

Guía completa de electroerosión por hilo de molibdeno

中钨智造科技有限公司
CTIA GROUP LTD

CTIA GRUPO LTD

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

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

INTRODUCCIÓN A CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, una subsidiaria de propiedad total 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 del 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 que se centra en las industrias de tungsteno, molibdeno y tierras raras. Aprovechando casi tres décadas de profunda experiencia en los campos de tungsteno y molibdeno, CTIA GROUP hereda las excepcionales capacidades de diseño y fabricación de su empresa matriz, servicios superiores y reputación comercial global, convirtiéndose en un proveedor integral de soluciones de aplicaciones en los campos de productos químicos de tungsteno, metales de tungsteno, carburos cementados, aleaciones de alta densidad, molibdeno y aleaciones de molibdeno.

Durante los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha establecido más de 200 sitios web profesionales multilingües de tungsteno y molibdeno que cubren 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 piezas de información, sirviendo a casi 100.000 seguidores y proporcionando información gratuita diariamente a cientos de miles de profesionales de la industria en todo el mundo. Con visitas acumuladas a su grupo de sitios web y cuenta oficial que alcanzan miles de millones de veces, se ha convertido en un centro de información global y autorizado reconocido para las industrias de tungsteno, molibdeno y tierras raras, que brinda noticias multilingües las 24 horas del día, los 7 días de la semana, rendimiento de productos, precios de mercado y servicios de tendencias del mercado.

Sobre la base de la tecnología y la experiencia de CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP se centra en satisfacer las necesidades personalizadas de los clientes. Utilizando la tecnología de IA, diseña y produce de forma colaborativa productos de tungsteno y molibdeno con composiciones químicas y propiedades físicas específicas (como el tamaño de partícula, la densidad, la dureza, la resistencia, las dimensiones y las tolerancias) con los clientes. Ofrece servicios integrados de proceso completo que van desde la apertura de moldes, la producción de prueba hasta el acabado, el embalaje y la logística. Durante los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha proporcionado servicios de investigación y desarrollo, 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. Basándose en esta base, CTIA GROUP profundiza aún más 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, basándose en sus más de 30 años de experiencia en la industria, también han escrito y publicado análisis de conocimientos, 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 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. Adhiriéndose 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 la práctica de producción y las necesidades de los clientes del mercado, ganando elogios generalizados en la industria. Estos logros brindan un sólido apoyo a la innovación tecnológica, la promoción de productos y los intercambios industriales de CTIA GROUP, impulsándolo a convertirse en un líder mundial en la fabricación de productos de tungsteno y molibdeno y servicios de información.



Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

Directorio

Capítulo 1: Introducción

- 1.1 Definición y descripción general de la electroerosión por hilo de molibdeno
- 1.2 Antecedentes técnicos de la electroerosión por hilo
- 1.3 La importancia del alambre de molibdeno en la electroerosión
- 1.4 Importancia de la investigación y la aplicación

Capítulo 2: Características de la electroerosión por hilo de molibdeno

- 2.1 Propiedades químicas de la electroerosión por hilo de molibdeno
 - 2.1.1 Propiedades químicas básicas del elemento molibdeno
 - 2.1.2 Requisitos de pureza
 - 2.1.3 Resistencia a la corrosión
- 2.2 Propiedades físicas de la electroerosión por hilo de molibdeno
 - 2.2.1 Alto punto de fusión
 - 2.2.2 Densidad y dureza
 - 2.2.3 Conductividad eléctrica y térmica
- 2.3 Características mecánicas de la electroerosión por hilo de molibdeno
 - 2.3.1 Resistencia a la tracción
 - 2.3.2 Elongación
 - 2.3.3 Curvatura y uniformidad del diámetro del alambre
- 2.4 Propiedades geométricas de la electroerosión por hilo de molibdeno
 - 2.4.1 Tolerancia del diámetro del alambre
 - 2.4.2 Suavidad y redondez de la superficie
- 2.5 Propiedades termofísicas de la electroerosión por hilo de molibdeno
 - 2.5.1 Estabilidad a alta temperatura
 - 2.5.2 Resistencia a altas temperaturas
- 2.6 Otras características de la electroerosión por hilo de molibdeno
 - 2.6.1 Tratamiento superficial
 - 2.6.2 Resistencia a la abrasión y durabilidad
- 2.7 MSDS de electroerosión por hilo de molibdeno de CTIA GROUP LTD

Capítulo 3: Clasificaciones de la electroerosión por hilo de molibdeno

- 3.1 Alambre de molibdeno de alta eficiencia para electroerosión
- 3.2 Alambre de molibdeno de alta precisión para electroerosión
- 3.3 Alambre de molibdeno para HS-EDM
- 3.4 Alambre de molibdeno para MS-EDM
- 3.5 Alambre de molibdeno especial para electroerosión

Capítulo 4: Proceso de preparación y producción de electroerosión por hilo de molibdeno

- 4.1 Selección de materias primas para la electroerosión por hilo de molibdeno
 - 4.1.1 Materias primas de molibdeno de alta pureza
 - 4.1.2 Dopaje de elementos de tierras raras

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

4.2 Proceso de producción de electroerosión por hilo de molibdeno

- 4.2.1 Metalurgia de polvo de molibdeno
- 4.2.2 Sinterización y forja
- 4.2.3 Proceso de estampación rotativa
- 4.2.4 Proceso de trefilado
- 4.2.5 Tratamiento superficial de electroerosión por hilo de molibdeno
- 4.3 Tecnologías clave de la electroerosión por hilo de molibdeno
 - 4.3.1 Tecnología de troquel de trefilado de alta precisión
 - 4.3.2 Tecnología de control de temperatura y tratamiento térmico
 - 4.3.3 Optimización del proceso de dopaje
- 4.4 Control de calidad de electroerosión por hilo de molibdeno
 - 4.4.1 Control de consistencia del diámetro del alambre
 - 4.4.2 Detección y tratamiento de defectos superficiales
 - 4.4.3 Ensayo de resistencia a la tracción

Capítulo 5: Usos de la electroerosión por hilo de molibdeno

- 5.1 Procesamiento de electroerosión por hilo
 - 5.1.1 Fabricación de moldes
 - 5.1.2 Procesamiento de formas y microestructuras complejas
 - 5.1.3 Procesamiento de piezas de alta precisión
- 5.2 Aplicación de fuente de luz eléctrica
 - 5.2.1 Puertas, ganchos, puntales
 - 5.2.2 Alambre central y cable calefactor
- 5.3 Pulverización térmica
 - 5.3.1 Fortalecimiento y reparación de superficies
 - 5.3.2 Preparación de recubrimientos resistentes al desgaste
- 5.4 Otras aplicaciones industriales
 - 5.4.1 Procesamiento de materiales aeroespaciales
 - 5.4.2 Fabricación de dispositivos médicos
 - 5.4.3 Aplicaciones en la industria electrónica

Capítulo 6: Equipo de producción para electroerosión por hilo de molibdeno

- 6.1 Equipo de preparación de materias primas
 - 6.1.1 Equipo de producción de polvo de molibdeno
 - 6.1.2 Sintering Furnaces
- 6.2 Equipo de trefilado
 - 6.2.1 Máquina de trefilado de alta precisión
 - 6.2.2 Troqueles de dibujo de piedras preciosas
- 6.3 Equipos de tratamiento de superficies
 - 6.3.1 Equipo de lavado cáustico
 - 6.3.2 Equipo de pulido electrolítico
 - 6.3.3 Equipo de recubrimiento en emulsión de grafito
- 6.4 Equipo de tratamiento térmico

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

- 6.4.1 Hornos de tratamiento térmico al vacío
- 6.4.2 Hornos de recocido
- 6.5 Equipos de prueba y control de calidad
- 6.5.1 Instrumento de medición del diámetro del alambre
- 6.5.2 Detector de defectos superficiales
- 6.5.3 Máquina de ensayo de resistencia a la tracción

Capítulo 7: Normas nacionales y extranjeras para la electroerosión por hilo de molibdeno

- 7.1 Normas nacionales para la electroerosión por hilo de molibdeno
 - 7.1.1 GB/T 4182-2017
 - 7.1.2 GB/t 3462-2017
 - 7.1.3 Otros estándares relevantes de la industria
- 7.2 Normas internacionales para la electroerosión por hilo de molibdeno
 - 7.2.1 Especificación estándar ASTM B387 para varillas, alambres y placas de molibdeno y aleaciones de molibdeno
 - 7.2.2 Certificación del Sistema de Gestión de Calidad ISO 9001
 - 7.2.3 Otras normas internacionales para productos de molibdeno
- 7.3 Análisis comparativo estándar de electroerosión por hilo de molibdeno
 - 7.3.1 Diferencias entre normas nacionales y extranjeras
 - 7.3.2 El impacto de las normas en la calidad del producto

Capítulo 8: Métodos de detección de electroerosión por hilo de molibdeno

- 8.1 Pruebas de composición química de electroerosión por hilo de molibdeno
 - 8.1.1 Análisis espectral (ICP-MS)
 - 8.1.2 Pruebas de pureza del molibdeno
- 8.2 Pruebas de propiedades físicas
 - 8.2.1 Medición del diámetro y la tolerancia del alambre
 - 8.2.2 Ensayo de rugosidad superficial
- 8.3 Ensayos de propiedades mecánicas
 - 8.3.1 Ensayo de resistencia a la tracción
 - 8.3.2 Ensayo de elongación y curvatura
- 8.4 Pruebas de propiedades termofísicas
 - 8.4.1 Ensayo de estabilidad a alta temperatura
 - 8.4.2 Ensayos de conductividad eléctrica y térmica
- 8.5 Inspección de la calidad de la superficie
 - 8.5.1 Observación microscópica
 - 8.5.2 Técnicas de ensayos no destructivos
- 8.6 Prueba de adaptabilidad ambiental
 - 8.6.1 Ensayo de resistencia a la corrosión
 - 8.6.2 Ensayo de oxidación a alta temperatura

Capítulo 9: Optimización y mejora técnica de la electroerosión por hilo de molibdeno

- 9.1 Métodos para mejorar la resistencia a la tracción y la durabilidad

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

- 9.2 Optimización del proceso de tratamiento de superficies
- 9.3 Técnicas para reducir la tasa de rotura de cables
- 9.4 Innovaciones para mejorar la eficiencia de corte
- 9.5 Aplicación de la tecnología de producción inteligente
- 9.5.1 Control automático de trefilado
- 9.5.2 Sistema de control de calidad en tiempo real

Capítulo 10: Mercado y desarrollo de la electroerosión por hilo de molibdeno

- 10.1 Visión general del mercado global
 - 10.1.1 Principales países y regiones productores
 - 10.1.2 Análisis del tamaño del mercado y de la demanda
- 10.2 Tendencias de desarrollo
 - 10.2.1 Investigación y desarrollo de diámetros de alambre más delgados
 - 10.2.2 Procesos de producción respetuosos con el medio ambiente
 - 10.2.3 Sustitución de nuevos materiales

Capítulo 11: Instalación y uso de electroerosión por hilo de molibdeno

- 11.1 Pasos de instalación de la electroerosión por hilo
 - 11.1.1 Roscado y fijación de alambre de molibdeno
 - 11.1.2 Control de contacto entre la rueda guía y el bloque conductor
- 11.2 Precauciones de uso
 - 11.2.1 Ajustes de parámetros de corriente y voltaje
 - 11.2.2 Evite la rotura y el deslizamiento del cable
- 11.3 Mantenimiento y sustitución
 - 11.3.1 Ajuste de la tensión del alambre de molibdeno
 - 11.3.2 Limpieza e inspección periódicas

Capítulo 12: Seguridad y protección del medio ambiente de la electroerosión por hilo de molibdeno

- 12.1 Medidas de seguridad durante la producción
 - 12.1.1 Tratamiento de polvo y gases de escape
 - 12.1.2 Normas de seguridad para el funcionamiento de los equipos
- 12.2 Requisitos de protección del medio ambiente
 - 12.2.1 Reciclaje y eliminación de residuos
 - 12.2.2 Tecnologías de producción ecológicas

Capítulo 13: Problemas comunes y soluciones de la electroerosión por hilo de molibdeno

- 13.1 Problemas de rotura de cables y métodos de tratamiento
- 13.2 Soluciones a la precisión de corte insuficiente
- 13.3 Problemas de calidad de la superficie y medidas de mejora
- 13.4 Estrategias de afrontamiento para la pérdida excesiva de alambre

Capítulo 14: Perspectivas futuras de la electroerosión por hilo de molibdeno

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

14.1 Potencial en la fabricación de alta gama

14.2 Desafíos de los nuevos materiales y tecnologías alternativas

14.3 Tendencias en inteligencia y automatización

Apéndice

A. Glosario de términos

B. Referencias

Capítulo 1 Introducción

1.1 Definición y descripción general de la electroerosión por hilo de molibdeno

La electroerosión por hilo de molibdeno es un hilo fino fabricado principalmente con molibdeno de alta pureza (con un contenido de Mo típicamente $\geq 99,3\%$) y se utiliza ampliamente en el mecanizado de descarga eléctrica por hilo (WEDM). Debido a su alto punto de fusión (aproximadamente $2623\text{ }^{\circ}\text{C}$), excelente resistencia a la tracción (que oscila entre 700 y 1200 MPa, según el proceso de fabricación), buena conductividad eléctrica y resistencia a altas temperaturas, el alambre de molibdeno se ha convertido en un material de electrodo comúnmente utilizado en la electroerosión cortada por hilo. Su diámetro generalmente oscila entre 0,08 mm y 0,3 mm, con una tolerancia controlada dentro de $\pm 0,001$ mm para cumplir con los requisitos de mecanizado de alta precisión. Los tratamientos superficiales, como el recubrimiento de emulsión de grafito o el alambre de molibdeno blanco lavado con alcalino, mejoran aún más su rendimiento de descarga y durabilidad.

