil de los dispositivos microelectrónicos

La aleación de cobre y tungsteno mejora la eficiencia de disipación de calor y la vida útil de los dispositivos microelectrónicos se basa en su excelente gestión térmica y estabilidad estructural. En primer lugar, la alta conductividad térmica de la aleación transfiere rápidamente el calor generado por el chip a la superficie de disipación de calor, reduciendo la temperatura de funcionamiento y evitando la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

degradación del rendimiento causada por la acumulación de tensión térmica. El bajo coeficiente de expansión térmica coincide con el material a base de silicio, lo que reduce la deformación o el agrietamiento durante los ciclos térmicos y mejora la estabilidad mecánica de la estructura del empaque. El alto punto de fusión y la resistencia a altas temperaturas de la fase de tungsteno soportan el chip en un entorno operativo superior a 150 °C y evitan la degradación del material.

La optimización de la microestructura reduce los poros y defectos, mejora la continuidad de la trayectoria de conducción del calor y la relación WCu 85/15 tiene un desempeño sobresaliente en la eficiencia de disipación del calor. La distribución uniforme de la fase reduce la resistencia térmica, la fase de cobre proporciona una distribución eficiente del calor y la fase de tungsteno favorece la integridad estructural. La resistencia a la corrosión y a la oxidación protegen la aleación de la humedad o los productos químicos, lo que prolonga su vida útil. envejecimiento y aumenta la vida útil de miles de horas para materiales tradicionales a más de 10.000 horas, especialmente en informática de alto rendimiento y dispositivos 5G.

6.2.2.4 Diseño de la estructura de montaje en el módulo de empaquetado del chip

El diseño de la estructura de montaje en el módulo de empaquetado del chip debe aprovechar al máximo el rendimiento de la aleación de cobre y tungsteno para optimizar la gestión térmica y las conexiones eléctricas. En el diseño, a menudo se utiliza una aleación de cobre y tungsteno como sustrato de disipación de calor, que se coloca debajo del chip y en contacto con la parte inferior del chip a través de materiales de interfaz térmica (como grasa térmica) para garantizar una conducción de calor eficiente. La forma de instalación es mayoritariamente atornillada o adherida. El espesor del sustrato se selecciona de acuerdo con la potencia del chip, y 0,5 mm a 1,5 mm es un rango común. El diseño también incluye una estructura de microcanal o aleta para aumentar el área de disipación de calor. La relación WCu 90/10 admite chips de alta potencia y el recubrimiento de la superficie mejora la soldabilidad.

El diseño de la conexión eléctrica utiliza aleación de cobre y tungsteno para marcos de cables o interconexiones. La relación WCu 70/30 se integra mediante ajuste a presión o soldadura y se acopla al chip pad para garantizar una ruta de baja resistencia. El diseño estructural considera la adaptación a la expansión térmica, y el diseño de baja tensión térmica de la aleación de cobre y tungsteno y el sustrato de cerámica o silicio evita la deformación del paquete. La ubicación de instalación también incluye una capa de disipación de calor auxiliar, combinada con un sistema de enfriamiento por aire o líquido para optimizar la ruta del flujo de calor. El diseño debe verificar la tensión térmica y la estabilidad mecánica mediante análisis de elementos finitos, y las normas internacionales como JEDEC JESD51 proporcionan pautas de gestión térmica.

6.2.2.5 Requisitos de pureza y microestructura de la aleación de cobre-tungsteno en el campo de la microelectrónica

Los requisitos de pureza y microestructura de las aleaciones de cobre y tungsteno en el campo de la microelectrónica surgen de la necesidad de alta precisión y confiabilidad. En primer lugar, los requisitos de pureza son extremadamente altos y el contenido de impurezas del tungsteno y el cobre debe ser inferior

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

al 0,1 % para evitar la reducción de la conductividad o la obstrucción de la conducción del calor. El contenido de oxígeno debe controlarse a un nivel bajo para evitar la formación de óxidos que afecten la microestructura. La pureza también implica el control de los oligoelementos. Por ejemplo, el dopaje de hierro o silicio puede provocar un debilitamiento de los límites de grano, lo que debe garantizarse mediante materias primas de alta pureza y procesos de vacío. Las normas internacionales como ASTM B702 especifican los requisitos de composición para aleaciones de cobre y tungsteno de alta pureza. La microestructura requiere una distribución de fases uniforme. El tamaño de las partículas de tungsteno y cobre debe estar en el rango de 5 a 20 micrones. Los granos finos mejoran la resistencia mecánica y la conductividad térmica. La porosidad debe ser inferior al 1% para garantizar la continuidad de la conducción térmica y las propiedades eléctricas. Las áreas no humedecidas deben verificarse mediante microscopía electrónica de barrido. Los procesos de preparación como el prensado isostático en caliente (HIP) pueden mejorar la uniformidad estructural. En el futuro, la pureza y la microcalidad se podrán mejorar aún más mediante nanotecnología o procesos de matriz en fase.

6.2.3 Aplicación en el campo de los sensores

Como dispositivo central para obtener información ambiental, los sensores a menudo funcionan en entornos complejos, como escenas industriales de alta temperatura, entornos exteriores húmedos o sistemas mecánicos con vibraciones e impactos, lo que plantea muchos requisitos sobre la estabilidad, adaptabilidad y funcionalidad de los materiales del sensor. La aleación de cobre y tungsteno ha demostrado gradualmente su valor de aplicación en el campo de los sensores debido a su alta resistencia a la temperatura, resistencia a la vibración, buena conductividad térmica y estabilidad estructural, y se ha convertido en una opción de material importante para mejorar la confiabilidad del sensor.

6.2.3.1 Requisitos de rendimiento del material para el entorno de trabajo del sensor

Los requisitos de rendimiento del material en el entorno de trabajo del sensor varían debido a sus diversos escenarios de aplicación, lo que afecta directamente la precisión y la vida útil del sensor. En primer lugar, la resistencia a altas temperaturas es un requisito clave. Muchos sensores, como los sensores de presión de alta temperatura o los termopares, necesitan funcionar en entornos superiores a 200 °C a 1000 °C. El material debe mantener la estabilidad estructural y la conductividad para evitar la degradación del rendimiento debido a la deformación térmica o la oxidación. La resistencia a la corrosión es otro requisito fundamental. Los sensores a menudo están expuestos a entornos ácidos, alcalinos o húmedos, como aplicaciones químicas o marinas. El material debe resistir la erosión química para evitar que la degradación de la superficie afecte la precisión de la medición. La resistencia mecánica y la resistencia al desgaste respaldan el uso a largo plazo de sensores bajo vibración o estrés mecánico, evitando el desgaste o rotura de los componentes, especialmente en equipos industriales.

La conductividad eléctrica es fundamental para los sensores de señales eléctricas (como los sensores resistivos o capacitivos). El material debe proporcionar una ruta de baja resistencia para garantizar la precisión y estabilidad de la transmisión de la señal. La conductividad térmica es importante en sensores de alta temperatura o alta potencia. La disipación de calor eficiente reduce las temperaturas de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

funcionamiento y protege los componentes sensibles. El bajo coeficiente de expansión térmica se adapta al sustrato, reduce la concentración de tensión durante los ciclos térmicos y mejora la integridad estructural. La precisión dimensional requiere que el material sea fácil de cortar con precisión para cumplir con los requisitos de estructura a nivel micrométrico de los microsensores (como MEMS). Normas internacionales como IEC 60751 y ASTM E1137 han establecido puntos de referencia de rendimiento para los materiales de los sensores, incluidas pruebas de resistencia a la temperatura y evaluación de la confiabilidad. La aleación de cobre y tungsteno se ha convertido en el material preferido en el campo de los sensores debido a su desempeño integral para cumplir con estos requisitos.

6.2.3.2 Aplicaciones potenciales de la aleación de tungsteno y cobre en elementos de detección de sensores

La aleación de cobre y tungsteno en los sensores sensibles varía en elementos, dependiendo del tipo de sensor y de los requisitos funcionales. Una forma posible es convertir una aleación de cobre y tungsteno en un elemento sensible de un sensor de temperatura resistivo. La relación WCu 70/30 se prepara mediante pulvimetalurgia y se procesa en una estructura de película delgada o filamento, utilizando la alta conductividad de la fase de cobre y la estabilidad de la fase de tungsteno para medir con precisión los cambios de temperatura. Otra forma es utilizarlo para el diafragma o contacto de un sensor de presión. La relación WCu 85/15 está optimizada mediante un proceso de infiltración al vacío, con un espesor entre 0,1 mm y 0,5 mm, y el pulido de la superficie garantiza un alto contacto, lo que favorece la detección de deformaciones en entornos de alta presión.