El alambre de molibdeno se utiliza principalmente en máquinas de electroerosión por hilo rápido, alambre de velocidad media y algunas máquinas de electroerosión por hilo lento de alta precisión. En comparación con el alambre de cobre, el alambre de tungsteno o el alambre de latón, el alambre de molibdeno ofrece ventajas como rentabilidad, alta resistencia al desgaste e idoneidad para múltiples cortes, lo que lo hace especialmente dominante en mercados asiáticos como China y Japón. Según la Asociación Internacional del Molibdeno (IMOA), el molibdeno se considera un metal estratégico y su demanda en aplicaciones industriales sigue creciendo. Como una rama importante de los productos de molibdeno, se estima que el consumo anual mundial de electroerosión por hilo de molibdeno alcanza varios miles de toneladas, particularmente en los campos de fabricación de moldes y procesamiento de piezas de precisión.

La producción de alambre de molibdeno implica procesos de pulvimetalurgia, estampado rotativo, trefilado y tratamiento de superficies. Estos pasos deben garantizar un diámetro de alambre uniforme, un acabado superficial liso y propiedades mecánicas óptimas para satisfacer las demandas de corte de alta velocidad y alta precisión. Para mejorar aún más el rendimiento del alambre de molibdeno, los fabricantes están innovando continuamente, como el desarrollo de alambres dopados con elementos de tierras raras (por ejemplo, lantano, itrio) para mejorar la resistencia a la tracción y la resistencia a la corrosión.

1.2 Antecedentes técnicos de la electroerosión por hilo

La electroerosión por hilo (WEDM) es una tecnología de procesamiento no convencional que funde o vaporiza materiales a altas temperaturas (alrededor de $8000\text{-}12000\text{ }^{\circ}\text{C}$) mediante el uso de una descarga de pulso de alto voltaje entre el alambre del electrodo y la pieza de trabajo para lograr un corte preciso. Esta tecnología se originó en los años 40 del siglo XX, cuando los científicos soviéticos Lazarenko y su esposa propusieron por primera vez el principio del mecanizado por descarga eléctrica (EDM). En la década de 1960, los fabricantes de máquinas herramienta suizos y japoneses, como AgieCharmilles y Fanuc, desarrollaron máquinas de electroerosión por hilo CNC, lo que llevó a la adopción industrial de WEDM.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Existen tres tipos de tecnología de electroerosión por hilo: rápida, media y lenta:

Alambre rápido: principalmente alambre de molibdeno, alta velocidad de línea (8-12 m / s), bajo costo, ampliamente utilizado en el procesamiento de moldes y piezas en China y otros mercados, velocidad de corte de hasta 100-150 mm² / min, pero precisión ligeramente menor (rugosidad superficial Ra 2.5-3.2 μm).

Alambre medio: Combinando las ventajas del alambre rápido y el alambre lento, se utiliza alambre de molibdeno o alambre galvanizado, con mayor precisión y calidad superficial (Ra 1.0-1.6 μm) y una velocidad de corte de aproximadamente 50-100 mm² / min, que se ha vuelto rápidamente popular en el mercado chino en los últimos años.

Alambre lento: Por lo general, se usa latón o alambre recubierto (por ejemplo, alambre de cobre galvanizado), con baja velocidad de alambre (0,2-0,3 m/s) y precisión extremadamente alta (Ra 0,2-0,8 μm), que se encuentra comúnmente en la fabricación de alta gama en Japón y Europa.

Según la Asociación Internacional de Tecnología de Fabricación (AMT), el mercado mundial de máquinas herramienta de electroerosión por hilo tendrá un valor de alrededor de \$ 3 mil millones en 2023 y se espera que crezca a una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 4.5% para 2030, con China representando más del 40% de la cuota de mercado mundial. Debido a su rendimiento y aplicabilidad de alto costo, el alambre de molibdeno se ha convertido en la opción principal de equipos de alambre rápido y alambre mediano, especialmente en las industrias asiáticas de fabricación de moldes y procesamiento de hardware. Los mercados europeos y norteamericanos se inclinan más por las máquinas de alambre lento, que utilizan alambres a base de cobre o compuestos, pero el alambre de molibdeno todavía se usa en el procesamiento de ciertos materiales de alta resistencia.

Los avances en la tecnología de electroerosión por hilo se han beneficiado de las mejoras en la tecnología de control numérico, la fuente de alimentación por pulsos y el control de automatización. Las modernas máquinas de electroerosión por hilo están equipadas con fuentes de alimentación de pulsos de alta frecuencia (hasta 1 MHz) y un sistema inteligente de control de tensión para garantizar un funcionamiento estable del hilo de molibdeno bajo altas cargas y reducir el riesgo de rotura del hilo.

1.3 La importancia del alambre de molibdeno en la electroerosión

La importancia del alambre de molibdeno en la electroerosión por hilo se deriva de sus propiedades físicas y químicas únicas, lo que lo hace ideal para el mecanizado de materiales de alta dureza y formas complejas, como acero para troqueles, carburo y aleaciones de titanio. Estas son las ventajas clave del alambre de molibdeno en WEDM:

Alto punto de fusión y estabilidad térmica: El alto punto de fusión (2623 °C) del alambre de molibdeno le permite soportar la alta temperatura generada por descarga, evitar la fusión o la deformación y garantizar la estabilidad durante el proceso de corte. En comparación con el alambre de cobre (punto de fusión 1083 °C), el alambre de molibdeno es más duradero bajo descarga de alta energía.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Excelente resistencia a la tracción: La resistencia a la tracción del alambre de molibdeno (700-1200 MPa) es mucho mayor que la del alambre de latón (aproximadamente 400-600 MPa), lo que lo hace adecuado para operaciones de alta tensión y reduce la probabilidad de rotura del alambre, especialmente cuando se mecanizan piezas de trabajo gruesas (>100 mm).

Rentable: el precio del alambre de molibdeno es más bajo que el del alambre de tungsteno (aproximadamente 1/3-1/5) y se puede reutilizar (el alambre de molibdeno se puede reciclar cientos de veces en equipos de alambre rápido), lo que reduce significativamente los costos de procesamiento. Según los datos del mercado chino, el costo por metro de alambre de molibdeno es de aproximadamente 0,1-0,3 yuanes, mientras que el alambre de tungsteno es tan alto como 1-2 yuanes.

Adaptabilidad del tratamiento de la superficie: el alambre de molibdeno puede optimizar el rendimiento de la superficie a través del recubrimiento de emulsión de grafito o el tratamiento de lavado con álcali, mejorar la eficiencia de descarga y la resistencia al desgaste, y adaptarse a una variedad de condiciones de trabajo de alambre rápido y alambre medio.

Mecanizado de geometrías complejas: Los diámetros de alambre finos y de alta resistencia (hasta 0,08 mm) del alambre de molibdeno permiten el mecanizado de microestructuras y contornos complejos para satisfacer las necesidades de alta precisión de las industrias aeroespacial, de dispositivos médicos y electrónica.

A nivel mundial, domina la aplicación de alambre de molibdeno en equipos de alambre rápido y alambre medio, especialmente en la industria de fabricación de moldes de China, donde aproximadamente el 80% de las máquinas herramienta de electroerosión por hilo utilizan alambre de molibdeno. Según el informe de la IMOA, el alambre de molibdeno se comporta bien en el mecanizado de aceros para matrices (por ejemplo, Cr12MoV), carburo cementado y superaleaciones, con una precisión de corte de $\pm 0,005$ mm y una rugosidad superficial de Ra 1,0-2,5 μm . Por el contrario, el alambre de latón, comúnmente utilizado para alambre lento, es más adecuado para el mecanizado de ultra alta precisión (Ra < 0,5 μm), pero el costo y la frecuencia de reemplazo de los consumibles son más altos.

Las limitaciones del alambre de molibdeno incluyen que la conductividad es ligeramente inferior a la del alambre a base de cobre (alrededor de 5,5 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ para el molibdeno y 1,7 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ para el latón), puede afectar la eficiencia de descarga y no es tan fino como el alambre recubierto en escenarios de precisión extremadamente alta. Sin embargo, el rendimiento del alambre de molibdeno moderno se ha mejorado significativamente mediante el dopaje de elementos de tierras raras como el lantano o el itrio o la optimización de los parámetros de descarga, compensando parcialmente estas deficiencias.

1.4 Importancia de la investigación y la aplicación

La investigación y aplicación de la electroerosión por hilo de molibdeno es de gran importancia para la industria manufacturera, lo que se refleja en el progreso tecnológico, la mejora industrial y los beneficios económicos.

Impulsando la fabricación de alta precisión: La electroerosión por hilo de molibdeno admite el

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

procesamiento de geometrías complejas y materiales de alta dureza, y se usa ampliamente en la fabricación de moldes (moldes de estampado, moldes de inyección), aeroespacial (álabes de turbina, piezas de aleación de titanio), dispositivos médicos (implantes ortopédicos) y electrónica (moldes de semiconductores). Su alta precisión y estabilidad satisfacen las necesidades de la fabricación moderna para tolerancias a nivel de micras. Por ejemplo, la máquina cortadora de alambre japonesa Fanuc utiliza el procesamiento de alambre de molibdeno con una precisión de $\pm 2 \mu\text{m}$, lo que mejora significativamente la capacidad de fabricación de alta gama.

Costos de producción reducidos: La alta durabilidad y reciclabilidad del alambre de molibdeno reduce el costo de los consumibles para el procesamiento de electroerosión por hilo, especialmente en máquinas de alambre rápido, donde un solo alambre de molibdeno puede cortar miles de metros cuadrados de área de pieza de trabajo. El mercado mundial de fabricación de moldes depende en gran medida de la ventaja de costo del alambre de molibdeno, especialmente en mercados emergentes como China e India.

Promoción de la innovación tecnológica: La investigación y el desarrollo del alambre de molibdeno impulsan los avances en la ciencia de los materiales y los procesos de fabricación. Por ejemplo, el alambre de molibdeno dopado con elementos de tierras raras (como el alambre de aleación La-Mo) mejora la resistencia a la tracción y la resistencia a la oxidación a alta temperatura, lo que prolonga la vida útil. Además, el control inteligente de la tensión y la tecnología de descarga adaptativa optimizan aún más la eficiencia del procesamiento del alambre de molibdeno.

Apoyo a la fabricación ecológica: La alta tasa de reciclaje de residuos en la producción de alambre de molibdeno (hasta más del 90%) está en línea con la tendencia mundial de la fabricación ecológica. En comparación con el alambre a base de cobre de un solo uso, el reciclaje del alambre de molibdeno reduce el desperdicio de recursos.

Impacto global en la industria: La investigación y aplicación de la electroerosión por hilo de molibdeno ha promovido la regionalización de la industria manufacturera mundial. Como el país de recursos de molibdeno más grande del mundo (que representa alrededor del 43% de las reservas mundiales), la industria de alambre de molibdeno de China se ha exportado al sudeste asiático, África y otros lugares bajo la iniciativa "Belt and Road", que ha promovido la mejora industrial regional. La investigación del alambre de molibdeno en Europa y América del Norte se centra en el dopaje de alto rendimiento y la modificación de superficies para proporcionar soporte técnico para la fabricación de alta gama.