En sensores de desplazamiento o aceleración se pueden utilizar aleaciones de cobre y tungsteno como electrodos o conectores. La relación WCu 60/40 se integra mediante prensado o soldadura, combinando alta conductividad y resistencia mecánica para satisfacer las necesidades de medición dinámica. Las aplicaciones potenciales también incluyen elementos de calentamiento para sensores de gas. La aleación se procesa en placas de microcalentamiento. La relación WCu 80/20 favorece la estabilidad a altas temperaturas y el revestimiento de la superficie mejora la resistencia a la corrosión. con el sustrato del sensor. El diseño puede adoptar una estructura multicapa, con una capa interna de tungsteno alto para mejorar la durabilidad y una capa externa de cobre alto para optimizar la conductividad. Estas formas de aplicación aprovechan al máximo el rendimiento de las aleaciones de cobre y tungsteno para satisfacer los requisitos de alta precisión y confiabilidad de los componentes sensibles. En el futuro se podrán desarrollar estructuras de aplicaciones más complejas mediante la tecnología de impresión 3D.

6.2.3.3 Diseño de aplicaciones de componentes de disipación de calor de sensores basados en alta conductividad térmica

El diseño de aplicaciones de componentes de disipación de calor de sensores basados en alta conductividad térmica tiene como objetivo utilizar las capacidades de gestión térmica de la aleación de cobre y tungsteno para mejorar el rendimiento y la vida útil de los sensores en entornos de alta temperatura. En el diseño, a menudo se utiliza una aleación de cobre y tungsteno como sustrato de disipación de calor y se coloca debajo del elemento sensible del sensor. La relación WCu 85/15 o WCu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

90/10 se prepara mediante un proceso de pulvimetalurgia, con un espesor entre 1 mm y 3 mm y una planitud superficial mejor que 5 μm para garantizar un contacto cercano con el elemento sensible. El diseño también incluye una estructura de microcanal o aleta para aumentar el área de disipación de calor, transferir rápidamente el calor al radiador externo o al aire ambiente y reducir la temperatura del elemento sensible.

El método de montaje es fijación con pernos o unión conductora térmica, integrado con la carcasa del sensor o el sistema de enfriamiento de aire, y el material de interfaz térmica (como la almohadilla conductora térmica) optimiza la resistencia térmica del contacto. El bajo coeficiente de expansión térmica (aproximadamente 7 ppm/ $^{\circ}\text{C}$) está diseñado para adaptarse al sustrato de silicio o cerámica, lo que reduce el estrés durante el ciclo térmico y evita el agrietamiento del paquete. El componente de disipación de calor puede combinarse con un sistema de refrigeración activo (como un microventilador). La relación WCu 70/30 es ventajosa en escenarios de peso ligero y el niquelado de la superficie mejora la resistencia a la corrosión. En las aplicaciones, la eficiencia de disipación de calor reduce significativamente la temperatura de funcionamiento de los componentes sensibles y prolonga su vida útil, especialmente en sensores de presión de alta temperatura o sensores infrarrojos. El diseño debe verificar la distribución del flujo de calor a través de simulación térmica, y estándares internacionales como JEDEC JESD51 proporcionan pautas de gestión térmica. En el futuro, el diseño de gradiente funcional se puede utilizar para optimizar la disipación del calor y el equilibrio estructural.

6.3 Aplicación de la aleación de cobre y tungsteno en el campo aeroespacial

El campo aeroespacial tiene requisitos casi estrictos en cuanto a la tolerancia de los materiales. Debe hacer frente al impacto de temperaturas extremadamente altas, altas presiones y flujos de aire de alta velocidad, al tiempo que garantiza la estabilidad estructural y funciones confiables. La aleación de cobre y tungsteno se ha convertido en el material central para muchos componentes clave en este campo debido a su alto punto de fusión y alta resistencia del tungsteno y alta conductividad térmica y resistencia al choque térmico del cobre. En escenas como cohetes sólidos, protección térmica de naves espaciales y componentes satelitales, se aprovechan plenamente sus características de "equilibrio entre resistencia a altas temperaturas y conductividad térmica" y "combinación de resistencia y resistencia al impacto". Entre ellas, el revestimiento de garganta de tobera de cohete sólido es una de sus aplicaciones más representativas.

6.3.1 Aplicación del revestimiento de garganta de tobera de cohete sólido

El revestimiento de la garganta de la tobera del cohete sólido es la parte de "garganta" de la tobera del motor del cohete, que es responsable de guiar el gas de alta temperatura para expulsarlo a alta velocidad para generar empuje. Su rendimiento determina directamente la eficiencia de propulsión y la seguridad del lanzamiento del cohete. Debido al entorno de trabajo extremadamente complejo, los requisitos de rendimiento generales del material son extremadamente altos. La aleación de cobre y tungsteno se ha convertido en el material ideal para este componente a través del proceso de adaptación y optimización del rendimiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3.1.1 Entorno de trabajo del revestimiento de garganta de la tobera del cohete sólido

El entorno de trabajo del revestimiento de la garganta de una tobera de cohete sólido puede describirse como un "purgatorio de materiales" y debe soportar la superposición de múltiples condiciones extremas al mismo tiempo. Después de que se enciende el cohete, el gas de combustión a alta temperatura generado por la combustión del propulsor sólido fluye a través del revestimiento de la garganta a una velocidad supersónica. La temperatura del gas puede alcanzar miles de grados Celsius, lo que es suficiente para fundir la mayoría de los metales instantáneamente; Las partículas sólidas transportadas por el flujo de aire a alta velocidad impactan la superficie del revestimiento de la garganta a una velocidad extremadamente alta, formando un efecto de "chorro de arena" continuo, desgastando constantemente la superficie del material; El gas oxidante y las partículas corrosivas contenidas en el gas de combustión reaccionarán químicamente con la superficie del revestimiento de la garganta, agravando aún más la pérdida de material; Lo que es más grave es que en el corto período de tiempo desde el encendido hasta el apagado del motor, la temperatura del revestimiento de la garganta aumentará bruscamente de temperatura ambiente a temperatura alta, y luego se enfriará rápidamente. La enorme fluctuación de temperatura producirá una fuerte tensión térmica, que puede provocar fácilmente que el material se agriete. Este entorno compuesto de "combustión a alta temperatura + erosión a alta velocidad + corrosión química + choque térmico" plantea un desafío extremo a la tolerancia del material.

6.3.1.2 Requisitos para las propiedades del material del revestimiento de la garganta de la boquilla

El entorno de trabajo del revestimiento de garganta de la boquilla determina que sus requisitos de rendimiento para el material deben ser exhaustivos y estrictos. En primer lugar, el material debe tener una resistencia a temperaturas extremadamente altas, no fundirse ni deformarse a altas temperaturas de miles de grados Celsius y ser capaz de mantener la integridad estructural; En segundo lugar, debe tener una excelente resistencia a la erosión y al desgaste, ser capaz de resistir el impacto continuo del flujo de aire y partículas a alta velocidad y reducir la pérdida de superficie; En tercer lugar, la conductividad térmica debe ser excelente y el calor absorbido por la superficie se puede descargar rápidamente para evitar la temperatura excesiva local y la ablación; Al mismo tiempo, la resistencia al choque térmico es indispensable: cuando la temperatura sube y baja repentinamente, puede reducir la generación de estrés térmico y evitar la aparición de grietas; Por último, el material debe tener suficiente resistencia estructural y no romperse ni colapsar bajo la acción del gas a alta presión. Solo cumpliendo estos requisitos al mismo tiempo se puede garantizar que el revestimiento de la garganta funcione de manera estable durante el funcionamiento del cohete.

6.3.1.3 Rendimiento de la aleación de cobre y tungsteno para cumplir con los requisitos del revestimiento de la garganta de la boquilla

La aleación de tungsteno y cobre se adapta con precisión a los requisitos del revestimiento de la garganta de la boquilla, y su principal ventaja radica en la "complementariedad sinérgica del tungsteno y el cobre". El alto punto de fusión del tungsteno permite que la aleación permanezca estable en gas a alta temperatura. Incluso si la superficie está expuesta a temperaturas extremadamente altas, el esqueleto formado por la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fase de tungsteno no se derretirá, resistiendo directamente la "quemadura a alta temperatura"; La alta resistencia y dureza del tungsteno le dan a la aleación una excelente capacidad antierosión, que puede soportar el impacto de partículas de alta velocidad, reducir el desgaste de la superficie y hacer frente a la "erosión de alta velocidad"; La alta conductividad térmica del cobre juega un papel clave: puede conducir rápidamente el calor desde la superficie del revestimiento de la garganta hasta el interior o el sistema de enfriamiento, evitar la ablación causada por la acumulación de calor local y resolver el problema de la "acumulación de calor"; Al mismo tiempo, la plasticidad del cobre puede aliviar la tensión térmica causada por cambios bruscos de temperatura, reducir el riesgo de agrietamiento frágil del esqueleto de tungsteno y mejorar la resistencia al choque térmico; Además, después de que la aleación de tungsteno y cobre se procesa mediante el proceso de densificación, la resistencia estructural es suficiente para resistir el impacto del gas a alta presión y garantizar la estabilidad de la forma del revestimiento de la garganta.

6.3.1.4 Proceso de conformado y diseño estructural de aleación de cobre y tungsteno en el revestimiento de la garganta de la boquilla

La aleación de cobre y tungsteno en el revestimiento de la garganta de la boquilla requiere un proceso de moldeo preciso y un diseño estructural para maximizar el rendimiento. El proceso de moldeo se basa en la metalurgia de polvos: primero, se mezclan polvo de tungsteno y polvo de cobre en una proporción específica y se presionan en la forma inicial del revestimiento de la garganta (palanquilla verde) a través de un molde; Luego, las partículas de tungsteno se combinan a través de sinterización a alta temperatura para formar un esqueleto continuo, y luego se usa el cobre para llenar los poros del esqueleto a través del proceso de infiltración para garantizar la densidad del material; Finalmente, la forma de la superficie curva se recorta mediante un mecanizado de precisión para garantizar la precisión del ensamblaje con otras partes de la boquilla. El diseño estructural se centra en la "adaptación funcional": la superficie del revestimiento de la garganta adopta un diseño de superficie curva en forma de arco para adaptarse a la trayectoria del flujo de gas y reducir el desgaste local causado por el impacto del flujo de aire; Algunos revestimientos de garganta están reservados con pequeños canales de enfriamiento en el interior, combinados con la alta conductividad térmica del cobre, que puede eliminar rápidamente el calor a través del medio de enfriamiento; En la conexión con otras partes de la boquilla, se adopta una estructura de sellado escalonada para evitar fugas de gas a alta temperatura; Al mismo tiempo, el espesor del revestimiento de la garganta se ajusta de acuerdo con la distribución de la fuerza: el área con el impacto de gas más severo se engrosa adecuadamente para garantizar la resistencia y reducir el desperdicio de material. Este diseño de "proceso para garantizar densidad + estructura para optimizar la fuerza y la disipación del calor" permite aprovechar al máximo el rendimiento de la aleación de cobre y tungsteno .

6.3.1.5 Mejora de la vida útil del revestimiento de la garganta de la boquilla después de utilizar aleación de cobre y tungsteno

En comparación con los materiales tradicionales (como tungsteno puro, cerámica, etc.), la aleación de cobre y tungsteno extiende significativamente la vida útil del revestimiento de la garganta de la boquilla, actualizándolo de "un solo uso" a "capaz de soportar múltiples impactos". Aunque el tungsteno puro

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tradicional es resistente a altas temperaturas, es frágil y tiene poca resistencia al choque térmico. Es propenso a agrietarse cuando la temperatura cambia repentinamente y a menudo falla debido a grietas después de un encendido. Aunque los materiales cerámicos son resistentes al desgaste, tienen mala conductividad térmica y la superficie es propensa a la ablación local debido a la acumulación de calor, y su vida útil es extremadamente corta.

La aleación de cobre y tungsteno resuelve estos problemas a través de un rendimiento sinérgico: la fase de tungsteno resiste altas temperaturas y erosión, lo que reduce la tasa de desgaste de la superficie; La fase de cobre conduce el calor de manera eficiente para evitar el sobrecalentamiento local y la ablación; La mejora de la resistencia al choque térmico reduce la posibilidad de grietas; Junto con el proceso de moldeo denso y el diseño estructural optimizado, el revestimiento de garganta puede soportar el impacto de múltiples ciclos de encendido y apagado. En aplicaciones prácticas, el revestimiento de garganta de la boquilla hecho de aleación de cobre y tungsteno no solo puede completar una única misión de lanzamiento, sino que algunos modelos también se pueden usar para múltiples pruebas o cohetes reutilizados, lo que reduce en gran medida la frecuencia de reemplazo y el riesgo de fallas, al tiempo que mejora la economía y confiabilidad de los lanzamientos de cohetes.

6.3.2 Aplicaciones potenciales en componentes de motores de aeronaves

El motor de la aeronave es el "corazón" del avión y su rendimiento determina directamente la potencia, la eficiencia y la seguridad del avión. A medida que aumentan los requisitos de la industria de la aviación en cuanto a la relación empuje-peso del motor y la eficiencia del combustible, el entorno de trabajo de los componentes principales se ha vuelto cada vez más severo, lo que plantea mayores desafíos para el rendimiento integral de los materiales. La aleación de cobre y tungsteno, con sus características equilibradas de resistencia a altas temperaturas, conductividad térmica y resistencia estructural, ha demostrado un gran valor de aplicación potencial en lugares clave como los componentes del extremo caliente de los motores de aeronaves, y se espera que resuelva el cuello de botella de rendimiento de los materiales tradicionales en condiciones de trabajo extremas.

6.3.2.1 Características del entorno de trabajo de los componentes clave de los motores de aeronaves

El entorno de trabajo de los componentes clave de los motores de aeronaves (especialmente los componentes del extremo caliente, como cámaras de combustión, álabes de turbinas, toberas, etc.) tiene cuatro características principales: "alta temperatura, alta presión, vibración de alta frecuencia y corrosión". La temperatura de combustión del combustible dentro de la cámara de combustión puede alcanzar miles de grados Celsius, y las palas de la turbina deben girar a alta velocidad (la velocidad puede alcanzar miles de revoluciones por minuto) bajo el lavado de gas de combustión a alta temperatura y soportar una enorme fuerza centrífuga y estrés térmico; Los componentes del espacio entre el compresor de alta presión y la turbina deben permanecer sellados en un entorno de gas a alta presión, al tiempo que resisten la alta temperatura local generada por la fricción del flujo de aire; Además, los sulfuros, óxidos de nitrógeno y otros componentes contenidos en el gas de combustión provocarán corrosión continua en la superficie de los componentes; Las fluctuaciones de temperatura y presión durante el proceso de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

arranque, aceleración y desaceleración del motor también provocarán fatiga térmica de alta frecuencia y vibración mecánica de los componentes. Este entorno compuesto de “alta temperatura continua + tensión alterna + erosión por corrosión + impacto de vibración” plantea una prueba severa a la estabilidad y durabilidad del material.

6.3.2.2 Requisitos para las propiedades de los materiales de los componentes de motores de aeronaves

Debido al entorno de trabajo extremo, los requisitos de rendimiento de los materiales para los componentes de motores de aviación presentan una característica "todoterreno". En primer lugar, el material debe tener una excelente resistencia a altas temperaturas y mantener las propiedades mecánicas (resistencia, dureza) sin una disminución significativa bajo altas temperaturas a largo plazo para evitar deformaciones o fracturas debido al ablandamiento; En segundo lugar, la conductividad térmica debe ser sobresaliente y puede exportar rápidamente calor desde la superficie del componente para reducir la generación de puntos calientes locales y reducir el riesgo de fatiga térmica; En tercer lugar, debe tener buena resistencia al choque térmico y tenacidad mecánica para reducir las grietas cuando la temperatura y la presión cambian, y resistir el choque de vibración; Al mismo tiempo, la resistencia a la corrosión es indispensable y puede resistir la erosión de los componentes corrosivos en el gas para evitar el desprendimiento de la superficie o el debilitamiento estructural; Por último, el material debe tener un cierto grado de procesabilidad y puede fabricarse en estructuras complejas (como la superficie curva de la cuchilla, canales de enfriamiento, etc.) a través del proceso de moldeo para cumplir con los requisitos de diseño de precisión de los componentes. Estas actuaciones deben lograrse de manera coordinada y ninguna de ellas puede faltar.

6.3.2.3 Aplicación de aleación de cobre y tungsteno en piezas del extremo caliente de motores de aeronaves

El uso de aleación de cobre y tungsteno en los componentes del extremo caliente de los motores de aeronaves se centra principalmente en la posición central de "tener en cuenta tanto la conducción del calor como la resistencia a altas temperaturas", y la forma de aplicación se ajusta de acuerdo con las diferentes funciones de los componentes. al sistema de refrigeración para evitar el sobrecalentamiento local de los revestimientos; en la parte de sellado del borde o punta de la pala de la turbina, se puede usar una aleación de cobre y tungsteno como inserto conductor de calor resistente al desgaste e incrustado en la matriz de la pala: su alta dureza puede resistir la fricción y el desgaste con la carcasa, y su conductividad térmica puede ayudar a la pala a disipar el calor y reducir la concentración de tensión térmica; En boquillas de combustible o componentes de encendedor, la aleación de cobre y tungsteno se puede utilizar para fabricar núcleos de boquillas, confiando en la resistencia a altas temperaturas para garantizar la estabilidad de la atomización del combustible, mientras que la conductividad térmica evita que las boquillas se bloqueen debido al sobrecalentamiento causado por los depósitos de carbón. Además, en componentes auxiliares como las juntas de protección térmica del motor y las carcasas de los sensores de alta temperatura, las aleaciones de cobre y tungsteno también pueden desempeñar un papel a través de estructuras personalizadas (como estructuras compuestas con canales de refrigeración).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3.2.4 Dirección de optimización del rendimiento de la aleación de cobre y tungsteno para aplicaciones en motores aeronáuticos