En el futuro, las direcciones de investigación de la electroerosión por hilo de molibdeno incluyen un diámetro de alambre más delgado ($< 0,05 \text{ mm}$) para respaldar el micromecanizado, tecnología de recubrimiento compuesto para mejorar la eficiencia de descarga y sistemas de procesamiento inteligentes combinados con inteligencia artificial. La demanda de fabricación de alta precisión y bajo costo en el mercado global continuará impulsando el desarrollo de la tecnología de alambre de molibdeno, especialmente en los campos de vehículos de nueva energía, equipos 5G y dispositivos médicos.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal



CTIA GROUP LTD electroerosión por hilo de molibdeno

Capítulo 2 Características de la electroerosión por hilo de molibdeno

2.1 Propiedades químicas de la electroerosión por hilo de molibdeno

2.1.1 Propiedades químicas básicas del elemento molibdeno

El molibdeno (símbolo del elemento Mo, número atómico 42) es un metal de transición de color blanco plateado que pertenece al sexto elemento del período y tiene propiedades químicas estables. La configuración electrónica del molibdeno es $[Kr] 4d^5 5s^1$, que exhibe una alta inercia química y no reacciona significativamente con el oxígeno, el ácido o el álcali a temperatura ambiente. Los estados de oxidación del molibdeno oscilan entre -2 y +6, más comúnmente +4 y +6, y el óxido de molibdeno (MoO_3) se puede formar a altas temperaturas, pero la superficie del alambre de molibdeno es generalmente estable en un entorno típico de corte de alambre (fluido de trabajo a base de agua o aceite).

La estabilidad química del molibdeno lo hace adecuado para entornos de descarga a alta temperatura (hasta 8000-12000 °C) para la electroerosión por hilo cortado (WEDM). Según la Asociación Internacional del Molibdeno (IMOA), el molibdeno tiene poca o ninguna corrosión en fluidos de trabajo débilmente ácidos o neutros (por ejemplo, agua desionizada, pH 6-8) y es superior a los alambres a base de cobre (que son susceptibles a la corrosión en ambientes ácidos). El molibdeno también es resistente a los aditivos (por ejemplo, emulsionantes, inhibidores de corrosión) en los fluidos comunes de electroerosión, lo que garantiza la estabilidad a largo plazo. Los fabricantes mundiales doparon con trazas de elementos de tierras raras (por ejemplo, lantano, itrio) para mejorar aún más la resistencia a la oxidación del molibdeno y reducir las pérdidas químicas en las descargas a alta temperatura.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

2.1.2 Requisitos de pureza (contenido de Mo \geq 99,3%)

El rendimiento de la electroerosión por hilo de molibdeno depende en gran medida de su pureza, y los estándares de la industria suelen exigir un contenido de molibdeno del \geq 99,3% para garantizar una excelente conductividad eléctrica, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión. El alambre de molibdeno de alta pureza (Mo \geq 99.95%) se usa más ampliamente en equipos de caminar por cable medio de gama alta y caminar por cable lento, lo que puede reducir la inestabilidad de descarga causada por las impurezas. Las impurezas comunes incluyen hierro (Fe), níquel (Ni), carbono (C) y oxígeno (O) y deben controlarse en los siguientes rangos (de acuerdo con GB/T 4182-2017 y ASTM B387):

Fe: \leq 0.005%

Ni: \leq 0.003%

C: \leq 0.01%

O: \leq 0.003%

Las impurezas excesivas pueden provocar defectos en la superficie del alambre de molibdeno, una reducción de la eficiencia de descarga o un mayor riesgo de rotura del cable. Por ejemplo, el exceso de oxígeno puede formar una capa de óxido quebradizo que reduce la resistencia a la tracción; Las impurezas de carbono pueden causar endurecimiento local y afectar la uniformidad del diámetro del alambre. Algunas empresas globales utilizan la fusión al vacío y la tecnología de purificación de múltiples etapas (como la reducción de hidrógeno) para producir alambre de molibdeno de alta pureza, con un contenido de Mo de hasta el 99,97%, lo que mejora significativamente la precisión y la estabilidad del procesamiento. En el mercado chino, algunos alambres de molibdeno económicos tienen un contenido de Mo de entre 99.3 y 99.5%, lo cual es adecuado para equipos de alambre rápido para satisfacer las necesidades de costos de la fabricación de moldes.

2.1.3 Resistencia a la corrosión

La electroerosión por hilo de molibdeno está expuesta a fluidos de trabajo a base de agua o aceite en la electroerosión, y su resistencia a la corrosión afecta directamente la vida útil y la calidad del procesamiento. El molibdeno tiene una excelente resistencia a la corrosión por agua, ácidos débiles (por ejemplo, ácido sulfúrico, solución diluida de ácido clorhídrico) y soluciones alcalinas a temperatura ambiente. Según la prueba de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Corrosión (NACE), el molibdeno tiene una tasa de corrosión de menos de 0,01 mm / año en agua desionizada a pH 4-10, que es mucho mejor que el alambre de latón (alrededor de 0,05-0,1 mm / año). En condiciones de descarga a alta temperatura, se puede formar una capa delgada de óxido (MoO₂ o MoO₃) en la superficie del alambre de molibdeno, pero la oxidación se puede antioxidar de manera efectiva mediante un recubrimiento de emulsión de grafito o lavado con álcali.

En aplicaciones prácticas, la resistencia a la corrosión del alambre de molibdeno se ve afectada por la composición del fluido de trabajo, la frecuencia de descarga y el entorno de procesamiento. Por ejemplo, el alambre de molibdeno de alta pureza utilizado en la máquina cortadora de alambre japonesa Fanuc puede funcionar continuamente durante cientos de horas sin corrosión obvia en un fluido de trabajo que contiene inhibidores de corrosión. Los estudios europeos han demostrado que

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

el alambre de molibdeno dopado con 0,5-1% de lantano (La) tiene aproximadamente un 15% de resistencia a la corrosión en entornos de alta temperatura y alta humedad, porque los elementos de tierras raras reducen la reactividad a la oxidación. La resistencia a la corrosión también está estrechamente relacionada con el tratamiento de la superficie, ya que el alambre de molibdeno recubierto de emulsión de grafito negro es más estable en ambientes húmedos y electrolíticos, mientras que el alambre de molibdeno blanco (lavado con álcali) es más adecuado para el procesamiento de alta precisión, pero debe evitar la exposición a largo plazo a entornos corrosivos.

2.2 Propiedades físicas de la electroerosión por hilo de molibdeno

2.2.1 Alto punto de fusión (alrededor de 2623 °C)

El alto punto de fusión del alambre de molibdeno (2623 °C±10 °C) es su principal ventaja en WEDM, lo que le permite soportar las altas temperaturas generadas por descarga sin fundirse ni deformarse. En comparación con los alambres de latón (punto de fusión aprox. 900-1000 °C) o los alambres de cobre (1083 °C), los alambres de molibdeno mantienen la integridad estructural bajo descargas de pulsos de alta energía (densidades de corriente de hasta 10⁶ A/cm²). Según la Sociedad Japonesa de Electromecanizado (JSPE), la tasa de pérdida superficial del alambre de molibdeno en el entorno transitorio de 8000-10000 °C es de solo 0,001-0,002 mm³/h, que es mucho menor que la del alambre de latón de 0,01-0,02 mm³/h.

El alto punto de fusión también favorece la estabilidad del alambre de molibdeno al mecanizar materiales de alta dureza como el carburo y las aleaciones de titanio. Por ejemplo, al mecanizar carburo cementado WC-Co (dureza HRC 60-70), el alambre de molibdeno mantiene un espacio de descarga estable (aprox. 0,01-0,03 mm) para garantizar la precisión de corte. Los fabricantes mundiales están optimizando la microestructura del alambre de molibdeno, como los granos finos, para mejorar aún más su resistencia al choque térmico y prolongar su vida útil.

2.2.2 Densidad y dureza

La densidad del alambre de molibdeno es de 10,22 g/cm³, que es ligeramente superior a la del cobre (8,96 g/cm³) pero inferior al tungsteno (19,25 g/cm³), lo que le da un equilibrio entre peso y resistencia. El molibdeno tiene una dureza de aproximadamente 5,5 en la escala de Mohs y una dureza Vickers (HV) entre 180-220 y es adecuado para soportar alta tensión (10-20 N) y desgaste mecánico en el corte de alambre. La combinación de densidad y dureza permite que el alambre de molibdeno se cicle a altas velocidades (8-12 m/s) en equipos de marcha rápida sin que sea fácil de romper.

La alta densidad garantiza que el alambre de molibdeno tenga una amplitud de vibración baja bajo control de tensión, lo que reduce el error de ondulación durante el procesamiento. De acuerdo con el estándar nacional chino (GB / T 3462-2017), la dureza del alambre de molibdeno debe ser uniforme y el tamaño del grano debe controlarse a 5-10 μm para evitar la concentración de tensión local.

2.2.3 Conductividad eléctrica y térmica

La conductividad del alambre de molibdeno es de 1,8×10⁷ S/m (la resistividad es de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

aproximadamente $5,5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), que es inferior a la del cobre ($5,9 \times 10^{-7} \text{ S/m}$) pero superior a la del tungsteno ($1,1 \times 10^{-7} \text{ S/m}$), lo que proporciona una eficiencia de descarga moderada en WEDM. Su conductividad térmica de $138 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ es mejor que el tungsteno ($173 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) pero inferior al cobre ($401 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), lo que ayuda a disipar el calor rápidamente y a reducir la acumulación de calor en el punto de descarga.

La conductividad eléctrica tiene un impacto directo en la frecuencia de descarga y la eficiencia de la transferencia de energía. De acuerdo con la investigación del programa de procesamiento suizo GF, la estabilidad de descarga del alambre de molibdeno es mejor que la del alambre de cobre bajo la condición de frecuencia de pulso de 50-200 kHz, especialmente cuando se procesan piezas de trabajo gruesas ($>100 \text{ mm}$), la conductividad térmica del alambre de molibdeno puede reducir efectivamente el riesgo de sobrecalentamiento local. Los fabricantes de máquinas herramienta de todo el mundo han mejorado aún más la eficiencia de descarga del alambre de molibdeno optimizando la fuente de alimentación pulsada (corriente máxima de 50-200 A) con velocidades de corte de hasta $150\text{-}200 \text{ mm}^2/\text{min}$.

2.3 Características mecánicas de la electroerosión por hilo de molibdeno

2.3.1 Resistencia a la tracción

La resistencia máxima a la tracción (UTS) del alambre de molibdeno suele estar entre 700 y 1200 MPa, dependiendo de la pureza, el proceso de dopaje y las condiciones del tratamiento térmico. La alta resistencia a la tracción permite que el alambre de molibdeno resista la alta tensión (10-20 N) en el equipo de corte de alambre y evite la rotura del alambre. En comparación con el alambre de latón (UTS 400-600 MPa), el alambre de molibdeno es más estable cuando se mecanizan materiales de alta dureza o piezas de trabajo gruesas. De acuerdo con ASTM B387, la resistencia a la tracción de la electroerosión por hilo de molibdeno debe cumplir con los siguientes requisitos:

Alambre de molibdeno puro: 700-900 MPa

Alambre de molibdeno dopado (como Mo-La): 900-1200 MPa

Según los datos de investigación y desarrollo de las empresas chinas, la resistencia a la tracción del alambre de molibdeno dopado con lantano al 0,5-1% puede alcanzar los 1100 MPa, y la tasa de rotura del cable se reduce en aproximadamente un 20%. La resistencia a la tracción también está relacionada con el diámetro del alambre, y la resistencia del alambre de molibdeno con un diámetro de alambre fino (0,08-0,12 mm) es mayor, pero se requiere un control de tensión más estricto. Los estudios europeos han demostrado que la optimización del proceso de recocido puede mantener el alambre de molibdeno de baja elongación a alta tensión y prolongar la vida útil.

2.3.2 Elongación (características de baja elongación)

El alargamiento a la rotura de la electroerosión por hilo de molibdeno suele controlarse al 1-3%, que es mucho menor que el del hilo de latón (10-20%). La baja elongación garantiza que el alambre de molibdeno permanezca rígido bajo alta tensión, lo que reduce la deformación y la vibración durante el procesamiento, mejorando así la precisión de corte. Por ejemplo, al mecanizar contornos complejos, como perfiles de dientes de moldes, el bajo alargamiento mantiene estable el espacio de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

descarga con una precisión de $\pm 0,005$ mm.