Para adaptarse mejor a las necesidades de los motores de aviación, la optimización del rendimiento de las aleaciones de tungsteno y cobre debe centrarse en "mejorar las deficiencias" y "reforzar las ventajas". En términos de resistencia a altas temperaturas, se puede agregar una pequeña cantidad de elementos de aleación de alto punto de fusión (como molibdeno y niobio) para refinar las partículas de tungsteno, mejorar la estabilidad a altas temperaturas del esqueleto de tungsteno y reducir el fenómeno de ablandamiento a altas temperaturas a largo plazo; En términos de resistencia a la corrosión, se puede utilizar tecnología de modificación de superficie (como la capa de permeación de plasma y el revestimiento antioxidante) para formar una capa protectora densa en la superficie de la aleación para resistir la corrosión del gas sin afectar la conductividad térmica; En términos de tenacidad mecánica, la resistencia de unión de la interfaz tungsteno-cobre se puede mejorar ajustando la relación tungsteno-cobre (por ejemplo, aumentando moderadamente el contenido de cobre) u optimizando el proceso de sinterización, reduciendo el riesgo de fractura frágil; Para la procesabilidad, se pueden desarrollar procesos de precisión como el moldeo por inyección de polvo para lograr una formación casi neta de estructuras complejas (como canales de microenfriamiento y superficies con formas especiales) para reducir la dificultad del procesamiento posterior; Además, también se pueden desarrollar "aleaciones de tungsteno y cobre con estructura de gradiente": alto contenido de tungsteno en la superficie del componente para mejorar la resistencia a altas temperaturas y al desgaste, alto contenido de cobre en la capa interna para mejorar la conductividad térmica y la tenacidad, y adaptarse a los diferentes requisitos de posición del componente a través de la zonificación de rendimiento. Estas instrucciones de optimización tienen como objetivo trasladar la aleación de cobre y tungsteno de una "aplicación potencial" a una "adaptación real" para cumplir con los estrictos estándares de los motores de aeronaves.

6.3.3 Aplicación en sistemas eléctricos de naves espaciales

El sistema eléctrico de la nave espacial es el "centro neurálgico" que mantiene el funcionamiento normal de la nave espacial. Es responsable de la transmisión de potencia, control de comando y suministro de energía a los equipos. Su fiabilidad está directamente relacionada con el éxito o el fracaso de la misión. En el espacio, el sistema eléctrico enfrenta pruebas ambientales extremas, y la aleación de cobre y tungsteno se ha convertido en un material ideal para componentes centrales como contactores y disyuntores debido a su "excelente conductividad eléctrica y térmica + fuerte resistencia a la erosión del arco", proporcionando un soporte clave para el funcionamiento estable del sistema eléctrico.

6.3.3.1 Entorno de trabajo y requisitos de fiabilidad de los sistemas eléctricos de las naves espaciales

El entorno de trabajo del sistema eléctrico de la nave espacial tiene dos características principales: "extremo" e "inmantenible". Cuando opera en órbita, el sistema debe soportar un entorno de vacío y de alternancia de altas y bajas temperaturas: en el estado de vacío no hay disipación de calor del aire, lo que fácilmente conduce a la acumulación de calor en los componentes; Los cambios repentinos de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperatura harán que el material se expanda y se contraiga, lo que produce fatiga por tensión. Al mismo tiempo, en el espacio hay radiación de partículas de alta energía que puede interferir con la transmisión de señales eléctricas; Además, la fuerte vibración y el impacto durante la fase de lanzamiento pondrán a prueba la integridad estructural de los componentes. En base a estas características ambientales, los requisitos de confiabilidad del sistema están cerca de "cero fallos": los componentes principales necesitan funcionar de manera estable dentro de un ciclo de misión de varios días a varios años sin problemas como mal contacto y erosión de arco; Las conexiones eléctricas deben mantener la conductividad bajo temperaturas y vibraciones extremas, y los componentes de extinción de arco deben desconectar la corriente de manera confiable; Incluso en caso de radiación de partículas o impactos de micrometeoritos, se deben evitar fallos repentinos.

6.3.3.2 Requisitos para las propiedades de los materiales de los componentes principales de los sistemas eléctricos de las naves espaciales

Los requisitos de rendimiento de los materiales para los componentes centrales de los sistemas eléctricos de las naves espaciales se centran en gran medida en la "estabilidad eléctrica" y la "adaptabilidad ambiental". En primer lugar, el material debe tener una excelente conductividad para garantizar una transmisión de corriente eficiente y reducir el calor causado por la resistencia de contacto; En segundo lugar, la resistencia a la erosión del arco es la clave: el arco generado cuando los contactos están encendidos y apagados quemará la superficie, y el material debe resistir la fusión y las salpicaduras de arcos de alta temperatura; Al mismo tiempo, la conductividad térmica debe ser sobresaliente y el calor generado por el arco se puede descargar rápidamente para evitar el sobrecalentamiento de los componentes; Además, el material debe tener buena resistencia al choque térmico y resistencia mecánica, y no se agrietará ni deformará bajo la alternancia de altas y bajas temperaturas y vibraciones; Por último, en un entorno de vacío, el material no debe liberar volátiles, debe tener una fuerte estabilidad química y no reaccionar con el medio circundante.

6.3.3.3 Aplicación de aleación de cobre y tungsteno en contactos de contactores de naves espaciales

El contactor es el "interruptor" que controla el encendido y apagado del circuito en el sistema eléctrico de la nave espacial. Sus contactos son los componentes ejecutivos principales, y la aplicación de aleación de tungsteno y cobre en los contactos coincide con precisión con los requisitos funcionales. Reduce la resistencia de contacto y reduce la generación de calor durante la conducción. En términos de diseño estructural, los contactos a menudo adoptan la forma de una "capa compuesta de tungsteno y cobre": el alto contenido de tungsteno en la superficie mejora la resistencia del arco y el contenido de cobre ligeramente mayor en la capa inferior mejora la soldabilidad con la base.

6.3.3.4 Aplicación de aleación de cobre y tungsteno en componentes de extinción de arco de disyuntores de naves espaciales

Los disyuntores son los "protectores de seguridad" de los sistemas eléctricos de las naves espaciales. Cuando el circuito se sobrecarga o se produce un cortocircuito, hay que desconectar rápidamente la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corriente y extinguir el arco. La aleación de tungsteno y cobre juega un papel clave en los componentes de extinción de arco (como las paredes de la cámara de extinción de arco y los contactos de arco). Al extinguir el arco, la alta temperatura generada por el arco derrite fácilmente la superficie del componente, y la fase de tungsteno de la aleación de tungsteno y cobre puede soportar altas temperaturas y reducir la ablación de la superficie; La alta conductividad térmica de la fase de cobre puede conducir rápidamente el calor del arco a la estructura de enfriamiento, acelerando la extinción del arco. En un entorno de extinción de arco al vacío, la aleación de tungsteno y cobre no libera componentes volátiles, lo que evita la mezcla de gases de impurezas en el arco y garantiza la eficiencia de extinción del arco; Al mismo tiempo, su resistencia al choque térmico evita que los componentes se agrieten durante el cambio repentino de alta temperatura a baja temperatura de vacío, manteniendo la integridad estructural. Este rendimiento permite que los disyuntores desconecten la corriente de manera confiable y protejan la seguridad del circuito en situaciones de emergencia.

6.3.3.5 El papel de la aleación de cobre y tungsteno para garantizar la estabilidad operativa y la vida útil de los sistemas eléctricos de las naves espaciales

La aleación de cobre y tungsteno garantiza directamente la estabilidad operativa y la vida útil del sistema eléctrico de la nave espacial al mejorar la confiabilidad de los componentes centrales. En el contactor, su resistencia a la erosión del arco reduce el desgaste de los contactos, aumenta el número de veces de encendido y apagado de miles a decenas de miles y extiende el ciclo de reemplazo de componentes; La conductividad estable evita el sobrecalentamiento local causado por el calentamiento del contacto y reduce el riesgo de falla del circuito. En el disyuntor, la eficiente extinción de arco y la resistencia a la ablación de la aleación de cobre y tungsteno garantizan que la corriente se pueda cortar rápidamente cuando se sobrecarga para evitar la propagación de fallas; Al mismo tiempo, la resistencia al choque térmico y la resistencia mecánica del material evitan que los componentes fallen en condiciones de altas y bajas temperaturas y vibraciones a largo plazo, adaptándose al ciclo de misión de la nave espacial de varios años. Además, la baja volatilidad de la aleación de cobre y tungsteno evita la contaminación de otros equipos, asegura indirectamente el funcionamiento coordinado de todo el sistema eléctrico y reduce las fallas en cadena causadas por problemas de materiales.

6.3.3. 6 Criterios de selección de materiales y requisitos de control de calidad para aleaciones de cobre y tungsteno en aplicaciones espaciales

Las aleaciones de cobre y tungsteno utilizadas en naves espaciales deben pasar por una estricta selección de materiales y control de calidad para garantizar su confiabilidad. En términos de criterios de selección de materiales, primero debe aclararse la relación de composición: los contactos del contactor deben tener en cuenta tanto la conductividad como la resistencia al arco, y generalmente se seleccionan las series W70-Cu30 a W80-Cu20; Los componentes de extinción de arco requieren un mayor contenido de tungsteno (W85-Cu15 y superior) para mejorar la resistencia a altas temperaturas. Al mismo tiempo, la densidad del material debe ser superior al 98% para evitar que los poros internos se conviertan en puntos débiles de la erosión del arco; La conductividad debe ser $\geq 40\%$ IACS (Estándar Internacional de Cobre Recocido) para garantizar la eficiencia de transmisión de corriente.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El control de calidad recorre todo el proceso: es necesario comprobar la pureza de las materias primas para evitar que las impurezas afecten a la conductividad; El proceso de moldeo utiliza sinterización al vacío + infiltración para reducir la oxidación y la porosidad; El producto terminado debe pasar pruebas ambientales como ciclos de alta y baja temperatura, vibración y golpes para verificar la estabilidad del rendimiento; y finalmente, se requieren pruebas de simulación de erosión por arco para garantizar que la función pueda mantenerse después de miles de ciclos de encendido y apagado. Solo mediante un control de cadena completa las aleaciones de cobre y tungsteno pueden cumplir los requisitos de aplicación de "cero defectos" de las naves espaciales.

6.4 Aplicación en otros campos

Las aleaciones de cobre y tungsteno no se limitan a campos de alta gama como el aeroespacial. Sus características de "resistencia a altas temperaturas y equilibrio de conductividad eléctrica y térmica" y "densidad y resistencia controlables" también muestran un valor único en metalurgia, deportes, tratamiento médico, energía nuclear y otros campos. Al optimizar la composición y el proceso según las necesidades de diferentes escenarios, la aleación de cobre y tungsteno se ha expandido gradualmente desde "materiales especiales" a escenarios más civiles e industriales, convirtiéndose en una opción clave para resolver el cuello de botella de rendimiento de los materiales tradicionales.

6.4.1 Escenarios de aplicación en la industria metalúrgica

Los eslabones de fundición, colada y procesamiento de alta temperatura de la industria metalúrgica tienen requisitos sobresalientes en cuanto a resistencia a altas temperaturas, resistencia al desgaste y conductividad térmica de los materiales. La aleación de tungsteno y cobre juega un papel en múltiples escenarios básicos. Entre los materiales de electrodos para fundición al vacío, la aleación de tungsteno y cobre se puede utilizar como electrodo para fusión por arco debido a su alta conductividad y resistencia a altas temperaturas. La fase de tungsteno resiste la erosión del arco a alta temperatura durante la fundición, y la fase de cobre asegura una transmisión de corriente estable, al tiempo que disipa rápidamente el calor del arco para evitar el sobrecalentamiento del electrodo. En las partes resistentes al desgaste del cristalizador de colada continua, se puede fabricar una aleación de tungsteno y cobre con un alto contenido de tungsteno en el inserto de la pared interna del cristalizador. Su resistencia al desgaste puede resistir la erosión del acero fundido a alta temperatura, y su conductividad térmica ayuda a que el acero fundido se enfríe y se forme rápidamente, reduciendo el fenómeno de pegado del acero. En las inserciones locales de los moldes de fundición a presión de metal, la alta resistencia y la resistencia al choque térmico de la aleación de tungsteno y cobre pueden extender la vida útil del molde y evitar grietas causadas por el calentamiento y enfriamiento repetidos.

6.4.2 Casos de uso en equipamiento deportivo

En el campo de los equipos deportivos, la aplicación de la aleación de cobre y tungsteno se centra en la demanda principal de "combinar alta densidad con absorción de impactos", y los casos de uso se concentran en equipos deportivos de precisión. En el equilibrio de peso del equipo de tiro con arco, la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aleación de cobre y tungsteno con alto contenido de tungsteno puede proporcionar suficiente peso en un volumen pequeño debido a su alta densidad, lo que ayuda a los arqueros a ajustar el centro de gravedad del eje de la flecha y mejorar la estabilidad del disparo; Al mismo tiempo, la presencia de la fase de cobre le da al bloque de peso una cierta tenacidad para evitar romperse en caso de colisión. En el núcleo ponderado de los tacos de billar, la aleación de cobre y tungsteno puede reemplazar los bloques de plomo tradicionales. Al ajustar la relación tungsteno-cobre para controlar la distribución del peso, no solo puede cumplir con los requisitos de transmisión de potencia al golpear la pelota, sino que también evita la contaminación tóxica del plomo. En el componente de peso del mango de las cañas de pescar de alta gama, se combinan su densidad y resistencia a la corrosión: no solo puede mejorar la sensación de agarre a través del peso, sino que también puede resistir el óxido en el entorno acuático y extender la vida útil del equipo. Todos estos casos de uso aprovechan las ventajas de la aleación de cobre y tungsteno (densidad controlable + no toxicidad + buena formabilidad) para reemplazar los materiales de metales pesados tradicionales.

6.4.3 Exploración en el campo de los dispositivos médicos

El campo de los dispositivos médicos tiene requisitos estrictos en cuanto a bioseguridad, precisión y funcionalidad de los materiales. La exploración y aplicación de aleaciones de tungsteno y cobre se centran en escenarios que requieren "una combinación de alta densidad y protección contra la radiación". En los equipos de calibración de dosis para radioterapia, se pueden utilizar aleaciones de tungsteno y cobre con alto contenido de tungsteno como atenuadores de radiación: el tungsteno tiene fuertes capacidades de protección contra rayos X y rayos gamma, y puede controlar con precisión la dosis de penetración de la radiación. La presencia de cobre mejora la precisión del procesamiento del material y puede convertirse en canales de atenuación complejos para garantizar la precisión de la calibración; Al mismo tiempo, su no toxicidad y estabilidad química evitan la contaminación del equipo. En los componentes de posicionamiento de dispositivos médicos intervencionistas (como las marcas de desarrollo de stents vasculares), la alta densidad de las aleaciones de tungsteno y cobre se puede desarrollar claramente sin afectar la flexibilidad del stent. Actualmente, estas aplicaciones aún están en fase exploratoria. El objetivo es mejorar aún más la biocompatibilidad a través del tratamiento de pasivación de la superficie para sentar las bases para aplicaciones clínicas.

6.4.4 Perspectivas de aplicación en el campo de la energía nuclear

El entorno extremo (alta temperatura, radiación, alta presión) en el campo de la energía nuclear requiere una tolerancia extremadamente alta de los materiales. Las aleaciones de tungsteno y cobre han mostrado amplias perspectivas de aplicación con sus características de "resistencia a la radiación de alta temperatura + conductividad térmica estable". En los componentes guía de las barras de control de los reactores nucleares, se pueden utilizar aleaciones de tungsteno y cobre como tubos guía: el tungsteno tiene una fuerte resistencia a la radiación y puede mantener la estabilidad estructural en un entorno de radiación de neutrones. evitar que el tubo guía se deforme debido al sobrecalentamiento y garantizar el movimiento suave de las barras de control; Al mismo tiempo, su resistencia a la corrosión puede resistir la erosión de los refrigerantes del reactor. En los componentes de blindaje de los equipos de tratamiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de residuos nucleares, las aleaciones de tungsteno y cobre con alto contenido de tungsteno se pueden convertir en contenedores de blindaje, utilizando la capacidad de blindaje de radiación del tungsteno para aislar los residuos nucleares, y la fase de cobre mejora el sellado y la procesabilidad del contenedor, lo que facilita la fabricación de estructuras de sellado complejas. En el futuro, con la optimización de la tecnología de recubrimiento resistente a la radiación y los procesos de pulvimetalurgia, se espera que las aleaciones de tungsteno y cobre logren avances en escenarios como componentes de intercambio de calor y carcasas de detectores de radiación de pequeños reactores modulares, convirtiéndose en uno de los materiales clave para la operación segura de la energía nuclear.



CTIA GROUP LTD Aleación de cobre y tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten Copper Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Copper Alloy

Tungsten Copper Alloy is a composite material made from tungsten and copper, typically containing 10% to 50% copper by weight. This alloy combines the outstanding properties of both metals—retaining tungsten’s high-temperature resistance and excellent arc erosion resistance, while benefiting from copper’s superior thermal and electrical conductivity. It delivers exceptional comprehensive performance in high-end fields such as electrical engineering, power systems, electronics, and aerospace. CTIA GROUP LTD offers a wide range of customized tungsten copper alloy solutions, featuring high density, stable performance, and precise processing tailored to customer requirements for components such as electrodes, thermal management parts, and vacuum system elements.