La baja elongación también presenta desafíos: los alambres de molibdeno son sensibles a las fluctuaciones de tensión, y una tensión demasiado alta puede provocar la rotura del cable. La máquina de electroerosión por hilo global adopta un sistema inteligente de control de tensión, que ajusta la tensión en tiempo real (error $\pm 0,1$ N) a través de servomotores, compensando las limitaciones de la baja elongación del hilo de molibdeno.

2.3.3 Uniformidad de la curvatura y del diámetro del alambre

La curvatura se refiere al grado en que un alambre de molibdeno conserva su curvatura natural después de ser estirado, generalmente expresado en términos de radio de curvatura por metro (ideal > 10 m). La baja tasa de curvatura garantiza un funcionamiento suave del alambre de molibdeno entre la rueda guía y el bloque conductor, lo que reduce el deslizamiento o el desplazamiento. La uniformidad del diámetro del alambre requiere que la desviación del diámetro se controle a $\pm 0,001$ mm para garantizar la consistencia del espacio de descarga. El diámetro del alambre no uniforme puede provocar una descarga inestable y afectar la rugosidad de la superficie.

Los fabricantes globales controlan la uniformidad del diámetro del alambre con troqueles de trefilado de alta precisión, como los troqueles de diamante natural. El control de rizos se basa en procesos de recocido y trefilado, y algunos fabricantes inteligentes utilizan la tecnología de recocido al vacío para reducir la curvatura del alambre de molibdeno a menos de 5 m, lo cual es adecuado para equipos de caminar con alambre medio de alta precisión.

2.4 Propiedades geométricas de la electroerosión por hilo de molibdeno

2.4.1 Tolerancias del diámetro del alambre

El diámetro del alambre de electroerosión por hilo de molibdeno suele ser de 0,08-0,3 mm, y la tolerancia se controla a $\pm 0,001$ mm para garantizar la precisión del espacio de descarga (generalmente 1,5-2 veces el diámetro del alambre). De acuerdo con GB/T 4182-2017, los diámetros de alambre comunes incluyen 0,18 mm (estándar de cable rápido), 0,12-0,15 mm (alambre medio) y 0,08 mm (micromecanizado). Por ejemplo, el espacio de descarga del alambre de molibdeno de 0,18 mm es de aproximadamente 0,27-0,36 mm, y exceder la tolerancia puede provocar fluctuaciones en el espacio y reducir la calidad de la superficie.

El equipo de trefilado de alta precisión del mundo utiliza calibradores láser para monitorear en tiempo real y garantizar que la tolerancia se controle a $\pm 0,0005$ mm. Las pruebas realizadas por Mitsubishi Electric han demostrado que el alambre de molibdeno con una tolerancia de diámetro de alambre de $\pm 0,001$ mm puede lograr una precisión de corte de ± 3 μm , que es adecuada para el mecanizado de piezas aeroespaciales. La elección del diámetro del alambre también está relacionada con el grosor de la pieza de trabajo: 0,2-0,3 mm para piezas gruesas (> 100 mm) y 0,08-0,12 mm para piezas delgadas o micromecanizado.

2.4.2 Suavidad y redondez de la superficie

La rugosidad de la superficie se expresa como valor Ra, y el Ra de la electroerosión por hilo de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

molibdeno generalmente se controla a 0.1-0.3 μm para reducir la concentración de arco y el desgaste de la superficie durante la descarga. La redondez requiere que la sección transversal del alambre de molibdeno esté cerca de la redondez perfecta, con una desviación de $< 0,001$ mm para evitar una descarga desigual. De acuerdo con la norma ISO 1101, los errores de redondez excesivos pueden provocar rayas o quemaduras en la superficie mecanizada.

La suavidad de la superficie se logra mediante trefilado y electropulido de varias pasadas. El control de la redondez se basa en troqueles de trefilado de alta precisión y en la inspección en tiempo real, y los principales fabricantes del mundo utilizan la microscopía de rayos X para inspeccionar las secciones transversales y garantizar que se minimicen los errores de redondez.

2.5 Propiedades termofísicas de la electroerosión por hilo de molibdeno

2.5.1 Estabilidad a altas temperaturas

La estabilidad a alta temperatura se refiere a la capacidad de retención del rendimiento del alambre de molibdeno bajo alta temperatura de descarga (8000-12000 $^{\circ}\text{C}$) y estrés térmico cíclico. El alto punto de fusión y el bajo coeficiente de expansión térmica del alambre de molibdeno (aprox. $5,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) lo hacen menos susceptible a ablandarse o romperse a altas temperaturas transitorias. Según la Sociedad Estadounidense de Materiales (ASM), el rendimiento de fatiga térmica del alambre de molibdeno por debajo de 1000 $^{\circ}\text{C}$ es mejor que el del alambre a base de cobre, y la pérdida de resistencia es del $< 5\%$ después de 1 millón de ciclos de descarga.

La estabilidad a alta temperatura también está relacionada con la estructura del grano. Los filamentos de molibdeno con granos finos (5-10 μm) tienen una mayor resistencia al choque térmico y son adecuados para descargas de pulsos de alta frecuencia (50-200 kHz). Los estudios chinos han demostrado que el alambre de molibdeno dopado con itrio al 0,5% reduce la tasa de oxidación en un 30% a 1500 $^{\circ}\text{C}$, prolongando la vida útil en entornos de alta temperatura. Los fabricantes de máquinas herramienta de todo el mundo han mejorado aún más la estabilidad a alta temperatura del alambre de molibdeno mediante la optimización de los sistemas de enfriamiento de fluidos operativos.

2.5.2 Resistencia a altas temperaturas

La resistencia a altas temperaturas se refiere a la resistencia a la oxidación y al ablandamiento del alambre de molibdeno a altas temperaturas continuas. El alambre de molibdeno es fácil de formar MoO_3 volátil a > 600 $^{\circ}\text{C}$ en el aire, pero en la solución de trabajo a base de agua de WEDM, la reacción de oxidación se inhibe y la resistencia a altas temperaturas es excepcional. Según la investigación de JSPE, el alambre de molibdeno puede funcionar de forma continua hasta 500 horas a 1000 $^{\circ}\text{C}$ en agua desionizada con un contenido de oxígeno de < 10 ppm, y el grosor de la capa de óxido en la superficie es de $< 0,1$ μm .

El alambre de molibdeno dopado con elementos de tierras raras (como Mo-La, Mo-Y) tiene una mejor resistencia a altas temperaturas y la temperatura de oxidación inicial aumenta a más de 800 $^{\circ}\text{C}$. La resistencia a altas temperaturas hace que el alambre de molibdeno sea adecuado para el procesamiento de superaleaciones (como Inconel 718, punto de fusión de aproximadamente

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

1300 °C), que se usa ampliamente en el campo aeroespacial.

2.6 Otras características de la electroerosión por hilo de molibdeno

2.6.1 Tratamiento superficial (recubrimiento de emulsión de grafito negro y alambre de molibdeno blanco)

El tratamiento superficial del hilo de molibdeno EDM se divide en dos tipos: recubrimiento de emulsión de grafito negro y alambre de molibdeno blanco:

Recubrimiento de emulsión de grafito negro: la superficie del alambre de molibdeno está recubierta con emulsión de grafito (lubricante a base de carbono) con un espesor de aproximadamente 1-2 μm , lo que mejora la resistencia al desgaste y la conductividad, y reduce el calor por fricción durante la descarga. El recubrimiento de emulsión de grafito también protege el alambre de molibdeno del fluido de trabajo y prolonga la vida útil (aproximadamente un 20-30% más). En el mercado chino, el 90% del alambre de molibdeno de marcha rápida se procesa de esta manera, que es de bajo costo y adecuada para el procesamiento de alta resistencia.

Alambre de molibdeno blanco: Los óxidos y las impurezas de la superficie se eliminan mediante lavado alcalino o pulido electrolítico, y el valor Ra puede alcanzar los 0,1 μm . El alambre de molibdeno blanco es adecuado para equipos de funcionamiento de alambre medio, reduciendo los residuos de descarga y mejorando la calidad de la superficie (Ra 0.8-1.2 μm). La mayoría de los alambres de molibdeno de alta gama en Europa y Japón son alambres de molibdeno blanco, que son adecuados para el procesamiento de moldes de precisión.

La elección del tratamiento superficial depende de las necesidades de procesamiento. El alambre de molibdeno negro es más adecuado para el corte a alta velocidad de alambre rápido (velocidad 150 mm^2/min), mientras que el alambre de molibdeno blanco funciona bien en el mecanizado de alta precisión (precisión $\pm 2 \mu\text{m}$). Los fabricantes mundiales están optimizando las formulaciones de los recubrimientos, como la adición de nanopartículas de carbono, para mejorar aún más la eficiencia y la durabilidad de la descarga.

2.6.2 Resistencia a la abrasión y durabilidad

La resistencia al desgaste del alambre de molibdeno se refiere a su capacidad para resistir el desgaste de las ruedas guía, los bloques conductores y la descarga. La alta dureza del molibdeno (HV 180-220) y el recubrimiento de emulsión de grafito lo hacen más resistente al desgaste que el alambre de latón (aproximadamente 1/2 de latón).

La durabilidad también está relacionada con la tasa de filamento. Se mejora la resistencia al desgaste y la resistencia a la fatiga del alambre de molibdeno dopado (como Mo-La), y la tasa de rotura del cable se reduce a 0.1-0.5 veces / hora (el alambre de molibdeno puro es de aproximadamente 0.5-1 tiempo / hora). Los estudios globales han demostrado que optimizar el control de la tensión y los caudales de refrigerante puede prolongar aún más la vida útil de los cables de molibdeno.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

2.7 MSDS de electroerosión por hilo de molibdeno de CTIA GROUP LTD

El siguiente es un resumen de la Hoja de datos de seguridad de materiales (MSDS) basada en CTIA GROUP LTD, que cumple con los estándares internacionales de seguridad química (como OSHA y GHS). MSDS proporciona información química, física y de seguridad en el alambre de molibdeno para garantizar la seguridad durante la producción, el transporte y el uso.

Identificación del producto

Nombre del producto: Electroerosión por hilo de molibdeno

Nº CAS: 7439-98-7 (Molibdeno)

Nombre químico: molibdeno (Mo), pureza $\geq 99,3\%$, puede contener trazas de lantano (La) o itrio (Y)

Usos: Alambre de alambre para el procesamiento de electroerosión por hilo

Identificación de peligros

Peligros físicos: el alambre sólido de molibdeno no tiene riesgo de explosión o inflamabilidad; El polvo fino de molibdeno puede causar explosiones de polvo (energía de ignición mínima > 100 mJ). Peligros para la salud: La inhalación prolongada de polvo de molibdeno puede irritar las vías respiratorias, y se recomienda usar una mascarilla protectora (NIOSH N95). No hay peligro obvio por el contacto con la piel.

Peligros ambientales: El molibdeno es un metal de baja toxicidad y los materiales de desecho deben tratarse como desechos peligrosos para evitar la contaminación de los cuerpos de agua.

Composición e información de composición

Molibdeno (Mo): $\geq 99,3\%$

Impurezas: Fe $\leq 0,005\%$, Ni $\leq 0,003\%$, C $\leq 0,01\%$, O $\leq 0,003\%$

Elementos dopados: La o Y $\leq 1\%$ (si corresponde)

Recubrimiento de la superficie: emulsión de grafito (a base de carbono, sustancia no peligrosa)

Medidas de primeros auxilios

Inhalación: Traslade a la persona a un lugar ventilado y busque atención médica inmediata si tiene dificultad para respirar.

Contacto con la piel: Lavar con agua jabonosa sin tratamiento especial.

Contacto con los ojos: Enjuagar con abundante agua durante 15 minutos, y si la irritación persiste, consultar a un médico.

Ingestión accidental: Situación inesperada, busque atención médica de inmediato y proporcione MSDS.

Medidas de protección contra incendios

Medio extintor de incendios: polvo seco o extintor de incendios de dióxido de carbono, el agua está prohibida.

Peligros especiales: El vapor de MoO_3 puede liberarse a altas temperaturas y es necesario usar respiradores de presión positiva.

Tratamiento de emergencia de fugas

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Método: Recoja los filamentos o el polvo de molibdeno dispersos, séllelos en contenedores de desechos peligrosos para evitar el polvo.

Equipo de protección: Use guantes protectores, máscaras contra el polvo y gafas protectoras.

Manipulación y almacenamiento

Precauciones para la operación: para evitar el polvo de molibdeno, el área de operación debe estar bien ventilada. El equipo de procesamiento debe estar equipado con un sistema de recolección de polvo.

Condiciones de almacenamiento: Almacenar en un ambiente seco y ventilado (temperatura < 40°C, humedad <60%), lejos de ácidos fuertes, álcalis fuertes y oxidantes.