2. Typical Properties of Tungsten Copper Alloy

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm³)	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 Alloys

Power Equipment: Contacts for high-voltage vacuum switches; Conductive parts for circuit breakers; Components for high-power relays and arc-fault interrupters

Electronics and Semiconductor Industry: Heat-dissipating substrates for IGBT modules; Cooling plates for microwave components; Package lids and electronic base plate

Electrical Discharge Machining (EDM): Electrode materials for EDM, especially suitable for machining hard alloy molds; High-precision forming electrodes for fine EDM processes

Aerospace and Defense: High-temperature structural parts such as rocket nozzles and tail cones

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 Tendencia de desarrollo futuro de la aleación de cobre y tungsteno

La aleación de cobre y tungsteno se centra en su optimización continua e innovación en aplicaciones de alto rendimiento, y combina tecnologías emergentes para promover la mejora de su rendimiento y la expansión de aplicaciones. El desarrollo futuro se centrará en nuevas tecnologías de preparación, estrategias de mejora del rendimiento y diseño sostenible para satisfacer las crecientes necesidades de los campos eléctrico, aeroespacial y de nuevas energías.

7.1 Exploración de nuevas tecnologías de preparación de aleación de cobre y tungsteno

tungsteno y cobre tienen como objetivo superar las limitaciones de los procesos tradicionales e introducir métodos de fabricación avanzados para mejorar el control y el rendimiento de la microestructura. Estas tecnologías optimizan la distribución de tungsteno y cobre, reducen los defectos y mejoran la funcionalidad mediante métodos innovadores de procesamiento y conformado de materiales. El desarrollo de nuevas tecnologías de preparación promoverá el uso generalizado de aleaciones en geometrías complejas, componentes de alta precisión y aplicaciones personalizadas.

7.1.1 Aplicaciones potenciales de la tecnología de fabricación aditiva

de fabricación aditiva, como potencial aplicación para la preparación de aleaciones de tungsteno-cobre, brinda la posibilidad de lograr estructuras complejas mediante la deposición de materiales capa a capa. Impulsada por un diseño asistido por computadora, la tecnología utiliza métodos de fusión de lecho de polvo o deposición de energía dirigida para fundir y solidificar polvos de tungsteno y cobre capa por capa para formar piezas de aleación con microestructuras personalizadas. La aplicación potencial radica en su capacidad para controlar con precisión la distribución local de tungsteno y cobre, crear materiales de gradiente funcional y lograr un equilibrio dinámico entre la conductividad y la resistencia a altas temperaturas en diferentes áreas del componente. El proceso permite el diseño de geometrías complejas, como canales de refrigeración internos o estructuras ligeras, para satisfacer los altos requisitos de los equipos aeroespaciales y electrónicos.

Una tecnología de fabricación aditiva también incluye la reducción del desperdicio de material y el acortamiento de los ciclos de producción, así como el conformado directo a través de modelos digitales para satisfacer necesidades de producción de lotes pequeños o personalizadas. En aleaciones de cobre y tungsteno, esta tecnología puede optimizar la morfología del grano y la distribución de fases, mejorar la unión de la interfaz y reducir la porosidad y las áreas no humedecidas en los procesos tradicionales.

Los posibles escenarios de aplicación incluyen disipadores de calor de alto rendimiento, contactos eléctricos de precisión y electrodos de soldadura personalizados, especialmente en componentes que requieren estructuras internas complejas. Los desarrollos futuros deben resolver problemas como la uniformidad de la mezcla de polvo, el control del estrés térmico y la optimización del posprocesamiento para mejorar la confiabilidad y la consistencia de los componentes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.1.2 Perspectivas de otras tecnologías de preparación de vanguardia

Además de la tecnología de fabricación aditiva, las perspectivas de otras tecnologías de preparación de vanguardia ofrecen diversos caminos para el desarrollo futuro de aleaciones de tungsteno y cobre. Estas tecnologías incluyen la nanotecnología, la pulverización de plasma y los métodos de autoensamblaje, que tienen como objetivo mejorar el rendimiento de las aleaciones mediante métodos innovadores de diseño de materiales y procesamiento. La nanotecnología utiliza polvos ultrafinos de tungsteno y cobre para mejorar la uniformidad y la densidad de la microestructura, mejorando potencialmente la conductividad y la resistencia mecánica. La tecnología de pulverización de plasma funde y deposita partículas de tungsteno y cobre a través de plasma de alta velocidad, lo que es adecuado para la preparación rápida de recubrimientos o superficies complejas y es adecuado para aplicaciones resistentes al desgaste y a la corrosión. El método de autoensamblaje utiliza las propiedades químicas o físicas del propio material para regular la distribución de fases a nivel molecular y explorar nuevas estructuras compuestas.

La perspectiva de estas tecnologías de vanguardia radica en su capacidad para superar las limitaciones de la pulvimetalurgia tradicional o los métodos de infiltración de material fundido y proporcionar mayor flexibilidad y funcionalidad. Por ejemplo, la nanotecnología puede lograr tamaños de grano más finos y mejorar la resistencia a la erosión del arco; La pulverización de plasma puede reparar o mejorar rápidamente la superficie de los componentes; y los métodos de autoensamblaje pueden abrir nuevas áreas de diseño de materiales inteligentes. Las direcciones de desarrollo futuras incluyen la combinación de la integración de múltiples tecnologías, como la combinación de nanopulvos y fabricación aditiva, o la sinergia de la pulverización de plasma y el tratamiento de superficies para optimizar la microestructura y el rendimiento. Los desafíos radican en la complejidad del proceso, el control de costos y la viabilidad de aplicaciones a gran escala. El avance de estas tecnologías abrirá nuevas perspectivas de aplicación para las aleaciones de cobre y tungsteno.

7.2 Dirección de investigación para la optimización del rendimiento de las aleaciones de tungsteno y cobre

La aleación de tungsteno y cobre tiene como objetivo mejorar integralmente su conductividad eléctrica, conductividad térmica, resistencia mecánica y durabilidad a través de una exploración en profundidad del diseño del material y la mejora del proceso para satisfacer requisitos de aplicaciones cada vez más complejos. El núcleo de la optimización del rendimiento radica en equilibrar las características del tungsteno y el cobre, ajustar la microestructura y desarrollar soluciones personalizadas para escenarios específicos. La dirección de investigación cubre la mejora del desempeño integral y el fortalecimiento de escenarios de aplicación específicos, enfatizando el papel de los métodos innovadores en la promoción del desarrollo de aleaciones.

7.2.1 Direcciones de investigación para mejorar el desempeño integral

La dirección de investigación de la mejora integral del rendimiento se centra en mejorar simultáneamente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

las múltiples propiedades de las aleaciones de tungsteno y cobre, incluida la conductividad eléctrica, la conductividad térmica, la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión, para lograr una optimización integral del rendimiento. El núcleo de la investigación radica en el control fino de la microestructura, reduciendo los defectos y mejorando la densidad del material mediante la optimización del tamaño del grano, la distribución de fases y la unión de la interfaz. Un método potencial es desarrollar una nueva tecnología de mezcla de polvos para garantizar una distribución uniforme de tungsteno y cobre, mejorar la continuidad de la fase de cobre para mejorar la conductividad eléctrica y térmica, manteniendo al mismo tiempo una estructura estable de la fase de tungsteno para soportar la resistencia mecánica. Las técnicas de mejora de la interfaz, como la introducción de una fase intermedia o la modificación de la superficie, pueden mejorar la adhesión entre el tungsteno y el cobre y reducir el riesgo de desprendimiento.

Otra dirección de investigación es explorar el diseño de compuestos multifásicos, introduciendo aditivos traza o materiales de segunda fase para ajustar la microestructura y equilibrar la resistencia y la tenacidad. La selección de aditivos debe considerar su compatibilidad química con el tungsteno y el cobre para evitar introducir nuevas debilidades. Además, las innovaciones de proceso como la sinterización por etapas o el tratamiento asistido por presión pueden reducir aún más la porosidad y mejorar la estabilidad general del material. Se pueden lograr mejoras en la resistencia a la corrosión y a la oxidación a través del tratamiento de superficies o la tecnología de recubrimiento para proteger la fase de cobre de la erosión ambiental y, al mismo tiempo, conservar la resistencia a altas temperaturas del tungsteno. Las investigaciones futuras también pueden combinar la tecnología de simulación y la inteligencia artificial para predecir la relación entre la microestructura y el rendimiento y optimizar dinámicamente los parámetros de preparación. Los avances en estas direcciones promoverán el desempeño integral de las aleaciones de tungsteno y cobre en una variedad de aplicaciones de alto rendimiento.