Control de la exposición y protección personal

Control de ingeniería: Utilice equipos de escape locales para controlar la concentración de polvo < 10 mg/m³.

Protección personal: Use una mascarilla contra el polvo certificada por NIOSH, guantes protectores y gafas protectoras.

Propiedades fisicoquímicas

Aspecto: alambre metálico de color blanco plateado o alambre recubierto de negro, diámetro 0,08-0,3 mm

Punto de fusión: 2623 °C

Densidad: 10,22 g/cm³

Solubilidad: insoluble en agua, ligeramente soluble en ácidos fuertes.

Estabilidad y reactividad

Estabilidad: Estable a temperatura ambiente y solución de trabajo WEDM, oxidada en aire a alta temperatura (>600 °C).

Sustancias incompatibles: agentes oxidantes fuertes (por ejemplo, ácido nítrico, peróxido de hidrógeno).

Información toxicológica

Toxicidad aguda: DL50 (oral, rata) >5000 mg/kg, baja toxicidad.

Toxicidad crónica: La inhalación a largo plazo de altas concentraciones de polvo de molibdeno puede causar irritación pulmonar y no hay evidencia de carcinogenicidad (clasificación de la IARC: ninguna).

Información ecológica

Impacto ambiental: El alambre de molibdeno en sí no tiene daño directo al medio ambiente, pero los desechos deben reciclarse adecuadamente para evitar que ingresen al cuerpo de agua.

Bioacumulación: No hay riesgo significativo de bioacumulación.

Disposición

Método: De acuerdo con las regulaciones locales, se entregará a una institución profesional para su

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

reciclaje, y se recomienda la fundición a alta temperatura para recuperar el metal de molibdeno.
Precauciones: Está prohibido desecharlo a voluntad para evitar contaminar el suelo o la fuente de agua.

Información de envío

Número ONU: mercancías no peligrosas, sin número ONU.

Requisitos de envío: Utilice un embalaje hermético para evitar fugas de polvo y cumplir con las regulaciones internacionales de envío (por ejemplo, IATA).

Información Regulatoria

Cumple con las regulaciones chinas GB/T 4182-2017, ASTM B387 de EE. UU. y REACH de la UE.

Sujeto a las normas de clasificación química de OSHA (29 CFR 1910.1200) y GHS.

Información adicional

Proveedor: CTIA GROUP LTD

Tel: 0592-5129696/5129595



CTIA GROUP LTD electroerosión por hilo de molibdeno

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Capítulo 3 Clasificación de la electroerosión por hilo de molibdeno

De acuerdo con su rendimiento, escenarios de aplicación y tecnología de procesamiento, la electroerosión por hilo de molibdeno se puede dividir en alambre de molibdeno de alta eficiencia para electroerosión, alambre de molibdeno de alta precisión para electroerosión, electroerosión por hilo de molibdeno de alambre rápido, electroerosión por hilo de molibdeno de alambre medio y alambre de molibdeno especial para electroerosión. Estas clasificaciones reflejan las diversas necesidades del alambre de molibdeno en la electroerosión por hilo cortado (WEDM) y cubren una amplia gama de aplicaciones, desde la producción de alta eficiencia y alto volumen hasta el mecanizado de formas complejas y de alta precisión. La siguiente es una introducción detallada a las características, el proceso de fabricación, el equipo aplicable y las aplicaciones típicas de varios tipos de alambre de molibdeno.

3.1 Alambre de molibdeno de alta eficiencia para electroerosión

El alambre de molibdeno de alta eficiencia para electroerosión está diseñado para el proceso de electroerosión por hilo que persigue una alta velocidad de corte y eficiencia de producción, y es ampliamente utilizado en equipos de alambre rápido, especialmente en las industrias de fabricación de moldes y procesamiento de hardware en China y el sudeste asiático. El alambre de molibdeno de alta eficiencia maximiza la eficiencia de descarga y la durabilidad al optimizar la formulación del material y el tratamiento de la superficie, y es adecuado para el mecanizado de piezas de trabajo con requisitos de precisión media.

3.1.1 Características

Resistencia a la tracción: 800-1000 MPa, lo que garantiza que el cable no se rompa fácilmente a alta tensión (15-20 N) y operación a alta velocidad (velocidad de la línea 8-12 m / s).

Diámetro del alambre: 0,18-0,25 mm se usa comúnmente y la tolerancia es $\pm 0,001$ mm para garantizar un espacio de descarga estable (aproximadamente 0,27-0,375 mm).

Tratamiento de la superficie: El recubrimiento de emulsión de grafito negro (espesor de 1-2 μm) se usa generalmente para mejorar la resistencia al desgaste y la conductividad, y reducir la pérdida de calor de descarga.

Velocidad de corte: hasta 150-200 mm^2/min , aproximadamente un 30% más que el alambre de molibdeno ordinario (100-150 mm^2/min).

Durabilidad: se pueden cortar 6.000-10.000 mm^2 en un solo uso, con un ciclo de vida de 500-800 horas (dependiendo de las condiciones de funcionamiento).

3.1.2 Proceso de fabricación

El alambre de molibdeno de alta eficiencia generalmente está hecho de molibdeno de alta pureza ($\text{Mo} \geq 99.5\%$) como material base, parcialmente dopado con 0.3-0.5% de elementos de tierras raras (como lantano o itrio) para mejorar la resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga térmica. El proceso de producción incluye:

Pulvimetalurgia: se selecciona polvo de molibdeno de alta pureza con un tamaño de partícula de 5-10 μm , y la pieza en bruto se forma mediante prensado isostático.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Estampado rotativo y trefilado: proceso de estirado en caliente y estirado en frío de múltiples pasos, combinado con troqueles de trefilado de diamante, para garantizar la uniformidad del diámetro del alambre.

Recubrimiento de la superficie: El proceso de pulverización o inmersión en emulsión de grafito se utiliza para formar una capa lubricante uniforme a base de carbono y reducir el coeficiente de fricción (aproximadamente 0.1-0.2).

Tratamiento térmico: El recocido al vacío (1000-1200 °C) elimina la tensión interna y mejora la tenacidad y la resistencia al desgaste.

3.1.3 Escenarios de aplicación

El alambre de molibdeno de alta eficiencia se utiliza principalmente en equipos de marcha rápida de alambre para procesar materiales como acero para matrices (como Cr12MoV), acero al carbono y aleación de aluminio. Las aplicaciones típicas incluyen:

Matrices de estampado: como moldes de paneles de automóviles, espesor de corte 20-100 mm, rugosidad de la superficie Ra 2.0-3.2 μm .

Piezas de hardware: como el mecanizado en bruto de engranajes y ruedas dentadas, la eficiencia tiene prioridad sobre la precisión.

Producción en masa: como la fabricación a gran escala de moldes para electrodomésticos y moldes de plástico.

3.2 Alambre de molibdeno de alta precisión para electroerosión

El alambre de molibdeno de alta precisión para EDM está diseñado para el procesamiento de formas complejas y de alta precisión, y es adecuado para alambre mediano y algunos equipos de movimiento de cable lento, y es ampliamente utilizado en las industrias aeroespacial, de equipos médicos y electrónica. En comparación con el alambre de molibdeno de alta eficiencia, enfatiza la precisión de corte y la calidad de la superficie.

3.2.1 Características

Resistencia a la tracción: 900-1200 MPa, adecuado para operaciones de alta tensión (12-18 N), lo que garantiza una baja vibración y una descarga estable.

Diámetro del alambre: 0,08-0,15 mm, tolerancia $\pm 0,0005$ mm, adecuado para microfabricación (espacio de escaneo 0,12-0,225 mm).

Tratamiento de la superficie: el alambre de molibdeno blanco (lavado alcalino o pulido electrolítico) es el principal, y la rugosidad de la superficie es Ra 0,1-0,15 μm , lo que reduce el residuo de descarga.

Precisión de corte: hasta $\pm 2-3$ μm , rugosidad superficial Ra 0,8-1,2 μm .

Durabilidad: 4000-7000 mm² por área de corte, ciclo de vida útil de 300-600 horas.

3.2.2 Proceso de fabricación

El alambre de molibdeno de alta precisión requiere una mayor pureza ($\text{Mo} \geq 99,95\%$) y un control de proceso más estricto:

Materias primas: Fundición al vacío de lingotes de molibdeno, el contenido de impurezas (como Fe,

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Ni) se controla por debajo del 0,001%.

Trefilado de precisión: utilizando molde de diamante natural, estirado en frío de varias pasadas, desviación del diámetro del alambre < 0,0005 mm.

Tratamiento de la superficie: El pulido electrolítico elimina los microdefectos de la superficie y se combina con la deposición química de vapor (CVD) para formar una capa protectora ultrafina.

Tratamiento térmico: recocido multietapa (800-1000 °C), control del tamaño de grano de 3-5 μm, resistencia al choque térmico mejorada.

3.2.3 Escenarios de aplicación

El alambre de molibdeno de alta precisión es adecuado para el procesamiento de moldes y piezas de alta precisión:

Moldes de precisión: como moldes de inyección, moldes de semiconductores, procesamiento de contornos complejos (como formas de microdientes) con una precisión de ± 3 μm.

Aeroespacial: Mecanizado de piezas de aleación de titanio (por ejemplo, Ti-6Al-4V) o superaleaciones (por ejemplo, Inconel 718) con un espesor de 10-50 mm.

Dispositivos médicos: como implantes ortopédicos, procesamiento de microestructuras de herramientas quirúrgicas, rugosidad superficial Ra<1.0 μm.

3.3 Alambre de molibdeno para HS-EDM

El alambre de molibdeno para HS-EDM es un consumible estándar para equipos de alambre rápido (velocidad de línea de 8-12 m / s), que se caracteriza por un rendimiento y reciclaje de alto costo, y es ampliamente utilizado en las industrias de fabricación de moldes y procesamiento de hardware en China y el sudeste asiático.

3.3.1 Características

Resistencia a la tracción: 700-900 MPa, adecuado para tensión media (10-15 N).

Diámetro del alambre: 0,16-0,20 mm (0,18 mm es el más común), tolerancia ± 0,001 mm.

Tratamiento de la superficie: Recubrimiento de emulsión de grafito negro (1-3 μm de espesor) para reducir la fricción y la pérdida de calor.

Velocidad de corte: 100-150 mm²/min, rugosidad superficial Ra 2,5-3,2 μm.

Reciclaje: 500-1000 ciclos, un solo rodillo (2000-4000 m) área de corte de hasta 8000-12000 mm².

3.3.2 Proceso de fabricación

Materia prima: Mo ≥99.3%, el alambre de molibdeno económico a menudo está dopado o una pequeña cantidad dopada (0.1-0.3% La).

Proceso de trefilado: estirado en caliente de múltiples pasos, troquel de trefilado de carburo cementado, el costo es menor pero la precisión es ligeramente inferior.

Tratamiento de la superficie: Emulsión de grafito por inmersión, la uniformidad del recubrimiento se controla a ±0,5 μm.

Recocido: Recocido continuo (900-1100 °C) para equilibrar la resistencia y la tenacidad.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

3.3.3 Escenarios de aplicación

El alambre de molibdeno de alambre rápido se utiliza principalmente para el desbaste sensible a los costos:

Troqueles de estampado: como moldes de electrodomésticos, moldes de autopartes, espesor de procesamiento de 20-80 mm.

Piezas de hardware: como la producción en masa de tuercas y sujetadores.

Piezas que no son de alta precisión: como las piezas de maquinaria de construcción, los requisitos de precisión son $\pm 10-20 \mu\text{m}$.

3.3.4 Mercado global y tendencias tecnológicas

China representa alrededor del 70% del mercado mundial de alambre de marcha rápida y alambre de molibdeno, y el precio es tan bajo como 0,1-0,2 yuanes / metro, que es mucho más bajo que el del alambre de latón (0,5-1 yuanes / metro). Los principales proveedores incluyen China, Jindui City y Ningbo Zhongyuan. Las tendencias tecnológicas incluyen el desarrollo de alambres de molibdeno de bajo costo y alta resistencia (por ejemplo, dopados con Ce) y tecnología de roscado automatizado para reducir los costos de mano de obra. La demanda en los mercados del sudeste asiático (por ejemplo, Vietnam y Tailandia) está creciendo rápidamente, con una CAGR del 5% de 2025 a 2030.

3.4 Alambre de molibdeno para MS-EDM

Combinando la eficiencia del corte rápido de alambre y la precisión del corte lento de alambre, el alambre de molibdeno para MS-EDM es adecuado para equipos de alambre mediano, que se ha popularizado rápidamente en el mercado chino en los últimos años, reemplazando gradualmente algunas aplicaciones de alambre rápido.

3.4.1 Características

Resistencia a la tracción: 900-1100 MPa, adecuado para alta tensión (12-18 N).

Diámetro del alambre: 0,12-0,18 mm, tolerancia $\pm 0,0008 \text{ mm}$.

Tratamiento de la superficie: alambre de molibdeno blanco (Ra 0,1-0,2 μm) o alambre de molibdeno con recubrimiento fino para reducir los residuos de descarga.

Precisión de corte: $\pm 3-5 \mu\text{m}$, rugosidad superficial Ra 1,0-1,6 μm .

Durabilidad: 5000-8000 mm^2 por área de corte, ciclo de vida útil de 400-700 horas.

3.4.2 Proceso de fabricación

Materias primas: Mo $\geq 99,7\%$, a menudo dopado con 0,5-1% de elementos de tierras raras (como La, Y).

Trefilado de precisión: utilizando troquel de diamante, estirado en frío de varias pasadas, desviación del diámetro del alambre $< 0,0008 \text{ mm}$.

Tratamiento superficial: electropulido o recubrimiento de emulsión fina de grafito (espesor $< 1 \mu\text{m}$).

Tratamiento térmico: recocido multietapa al vacío (800-1000°C), tamaño de grano 3-5 μm .

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

3.4.3 Escenarios de aplicación

El alambre de molibdeno para MS-EDM es adecuado para el mecanizado de precisión media y alta eficiencia:

Moldes de precisión: como moldes de fundas de teléfonos móviles, moldes de conectores electrónicos, espesor de procesamiento de 10 a 50 mm.

Piezas de aviación: como piezas estructurales de aleación de aluminio y aleación de titanio, con una precisión de $\pm 5 \mu\text{m}$.

Dispositivos médicos: p. ej., herramientas dentales, implantes en miniatura, rugosidad superficial $Ra < 1,2 \mu\text{m}$.

3.5 Alambre de molibdeno especial para electroerosión

El alambre de molibdeno especial para electroerosión está diseñado para aplicaciones o materiales específicos, como materiales de ultra alta dureza, piezas de trabajo ultradelgadas o procesamiento en entornos extremos, y se personalizan para equipos WEDM de alta gama.

3.5.1 Características

Resistencia a la tracción: 1000-1400 MPa, dopado con tierras raras o elementos de aleación (como La, Y, Zr).

Diámetro del alambre: 0,05-0,12 mm, tolerancia $\pm 0,0005 \text{ mm}$, adecuado para micromecanizado.

Tratamiento de la superficie: alambre de molibdeno blanco o recubrimiento compuesto (por ejemplo, recubrimiento de nanocarbono o cerámica), $Ra 0,05-0,1 \mu\text{m}$.

Precisión de corte: $\pm 1-2 \mu\text{m}$, rugosidad superficial $Ra 0,4-0,8 \mu\text{m}$.

Propiedades especiales: resistencia a la oxidación a alta temperatura ($>800 \text{ }^\circ\text{C}$), resistencia a la corrosión o resistencia a las interferencias electromagnéticas.

3.5.2 Proceso de fabricación

Materias primas: $\text{Mo} \geq 99,97\%$, dopado con 1-2% de tierras raras o metales de transición (como Zr, Ti).

Trefilado de ultraprecisión: troquel de diamante monocristalino con una desviación del diámetro del hilo de $< 0,0003 \text{ mm}$.

Tratamiento de superficies: Deposición química de vapor (CVD) o deposición física de vapor (PVD) para formar recubrimientos funcionales.

Tratamiento térmico: recocido a temperatura ultrabaja ($600-800 \text{ }^\circ\text{C}$), tamaño de grano $2-3 \mu\text{m}$, resistencia mejorada a la fatiga térmica.

3.5.3 Escenarios de aplicación

El alambre especial de molibdeno se utiliza en escenarios exigentes:

Industria de semiconductores: procesamiento de moldes de obleas de silicio y piezas microelectrónicas con una precisión de $\pm 1 \mu\text{m}$.

Aeroespacial: Procesamiento de superaleaciones (por ejemplo, GH4169) o compuestos cerámicos con un espesor de 5-30 mm.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Industria médica: por ejemplo, instrumentos microquirúrgicos, microestructuras de implantes, Ra < 0,5 μm .

Materiales especiales: mecanizado de precisión de compuestos de fibra de carbono y electrodos de grafito.



CTIA GROUP LTD electroerosión por hilo de molibdeno

Capítulo 4 Proceso de preparación y producción de electroerosión por hilo de molibdeno

La preparación de la electroerosión por hilo de molibdeno es un proceso complejo que implica múltiples pasos, desde la selección de la materia prima hasta el mecanizado de precisión, lo que garantiza que el hilo de molibdeno tenga una excelente estabilidad a altas temperaturas, resistencia a la tracción y calidad de la superficie para cumplir con los requisitos de alta precisión y alta eficiencia de la electroerosión por hilo cortado por hilo (WEDM). Este capítulo detalla la selección de materias primas, el proceso de producción, las tecnologías clave y las medidas de control de calidad de la electroerosión por hilo de molibdeno, destacando la importancia de la aplicación de tecnología de fabricación avanzada y la optimización de procesos a escala global.

4.1 Selección de materias primas para la electroerosión por hilo de molibdeno

La selección de materias primas es la base para la preparación de la electroerosión por hilo de molibdeno, lo que afecta directamente su estabilidad química, propiedades mecánicas y propiedades de procesamiento. La electroerosión por hilo de molibdeno se basa principalmente en molibdeno de alta pureza y se dopa con trazas de tierras raras de acuerdo con los requisitos de rendimiento para optimizar su rendimiento en entornos de descarga a alta temperatura.

4.1.1 Materias primas de molibdeno de alta pureza

La producción de electroerosión por hilo de molibdeno comienza con la selección de materias primas de molibdeno de alta pureza, generalmente disponibles en forma de polvo de molibdeno o

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

lingotes de molibdeno. El molibdeno es un metal de transición de color blanco plateado con un alto punto de fusión y una excelente estabilidad química, lo que lo hace adecuado para el duro entorno de las descargas transitorias a alta temperatura en WEDM. La materia prima para la producción de molibdeno de alta pureza se extrae primero del concentrado de molibdeno (principalmente MoS_2), que se convierte en óxido de molibdeno (MoO_3) mediante tostado, y luego la reducción de varias etapas en una atmósfera de hidrógeno para generar polvo de molibdeno de alta pureza. El proceso de reducción requiere un control estricto de la temperatura y la atmósfera para eliminar impurezas como el oxígeno y el azufre para garantizar que la pureza del polvo de molibdeno cumpla con los requisitos de la industria.

La uniformidad del tamaño de partícula y la pureza química del polvo de molibdeno de alta pureza son críticas para los procesos posteriores. Las partículas finas y uniformes de polvo de molibdeno ayudan a formar una pieza en bruto densa, lo que reduce la porosidad y los defectos durante el proceso de sinterización. El fabricante líder mundial utiliza tecnologías de secado por pulverización y esferoidización por plasma para optimizar la morfología de las partículas y la fluidez de los polvos de molibdeno. Además, las impurezas como el carbono, el hierro y el níquel deben controlarse durante el proceso de producción para evitar afectar la conductividad y las propiedades mecánicas del alambre de molibdeno. La alta calidad del polvo de molibdeno forma la base para el posterior proceso de sinterización y estirado, lo que garantiza que el alambre de molibdeno tenga un rendimiento de descarga estable y durabilidad en WEDM.

4.1.2 Dopaje de tierras raras (por ejemplo, lantano, itrio)

Para mejorar la resistencia a la tracción, la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la oxidación de la electroerosión por hilo de molibdeno, los fabricantes a menudo dopan la matriz de molibdeno con trazas de elementos de tierras raras como lantano (La), itrio (Y) o cerio (Ce). El dopaje de tierras raras mejora la estabilidad del molibdeno en entornos de descarga de alta resistencia y alta temperatura al cambiar su estructura cristalina y sus propiedades microscópicas. Por ejemplo, el lantano puede refinar el grano de molibdeno, aumentar la resistencia de los límites de grano y reducir el deslizamiento intergranular a altas temperaturas; El itrio puede mejorar la resistencia a la oxidación y ralentizar la pérdida por oxidación de la superficie del alambre de molibdeno durante el proceso de descarga.

El proceso de dopaje generalmente se lleva a cabo en la etapa de preparación o sinterización de polvo de molibdeno. Un método común es mezclar óxidos de tierras raras (por ejemplo, La_2O_3 , Y_2O_3) con polvo de molibdeno, que se distribuye uniformemente mediante molienda de bolas o mezcla húmeda. Otro método consiste en introducir elementos de tierras raras en la matriz de molibdeno mediante coprecipitación química para formar una solución sólida homogénea o una fase difusa. Los fabricantes mundiales han desarrollado alambres de molibdeno de alto rendimiento con un control preciso de las proporciones y distribuciones de dopaje, mejorando significativamente su rendimiento en equipos de alimentación de alambre medio de alta precisión. El dopaje de tierras raras también debe evitarse en exceso para evitar la formación de fases frágiles o afectar la suavidad del proceso de trefilado.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

4.2 Proceso de producción de electroerosión por hilo de molibdeno

El proceso de producción de alambre de electroerosión por hilo incluye pulvimetalurgia de molibdeno, sinterización y forja, estampado rotativo, trefilado y tratamiento de superficies, cada paso del cual debe controlarse con precisión para garantizar que el rendimiento del alambre de molibdeno cumpla con los requisitos de WEDM. A continuación se describen en detalle los aspectos técnicos destacados y las prácticas globales para cada paso del proceso.

4.2.1 Pulvimetalurgia de molibdeno

La metalurgia del polvo de molibdeno es el punto de partida para la preparación de piezas en bruto de alambre de molibdeno, cuyo objetivo es convertir el polvo de molibdeno de alta pureza en varillas densas de molibdeno o piezas en blanco de molibdeno. El proceso comienza con el prensado del polvo de molibdeno, que generalmente se presiona en una pieza en bruto cilíndrica a alta presión (100-200 MPa) utilizando la tecnología de prensado isostático en frío (CIP). El prensado isostático en frío garantiza una densidad uniforme de palanquilla y reduce la porosidad interna. Posteriormente, la palanquilla se sinteriza previamente en un entorno de hidrógeno o vacío a una temperatura controlada en un rango bajo (alrededor de 1000-1200 °C) para eliminar las impurezas volátiles y mejorar la resistencia de la palanquilla.

La clave de la metalurgia del polvo de molibdeno es controlar el tamaño de partícula y el proceso de compactación del polvo. Las partículas finas de polvo de molibdeno (de 5 a 10 µm de tamaño) contribuyen a la formación de blancos de alta densidad, pero los polvos demasiado finos pueden provocar un flujo deficiente y afectar la uniformidad de la compresión. Los fabricantes globales garantizan una microestructura homogénea de la palanquilla optimizando el proceso de cribado y mezcla de polvo. Además, se debe evitar la contaminación del aire durante el proceso de prensado para evitar la oxidación o la formación de porosidad, lo que puede conllevar el riesgo de rotura del alambre en el estirado posterior.

4.2.2 Sinterización y forja

La sinterización es un paso crítico en la conversión de piezas en bruto prensadas en varillas de molibdeno de alta densidad, generalmente en un horno de protección de hidrógeno o vacío a alta temperatura. La temperatura de sinterización aumenta gradualmente hasta 1800-2000 °C, lo que permite que las partículas de molibdeno se combinen para formar una estructura metálica densa. Durante el proceso de sinterización, la velocidad de calentamiento y el tiempo de retención deben controlarse para evitar el crecimiento excesivo de granos o la formación de grietas. La densidad de las varillas de molibdeno sinterizado de alta calidad está cerca del valor teórico (10,22 g/cm³) y la porosidad interna es inferior al 1%, lo que proporciona una base sólida para la forja posterior.

La forja mejora aún más la densidad y las propiedades mecánicas de las varillas de molibdeno, generalmente utilizando técnicas de forja en caliente o forja en frío. La forja en caliente se lleva a cabo a 1200-1500 °C, y la varilla de molibdeno se deforma plásticamente mediante martilleo o prensado, refinando los granos y eliminando defectos menores. Las principales empresas del mundo utilizan un proceso de forja de varias etapas, combinado con un control preciso de la temperatura, para garantizar que la estructura cristalina de las varillas de molibdeno sea homogénea y que la

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

resistencia a la tracción y la tenacidad sean óptimas. La varilla de molibdeno forjado suele tener entre 10 y 20 mm de diámetro y está lista para el posterior estampado rotativo y trefilado.