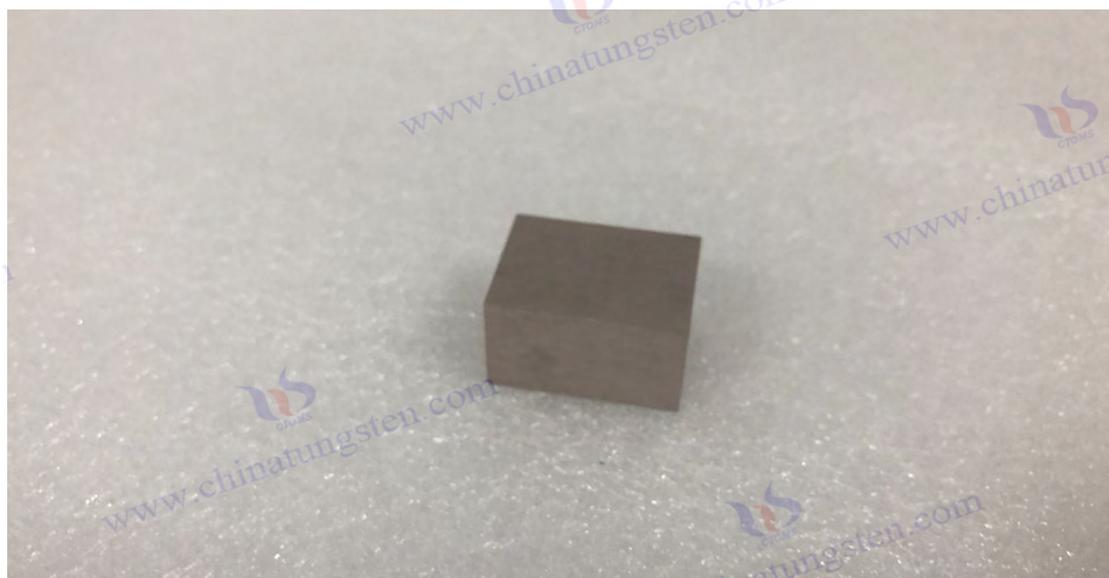
7.2.2 Mejora del rendimiento en escenarios de aplicación específicos

La dirección de investigación de la mejora del rendimiento en escenarios de aplicación específicos tiene como objetivo personalizar y optimizar el rendimiento de las aleaciones de tungsteno y cobre en campos específicos como contactos eléctricos, electrodos de soldadura y componentes aeroespaciales. Para aplicaciones de contacto eléctrico, el objetivo de la mejora es mejorar la conductividad y la resistencia a la erosión del arco. La estructura de red de la fase de cobre se puede optimizar para mejorar la eficiencia de la transmisión de electrones, mientras que se pueden utilizar recubrimientos resistentes a altas temperaturas o modificaciones de la superficie para reducir el daño superficial inducido por el arco. La investigación puede explorar métodos para ajustar dinámicamente el contenido de tungsteno para proporcionar mejor resistencia al desgaste y estabilidad en escenarios de alta corriente.

Para aplicaciones de electrodos de soldadura, la dirección de la mejora del rendimiento es mejorar la resistencia a altas temperaturas y la capacidad antiadherente. El rendimiento antifusión del esqueleto se puede mejorar aumentando la proporción de fase de tungsteno, al tiempo que se optimiza el proceso de sinterización y se reduce la porosidad para mejorar la conducción del calor. El fortalecimiento de la unión de la interfaz también es crucial para evitar que la fase de cobre se adhiera a la pieza de trabajo a alta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperatura. La investigación puede introducir mejoradores de humectación o diseño de estructuras multicapa. Las necesidades de los componentes aeroespaciales, como los disipadores de calor, se centran en la conductividad térmica y el peso ligero. El diseño de gradiente funcional se puede utilizar para lograr una alta distribución de conductividad térmica de la fase de cobre en la superficie, y la fase de tungsteno proporciona soporte estructural en el interior. Las direcciones de investigación incluyen el desarrollo de nuevas tecnologías de moldeo específicas para optimizar la distribución de la porosidad interna. Estos estudios de fortalecimiento deben combinarse con las condiciones reales del escenario de aplicación, como la temperatura, la tensión mecánica y el ciclo de uso, para desarrollar métodos de prueba y verificación específicos. Los desarrollos futuros pueden explorar el diseño de materiales adaptativos, permitiendo que las aleaciones ajusten dinámicamente el rendimiento según los cambios ambientales, o utilizar tecnología de fabricación inteligente para monitorear y optimizar el rendimiento en tiempo real.



CTIA GROUP LTD Aleación de cobre y tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Apéndice

Apéndice A Norma Nacional de China para la aleación de cobre y tungsteno

Las normas nacionales de China para [las aleaciones de cobre y tungsteno](#) son formuladas por la Administración de Normalización de China (SAC) para regular la preparación, el rendimiento y la aplicación de las aleaciones de cobre y tungsteno para garantizar la calidad del producto y la consistencia de la industria. Estas normas cubren principalmente polvos de aleación de cobre y tungsteno, piezas terminadas y métodos de prueba relacionados. Aunque no existe una norma nacional única específica para las aleaciones de tungsteno y cobre, las normas pertinentes pueden derivarse de las especificaciones generales de las aleaciones de tungsteno y cobre. El sistema estándar nacional de China incluye la serie GB/T, algunas de las cuales, como GB/T 26055-2022 (polvo de carburo de tungsteno reconstituido), involucran los requisitos de preparación de materiales a base de tungsteno y pueden usarse como referencia. GB/T 38470-2023 y GB/T 38471-2023 especifican los estándares de calidad para aleaciones de cobre secundarias y materias primas de cobre, respectivamente, y son indirectamente aplicables al control de calidad de la fase de cobre de las aleaciones de cobre y tungsteno. Además, GB/T 5242-2006 y GB/T 5243-2006 proporcionan reglas de inspección y especificaciones de embalaje y transporte para productos de carburo cementado, algunas de las cuales pueden extenderse a la inspección y el transporte de aleaciones de cobre y tungsteno. Estas normas garantizan la homogeneidad del material y la consistencia del rendimiento a través del análisis químico, la determinación de la densidad y la evaluación microestructural.

Las características de las normas chinas son su adaptabilidad a las materias primas y procesos nacionales y su énfasis en la protección del medio ambiente y la supervisión de la calidad. En los últimos años, con el endurecimiento de las políticas de importación de chatarra, como la implementación de las nuevas normas aduaneras en 2023, se han impuesto requisitos más elevados para la pureza y el contenido de impurezas no metálicas de las materias primas de cobre, lo que afecta indirectamente la producción de aleaciones de cobre y tungsteno. El contenido de las normas generalmente incluye requisitos de composición del material, propiedades físicas y tecnología de procesamiento, con el objetivo de satisfacer las necesidades industriales nacionales, como la aplicación de contactos eléctricos y electrodos de soldadura. En el futuro, las normas podrán perfeccionarse aún más para incorporar requisitos de nuevas tecnologías de preparación para adaptarse al progreso tecnológico y a la competencia internacional.

Apéndice B Normas internacionales de aleación de tungsteno y cobre

Las normas internacionales de aleación de cobre y tungsteno son desarrolladas principalmente por la Organización Internacional de Normalización (ISO) y otros organismos de normalización nacionales o regionales para proporcionar un marco de referencia unificado para la cadena de suministro global. Aunque no existe una norma internacional específica para las aleaciones de cobre y tungsteno, se pueden obtener especificaciones relevantes de las normas generales para aleaciones de tungsteno y aleaciones de cobre. La norma ISO 18119 cubre los polvos de aleación de tungsteno utilizados en la producción de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

carburo cementado, proporciona requisitos básicos para la preparación y las propiedades del polvo, y puede utilizarse como base para las materias primas de aleación de tungsteno y cobre. Otras normas internacionales como JIS H 3201 (Norma Industrial Japonesa) especifican las características de los polvos de aleación de tungsteno, algunos de los cuales son aplicables a los compuestos de cobre y tungsteno. Aunque las normas internacionales ASTM y las normas EN no apuntan directamente a las aleaciones de cobre y tungsteno, sus métodos de prueba de materiales metálicos (como pruebas de densidad y dureza) se pueden utilizar para la evaluación del desempeño.

Las características de las normas internacionales son su aplicabilidad transnacional, enfatizando la consistencia material y la conveniencia comercial. Las normas industriales (como ASTM, JIS y DIN) en diferentes países y regiones como Estados Unidos, Japón y Europa han formado un sistema de especificaciones global a través de la asistencia mutua y el reconocimiento mutuo. Las aplicaciones internacionales de las aleaciones de cobre y tungsteno, como las industrias aeroespacial y de embalajes electrónicos, han impulsado a que estas normas se centren en una alta conductividad eléctrica, una alta conductividad térmica y una resistencia a altas temperaturas. Algunos de los principales fabricantes de pólvora también han desarrollado especificaciones internas para complementar las deficiencias de las normas internacionales y garantizar un suministro de alta calidad. Sin embargo, las normas internacionales aún no respaldan plenamente las tecnologías de preparación emergentes, como la fabricación aditiva, y es posible que sea necesario actualizarlas en el futuro para adaptarse a los avances tecnológicos. En general, las normas internacionales proporcionan una orientación importante para el comercio y la aplicación mundial de aleaciones de cobre y tungsteno, pero su implementación específica debe combinarse con las condiciones reales de cada país.

Apéndice C Normas de aleación de cobre y tungsteno en Europa, América, Japón, Corea del Sur y otros países

Las normas de aleación de cobre y tungsteno en Europa, América, Japón, Corea del Sur y otros países son formuladas por sus respectivas agencias de normalización nacionales o regionales para estandarizar las propiedades de los materiales, los procesos de preparación y los requisitos de aplicación para respaldar el comercio global y el desarrollo industrial. Aunque no existe una norma internacional unificada específicamente para las aleaciones de cobre y tungsteno, las especificaciones pertinentes suelen derivarse de las normas generales de las aleaciones de tungsteno, las aleaciones de cobre o los materiales compuestos. A continuación se presenta una descripción general de las normas en los principales países y regiones.