4.2.3 Proceso de estampación rotativa

La forja rotativa es un paso clave en el procesamiento de varillas de molibdeno en piezas en bruto delgadas de alambre de molibdeno, y el equipo de forja rotativa aplica la presión radial sobre las varillas de molibdeno para reducir gradualmente su diámetro. El estampado rotativo se realiza a altas temperaturas (1000-1300 °C) combinado con protección de hidrógeno contra la oxidación. El equipo de forja rotativa está equipado con múltiples juegos de troqueles de alta precisión, y el diámetro de la varilla de molibdeno se reduce gradualmente de 10-20 mm a 1-3 mm para formar una pieza en bruto de alambre grueso adecuada para el trefilado.

En el corazón del proceso de estampación rotativa se encuentra el control de la tasa de deformación y el gradiente de temperatura. La deformación rápida puede provocar grietas en la superficie de la varilla de molibdeno, mientras que una temperatura demasiado alta puede causar granos gruesos y reducir la resistencia. Los fabricantes de todo el mundo logran un control preciso con equipos de estampado rotativo automatizados para garantizar la redondez y la calidad de la superficie de las piezas en bruto de alambre grueso. El estampado rotativo también puede mejorar la estructura cristalina fibrosa del molibdeno, mejorar la resistencia a la tracción y la tenacidad, y sentar las bases para el proceso de trefilado posterior.

4.2.4 Proceso de trefilado (trefilado en frío y trefilado en caliente)

El proceso de trefilado dibuja el alambre grueso en blanco después de la forja rotativa en el diámetro final del alambre (0,08-0,3 mm) de la electroerosión por hilo de molibdeno, que se divide en dos formas: trefilado en caliente y estirado en frío. El trefilado térmico se lleva a cabo a 800-1000 °C y la ductilidad del alambre de molibdeno se mantiene mediante un horno de calentamiento, que es adecuado para grandes deformaciones en la etapa inicial. El estirado en frío se lleva a cabo a temperatura ambiente o baja temperatura (<200 °C), y el diámetro del alambre se reduce gradualmente mediante el trefilado de varias pasadas, que es adecuado para el moldeo de alta precisión.

En el proceso de trefilado se utilizan troqueles de trefilado de alta precisión (generalmente diamante natural o diamante policristalino) para garantizar la uniformidad del diámetro del alambre y la suavidad de la superficie. Los lubricantes como la emulsión de grafito o los lubricantes a base de aceite se utilizan para reducir la fricción y evitar arañazos en la superficie del alambre de molibdeno. Los fabricantes mundiales utilizan un proceso de trefilado de varias etapas combinado con recocido intermedio (600-800 °C) para aliviar la tensión y garantizar las propiedades mecánicas y la precisión geométrica del alambre de molibdeno. El proceso de estirado en frío es particularmente crítico para refinar los granos y mejorar la resistencia a la tracción y las características de baja elongación del alambre de molibdeno.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

4.2.5 Tratamiento superficial de electroerosión por hilo de molibdeno (recubrimiento de emulsión de grafito, lavado con álcalis, pulido electrolítico)

Los tratamientos superficiales optimizan el rendimiento de descarga, la resistencia a la abrasión y la corrosión del alambre de molibdeno, los métodos comunes incluyen el recubrimiento de emulsión de grafito, el lavado cáustico y el pulido electrolítico:

Recubrimiento de emulsión de grafito: el alambre de molibdeno se sumerge o rocía con emulsión de grafito a base de carbono para formar una capa lubricante negra de 1-3 μm de espesor, que mejora la conductividad eléctrica y la resistencia al desgaste, y reduce el calor por fricción durante la descarga. El recubrimiento de emulsión de grafito es adecuado para el alambre de molibdeno de marcha rápida, que se usa ampliamente en el procesamiento de moldes en el mercado chino.

Lavado cáustico: use una solución de hidróxido de sodio o hidróxido de potasio para limpiar la superficie del alambre de molibdeno para eliminar óxidos e impurezas y formar un alambre de molibdeno blanco brillante. La rugosidad de la superficie del alambre de molibdeno después del lavado con álcali es baja, lo que es adecuado para equipos de caminata de alambre medio de alta precisión.

Pulido electrolítico: La superficie del alambre de molibdeno se alisa aún más mediante una reacción electroquímica para lograr un efecto espejo (Ra 0,1-0,15 μm), lo que reduce el residuo de descarga y lo hace adecuado para el mecanizado de precisión. Este proceso es comúnmente utilizado por fabricantes europeos y japoneses para producir alambre de molibdeno de alta gama.

El tratamiento de la superficie debe seleccionarse de acuerdo con el uso de alambre de molibdeno. Por ejemplo, el alambre de molibdeno recubierto de emulsión de grafito es adecuado para el corte a alta velocidad, mientras que el alambre de molibdeno blanco lavado con álcali o pulido electrolíticamente se utiliza para el mecanizado de alta precisión. Las empresas globales automatizan los equipos de recubrimiento y pulido para garantizar la uniformidad y la consistencia en el tratamiento de superficies.

4.3 Tecnologías clave de electroerosión por hilo de molibdeno

El rendimiento de la electroerosión por hilo de molibdeno se basa en la sinergia de varias tecnologías clave, como los troqueles de trefilado de alta precisión, el control de la temperatura y el tratamiento térmico, y la optimización del proceso de dopaje. Estas tecnologías garantizan una alta precisión y estabilidad del alambre de molibdeno en WEDM.

4.3.1 Tecnología de troquel de trefilado de alta precisión

Los troqueles de trefilado de alta precisión son fundamentales para lograr la uniformidad del diámetro del alambre y la calidad de la superficie del alambre de molibdeno. Las matrices de diamante natural o diamante policristalino (PCD) son ampliamente utilizadas debido a su alta dureza y resistencia al desgaste. La precisión de la apertura del troquel de trefilado debe controlarse a nivel de micras, y el acabado de la superficie del orificio del troquel es alto para evitar arañazos o deformaciones en la superficie del alambre de molibdeno. El fabricante mundial utiliza el procesamiento láser y la tecnología de rectificado de ultraprecisión para fabricar troqueles de trefilado que garantizan una desviación del diámetro del agujero de menos de 0,5 μm .

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

El diseño del troquel de trefilado también debe considerar la expansión térmica y la distribución de la tensión del alambre de molibdeno. El ángulo del cono y el área de lubricación del orificio del troquel deben optimizarse para reducir el calor por fricción y la concentración de tensión durante el proceso de trefilado. El proceso de trefilado de varias pasadas combinado con la supervisión en tiempo real (por ejemplo, un calibrador láser) garantiza la consistencia y la redondez del diámetro del alambre de molibdeno y cumple con los requisitos de WEDM de alta precisión.

4.3.2 Tecnología de control de temperatura y tratamiento térmico

El control de temperatura se lleva a cabo a través de la sinterización, el estampado, el trefilado y el tratamiento superficial de la preparación del alambre de molibdeno. La sinterización y el estampado rotativo se llevan a cabo bajo vacío o protección de hidrógeno, y la temperatura se controla con precisión en el rango de ± 10 °C para evitar la oxidación o los granos gruesos. El tratamiento térmico (recocido) es un paso clave para eliminar la tensión interna del alambre de molibdeno, optimizar la estructura cristalina y equilibrar la resistencia y la tenacidad mediante el calentamiento y el enfriamiento lento a 600-1000 °C.

Los fabricantes de todo el mundo utilizan hornos de recocido al vacío u hornos de tratamiento térmico continuo para garantizar la uniformidad de la temperatura. El tratamiento térmico también debe ajustarse de acuerdo con el tipo de alambre de molibdeno, por ejemplo, el alambre de molibdeno de alta eficiencia está sesgado hacia el recocido de alta tenacidad, y el alambre de molibdeno de alta precisión necesita refinar el grano para mejorar la resistencia.

4.3.3 Optimización del proceso de dopaje

Los procesos de dopaje de tierras raras (por ejemplo, lantano, itrio) mejoran la resistencia a la tracción y la resistencia a altas temperaturas del molibdeno al cambiar su microestructura. El proceso de dopaje debe garantizar que los elementos de tierras raras se distribuyan uniformemente y se evite la segregación local. Los métodos comunes incluyen:

Dopaje en polvo: Los óxidos de tierras raras se agregan en la etapa de preparación del polvo de molibdeno y se logra una mezcla homogénea mediante molienda de bolas de alta energía.

Dopaje en fase líquida: Los elementos de tierras raras se introducen en la matriz de molibdeno a través de la coprecipitación química para formar una fase difusa a nanoescala.

Dopaje en fase de vapor: Introducción de elementos de tierras raras por deposición de vapor durante la fase de sinterización o tratamiento térmico.

4.4 Control de calidad de la electroerosión por hilo de molibdeno

El control de calidad es la clave para garantizar la consistencia y confiabilidad del rendimiento del alambre de electroerosión por hilo, cubriendo la consistencia del diámetro del alambre, la detección de defectos en la superficie y las pruebas de resistencia a la tracción. Los fabricantes globales se aseguran de que el alambre de molibdeno cumpla con los estrictos requisitos de WEDM a través de tecnología de inspección avanzada y sistemas automatizados.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

4.4.1 Control de la consistencia del diámetro del alambre

La consistencia del diámetro del alambre es el índice de calidad central de la electroerosión por hilo de molibdeno, que afecta directamente el espacio de descarga y la precisión del mecanizado. Durante el proceso de producción, el diámetro del alambre de molibdeno se monitorea en tiempo real mediante un calibrador láser, y los parámetros de dibujo se ajustan en combinación con un sistema de retroalimentación automática. La inspección periódica y el reemplazo de los troqueles de trefilado garantizan la precisión de los orificios del troquel y evitan desviaciones del diámetro del alambre. La empresa líder mundial utiliza la tecnología de medición láser multipunto para detectar cambios en la redondez y el diámetro de los alambres de molibdeno en tiempo real, lo que garantiza una consistencia a nivel de micras.

Además, la consistencia del diámetro del alambre debe ser estable en todo el carrete de alambre de molibdeno (2000-4000 m). Al optimizar la velocidad de estirado y la formulación del lubricante, el fabricante reduce las fluctuaciones del diámetro del alambre y garantiza un rendimiento estable del alambre de molibdeno a altas velocidades y múltiples ciclos.

4.4.2 Detección y tratamiento de defectos superficiales

Los defectos de la superficie (por ejemplo, arañazos, grietas, capas de óxido) pueden reducir la eficiencia de descarga y la durabilidad del alambre de molibdeno. El control de calidad utiliza una variedad de técnicas de ensayos no destructivos:

Microscopio óptico: compruebe los arañazos de la superficie y la uniformidad del recubrimiento con un aumento de 100-500x.

Pruebas de corrientes de Foucault: Detecta microfisuras internas y áreas no uniformes, adecuadas para la producción continua.

Microscopía electrónica de barrido (SEM): analiza la microestructura de la superficie para identificar defectos a nanoescala.

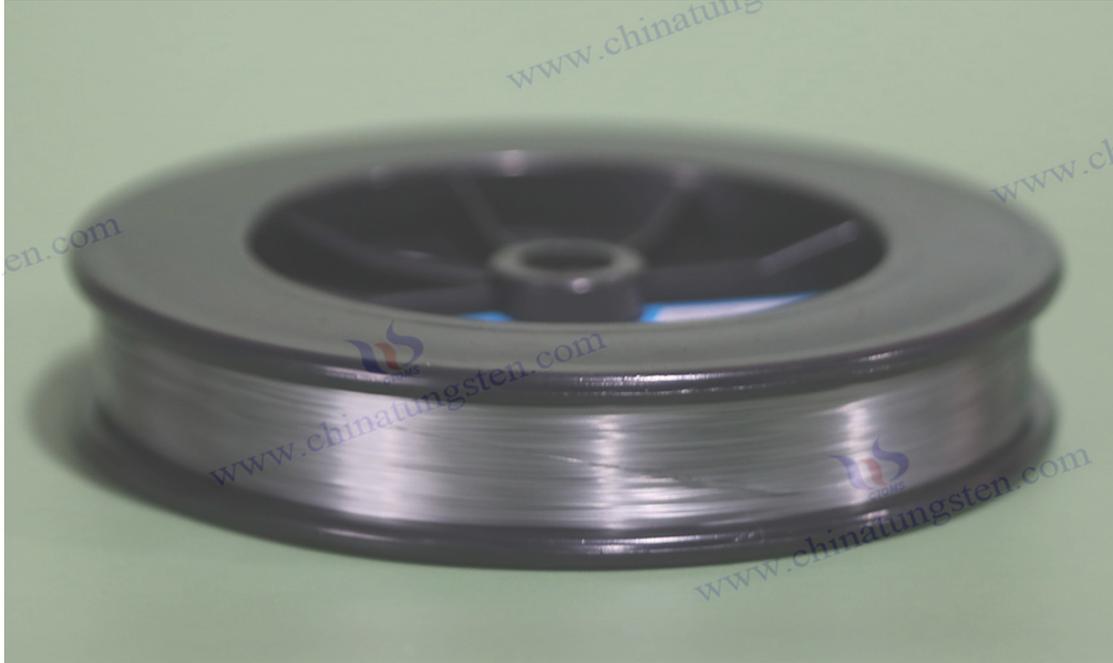
El manejo de defectos incluye el repulido o el rechazo de segmentos no conformes. China Xiamen Tungsten Co., Ltd. identifica y rechaza los defectos superficiales en tiempo real a través de un sistema de inspección visual automatizado, con una tasa de aprobación de más del 99,5%. Los fabricantes europeos combinan microscopios de rayos X para detectar defectos internos y garantizar que la calidad de la superficie del alambre de molibdeno satisfaga las necesidades del mecanizado de alta precisión.