En Europa y Estados Unidos, las normas internacionales ASTM en Estados Unidos y las normas EN en Europa son los principales marcos de referencia. Las normas ASTM como ASTM B702 cubren los requisitos de preparación y rendimiento de los materiales de contacto eléctrico de tungsteno-cobre, que involucran parámetros como densidad, conductividad y dureza, pero no proporcionan especificaciones detalladas para todos los tipos de aleaciones de tungsteno-cobre. Las normas EN se centran principalmente en el cobre y sus aleaciones y son indirectamente aplicables al control de calidad de la fase de cobre de las aleaciones de tungsteno y cobre. Estas normas enfatizan la consistencia de los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

materiales y la repetibilidad de los métodos de prueba, y se utilizan ampliamente en contactos eléctricos y aplicaciones de disipadores de calor. Las normas europeas y americanas tienen altos requisitos de alta conductividad y resistencia a altas temperaturas. Algunas empresas como American Elements y Plansee han formulado especificaciones internas para complementar las deficiencias de las normas generales.

Las normas JIS de Japón (como JIS H 3201) especifican las características de los polvos de aleación de tungsteno, algunos de los cuales son aplicables a los compuestos de tungsteno y cobre, centrándose en la uniformidad del tamaño de las partículas del polvo y la composición química. La aplicación de aleaciones de tungsteno y cobre en la industria japonesa se concentra principalmente en electrodos de mecanizado por electrochispa (EDM) y contactos de interruptores de alto voltaje, y las normas enfatizan la resistencia a la erosión del arco y la conductividad eléctrica. Las normas coreanas están formuladas por las Normas Industriales Coreanas (KS). Especificaciones como KS D 2101 involucran materiales basados en tungsteno y son aplicables a procesos de pulvimetalurgia para aleaciones de tungsteno y cobre. Corea del Sur se centra en la producción de componentes de alta precisión, y las normas tienen requisitos específicos de microestructura y conductividad térmica, lo que refleja sus necesidades en los campos del embalaje electrónico y la industria aeroespacial.

Existen diferencias en los estándares de estos países. Europa y Estados Unidos se centran en la versatilidad y la compatibilidad comercial, mientras que Japón y Corea del Sur prestan más atención a los detalles técnicos de aplicaciones industriales específicas. Los requisitos de rendimiento de la relación de aleaciones de tungsteno y cobre (como WCu 70/30, WCu 80/20) en diferentes estándares pueden variar, pero generalmente requieren alta densidad, baja expansión térmica y excelente conductividad. Los estándares actuales tienen un soporte limitado para tecnologías emergentes como la fabricación aditiva, y es posible que sea necesario actualizarlos en el futuro para adaptarse a los avances tecnológicos. En general, estas normas proporcionan una orientación importante para la cooperación internacional y la aplicación de las aleaciones de cobre y tungsteno, pero su implementación debe combinarse con las características industriales y las necesidades del mercado de cada país.

Apéndice D Glosario de aleaciones de tungsteno y cobre

el término	definición
Aleación de cobre y tungsteno	de tungsteno y cobre mediante pulvimetalurgia o infiltración, combinando alto punto de fusión y conductividad eléctrica.
Metalurgia de polvos	de El proceso de preparación de la aleación mediante la mezcla, prensado y sinterización de polvos metálicos es adecuado para la distribución uniforme de la aleación de cobre y tungsteno.
Infiltración por vacío	por El proceso de infiltración de cobre líquido en el esqueleto de tungsteno en un entorno de vacío se utiliza para preparar una aleación de tungsteno y cobre de alta densidad .
Tamaño del grano	El tamaño promedio de las partículas de tungsteno o cobre en la aleación, lo que afecta la resistencia y la conductividad.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Distribución de fases	Las fases de tungsteno y cobre en la aleación determinan las trayectorias de conducción eléctrica y térmica.
Porosidad	La proporción de huecos sin rellenar en una aleación afecta la densidad y las propiedades mecánicas.
Unión de interfaz	Las fases de tungsteno y cobre afectan la transferencia de carga y la resistencia al pelado.
Conductividad eléctrica	La capacidad de la aleación para transmitir corriente eléctrica está determinada principalmente por la continuidad de la fase de cobre.
Conductividad térmica	La capacidad de la aleación para transferir calor depende de la distribución de la fase de cobre y de la homogeneidad microestructural.
Resistencia a la erosión por arco	La capacidad de la aleación para resistir la ablación por arco a alta temperatura se ve afectada por la estabilidad de la fase de tungsteno y la distribución de los poros.
Sinterización en fase líquida	La densidad de la aleación se mejora mediante el proceso de sinterización a alta temperatura utilizando humectación de fase líquida de cobre y relleno de partículas de tungsteno.
Prensado isostático caliente	La aleación se trata a alta temperatura utilizando presión omnidireccional para reducir la porosidad y mejorar la microestructura.



CTIA GROUP LTD Aleación de cobre y tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

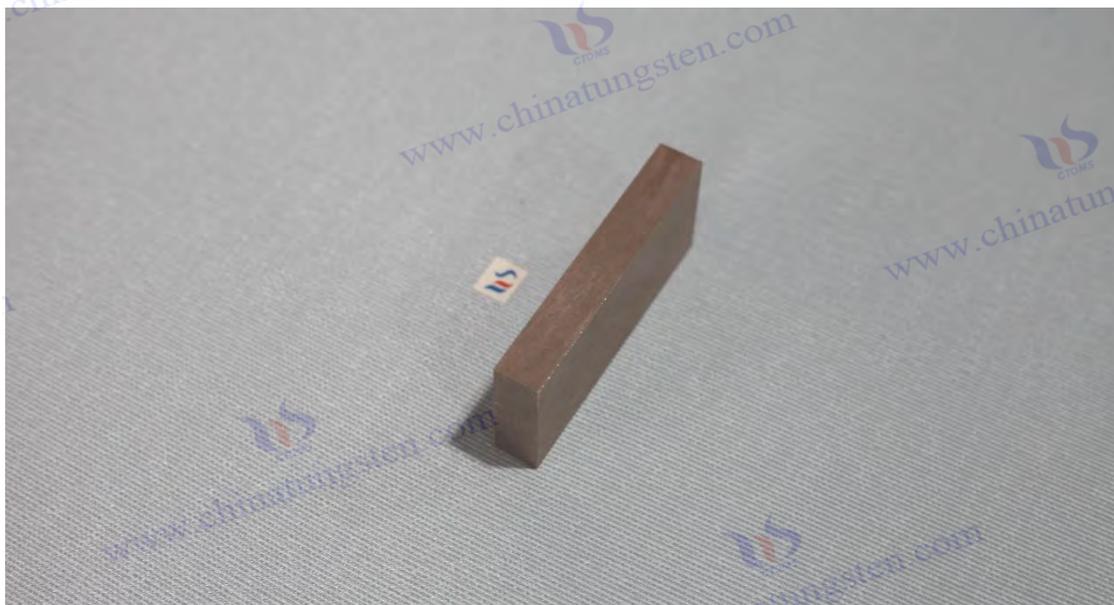
Referencias

Literatura china

- [1] Asociación China de Normalización. (2023). GB/T 26055-2022 Polvo de carburo de tungsteno reconstituido. Pekín: China Standards Press.
- [2] Asociación China de Normalización. (2023). GB/T 38470-2023 Aleaciones secundarias de cobre. Pekín: China Standards Press.
- [3] Asociación China de Normalización. (2023). GB/T 38471-2023 Requisitos de calidad para materias primas de cobre. Pekín: China Standards Press.
- [4] Asociación China de Normalización. (2006). GB/T 5242-2006 Reglas de inspección para productos de carburo cementado. Pekín: China Standards Press.
- [5] Asociación China de Normalización. (2006). GB/T 5243-2006 Especificación para embalaje y transporte de productos de carburo cementado. Pekín: China Standards Press.

Literatura inglesa

- [1] Organización Internacional de Normalización. (2020). ISO 18119: Polvos de aleación de tungsteno para metales duros . Suiza: ISO.
- [2] Comité Japonés de Normas Industriales. (2018). JIS H 3201: Características del polvo de aleación de tungsteno. Tokio: Asociación Japonesa de Normas.
- [3] ASTM Internacional. (2019). ASTM B702: Especificación estándar para material de contacto eléctrico de tungsteno-cobre. Estados Unidos: ASTM.
- [4] Comité Europeo de Normalización. (2017). EN 13601: Cobre y aleaciones de cobre - Varillas. Bruselas: CEN.
- [5] Agencia Coreana de Tecnología y Estándares. (2021). KS D 2101: Especificaciones de pulvimetalurgia para materiales a base de tungsteno. Seúl: KATS.



CTIA GROUP LTD Aleación de cobre y tungsteno

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