4.4.3 Ensayo de resistencia a la tracción

Las pruebas de resistencia a la tracción verifican las propiedades mecánicas del alambre de molibdeno para garantizar que pueda soportar las altas tensiones cíclicas y de tracción que se encuentran en WEDM. La prueba utiliza una máquina de prueba de materiales universal para aplicar una fuerza de tracción a una muestra estándar y registrar la carga máxima antes de la fractura. El entorno de prueba simula las condiciones WEDM (por ejemplo, temperatura ambiente o alta temperatura) y combina el análisis de la topografía de elongación y fractura para evaluar la tenacidad y la resistencia a la fatiga del alambre de molibdeno.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Los fabricantes globales utilizan equipos de prueba automatizados, combinados con control estadístico de procesos (SPC), para garantizar una resistencia constante a la tracción del alambre de molibdeno de un lote a otro. La prueba también incluye una prueba de fatiga para simular el rendimiento del alambre de molibdeno bajo ciclos de descarga y tensión de alta frecuencia para verificar su durabilidad. En el caso de los lotes no conformes, el fabricante optimiza ajustando los parámetros de recocido o redibujando.



CTIA GROUP LTD electroerosión por hilo de molibdeno

Capítulo 5 Usos de la electroerosión por hilo de molibdeno

Como material metálico de alto rendimiento, el alambre de molibdeno desempeña un papel importante en varios campos industriales debido a sus excelentes propiedades físicas y químicas, como alto punto de fusión, alta resistencia, resistencia a la corrosión y buena conductividad eléctrica y térmica. Especialmente en el procesamiento de electroerosión por hilo, la fabricación de fuentes de luz eléctrica, la tecnología de pulverización térmica y otros campos de alta tecnología, el alambre de molibdeno se ha convertido en un material indispensable debido a sus propiedades únicas. En este capítulo se discutirán en detalle las aplicaciones específicas del alambre de molibdeno en estos campos, y se analizarán sus ventajas técnicas y casos prácticos en profundidad para demostrar plenamente la importancia del alambre de molibdeno en la industria moderna.

5.1 Procesamiento de electroerosión por hilo

El mecanizado por descarga eléctrica de alambre (WEDM) es una tecnología avanzada que utiliza el principio de descarga eléctrica para realizar un mecanizado de alta precisión, que se usa ampliamente en la fabricación de moldes, el mecanizado de formas complejas y la fabricación de piezas de alta precisión. El alambre de molibdeno se ha convertido en el material de alambre de electrodo más utilizado en la electroerosión por hilo debido a su alta resistencia, resistencia a altas temperaturas y excelente conductividad eléctrica. A continuación se explicarán los usos específicos

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

del alambre de molibdeno en la electroerosión por hilo desde tres aspectos: fabricación de moldes, procesamiento de formas complejas y microestructuras, y procesamiento de piezas de alta precisión.

5.1.1 Fabricación de moldes

La fabricación de moldes es una de las áreas de aplicación más importantes de la tecnología de electroerosión por hilo, en la que el hilo de molibdeno desempeña un papel central. Los moldes son componentes clave en la producción industrial, ampliamente utilizados en la fabricación de automóviles, producción de electrodomésticos, productos de plástico y estampado de metales y otros campos, y su precisión y calidad afectan directamente el rendimiento del producto final. La aplicación del alambre de molibdeno en la fabricación de moldes se refleja principalmente en los siguientes aspectos:

Procesamiento de moldes de alta precisión

Los hilos de molibdeno suelen tener entre 0,1 mm y 0,3 mm de diámetro, son pequeños y homogéneos, capaces de lograr una precisión de mecanizado a nivel de micras en máquinas de electroerosión por hilo. Por ejemplo, en el procesamiento de matrices de estampado, el alambre de molibdeno puede cortar con precisión contornos complejos y espacios estrechos, lo que garantiza que la geometría del molde cumpla con los requisitos de diseño. En comparación con los métodos de mecanizado tradicionales, el corte de alambre de molibdeno puede procesar aceros para matrices con dureza extremadamente dura (por ejemplo, Cr12MoV, SKD11) sin desgaste de la herramienta debido a la dureza del material.

Implementación de estructuras de moldes complejas

Los diseños de moldes modernos a menudo incluyen geometrías complejas, como estructuras multicurvas, ranuras profundas y esquinas afiladas. El alambre de molibdeno es capaz de hacer frente fácilmente a estas estructuras complejas mediante la descarga de materiales corroídos en la electroerosión por hilo. Por ejemplo, en la fabricación de moldes para paneles automotrices, el alambre de molibdeno se puede cortar en superficies curvas complejas con alta calidad superficial, lo que cumple con los requisitos de precisión y estética de las piezas exteriores de automóviles. Además, la alta resistencia a la tracción del alambre de molibdeno garantiza que no sea fácil de romper durante el procesamiento a largo plazo, lo que garantiza la continuidad y estabilidad del procesamiento.

Producción eficiente y control de costes

El uso de alambre de molibdeno mejora significativamente la eficiencia de la fabricación de moldes. En comparación con el alambre de latón tradicional, el alambre de molibdeno tiene una mayor resistencia al desgaste y resistencia a altas temperaturas, y se puede usar durante mucho tiempo en un entorno de descarga de alta intensidad, lo que reduce la frecuencia de reemplazo del alambre del electrodo, lo que reduce los costos de producción. Por ejemplo, en la producción en masa de moldes de inyección, la alta durabilidad del alambre de molibdeno puede soportar un procesamiento continuo durante horas y horas, lo que reduce el tiempo de inactividad y aumenta la eficiencia de la producción.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Ejemplos prácticos

Tomando como ejemplo a un fabricante de autopartes, al fabricar troqueles de estampado de precisión, utiliza alambre de molibdeno con un diámetro de 0,18 mm para el corte de alambre EDM y procesa con éxito piezas de molde con tolerancias dentro de $\pm 0,005$ mm. Este molde de alta precisión es ampliamente utilizado en la producción de bloques de motor y carcasas de transmisión para automóviles, mejorando significativamente la calidad y la consistencia del producto.

5.1.2 Procesamiento de formas y microestructuras complejas

El alambre de molibdeno también se usa ampliamente en electroerosión por hilo para procesar formas complejas y microestructuras, especialmente en áreas industriales donde se requieren geometrías complejas y de alta precisión. Los siguientes son varios puntos clave de la aplicación de alambre de molibdeno en este campo:

Capacidad para procesar microestructuras

El diámetro fino y la excelente conductividad eléctrica del alambre de molibdeno lo hacen especialmente adecuado para el mecanizado de piezas con estructuras de micras. Por ejemplo, en la fabricación de sistemas microelectromecánicos (MEMS), el alambre de molibdeno puede cortar micro engranajes, microcanales o micro conectores con un ancho de solo unas pocas decenas de micras. Estas microestructuras son ampliamente utilizadas en sensores, micromotores y dispositivos médicos. Las propiedades de alta resistencia y tracción del alambre de molibdeno aseguran que no se deforme ni se rompa al procesar microestructuras.

Realización de estructuras tridimensionales complejas

La tecnología de electroerosión por hilo puede realizar el procesamiento de estructuras tridimensionales complejas mediante el control de la trayectoria del movimiento del alambre de molibdeno. Por ejemplo, en el sector aeroespacial, el alambre de molibdeno se utiliza para cortar orificios de enfriamiento en los álabes de las turbinas, que suelen tener menos de 0,2 mm de diámetro y trayectorias tridimensionales complejas. El alto punto de fusión y la resistencia a altas temperaturas del alambre de molibdeno le permiten trabajar de manera estable en un entorno de descarga de alta energía, lo que garantiza la precisión del mecanizado y el acabado de la superficie.

Compatibilidad multimaterial

El alambre de molibdeno es capaz de mecanizar una amplia gama de materiales de alta dureza (como titanio, cerámica y carburo cementado) en electroerosión por hilo, lo que lo hace ampliamente aplicable en el mecanizado de formas complejas. Por ejemplo, en la fabricación de engranajes de precisión, el alambre de molibdeno puede cortar estructuras de engranajes complejas con una precisión de perfil de dientes ISO 5 para satisfacer las necesidades de maquinaria y equipos de alto rendimiento.

Ejemplos prácticos

En una empresa de fabricación de instrumentos ópticos, el alambre de molibdeno se utiliza para procesar piezas de moldes para lentes ópticas de alta precisión. Estos componentes contienen estructuras esféricas complejas y microranuras, y se mecanizan con tolerancias de $\pm 0,002$ mm.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Mediante el uso de alambre de molibdeno de 0,12 mm de diámetro, la empresa ha procesado con éxito estas complejas estructuras en una máquina de electroerosión por hilo, mejorando significativamente la calidad de imagen de la lente óptica.

5.1.3 Procesamiento de piezas de alta precisión

El mecanizado de componentes de alta precisión es otra área de aplicación importante del alambre de molibdeno en la electroerosión por hilo, especialmente en industrias donde la precisión dimensional y la calidad de la superficie son extremadamente exigentes. La aplicación de alambre de molibdeno en el procesamiento de piezas de alta precisión tiene las siguientes características:

Mecanizado de ultra alta precisión

El diámetro fino y el rendimiento de descarga estable del alambre de molibdeno le permiten lograr una precisión de mecanizado submicrónica. Por ejemplo, en la industria de la maquinaria de precisión, el alambre de molibdeno se utiliza para mecanizar carcasas de rodamientos y componentes de transmisión de alta precisión, que normalmente se requieren con tolerancias dentro de $\pm 0,001$ mm. La alta conductividad y las características de descarga uniforme del alambre de molibdeno garantizan la estabilidad del espacio de descarga durante el procesamiento, asegurando así la precisión dimensional de las piezas.

Excelente calidad superficial

La electroerosión por hilo utiliza alambre de molibdeno para mecanizar piezas con un acabado superficial extremadamente alto, normalmente por debajo de Ra 0,1 micras. Esta alta calidad superficial es especialmente importante en piezas que requieren baja fricción y alta resistencia al desgaste. Por ejemplo, en la fabricación de carretes hidráulicos de alta precisión, el corte con alambre de molibdeno puede garantizar la suavidad de la superficie del carrete, reducir la resistencia a los fluidos y mejorar la eficiencia de la válvula.

Adaptabilidad a materiales complejos y estructuras especiales. He aquí un análisis más detallado del campo:

Procesamiento de materiales complejos

En el sector aeroespacial, el alambre de molibdeno se usa ampliamente para procesar piezas de precisión a partir de superaleaciones (por ejemplo, Inconel 718, GH4169) y aleaciones de titanio (por ejemplo, Ti-6Al-4V). Por ejemplo, la estructura de espiga y ranura del disco de turbina de un motor aeronáutico requiere una precisión geométrica y un acabado superficial extremadamente altos, y el alambre de molibdeno puede controlar con precisión el espacio de descarga a través del corte de alambre EDM, cortando espigas y ranuras complejas con tolerancias dentro de ± 0.002 mm, al tiempo que evita la concentración de tensiones del material y los problemas de microgrietas que pueden resultar del mecanizado tradicional. Además, el alambre de molibdeno puede mantener un rendimiento estable al procesar compuestos de matriz cerámica (CMC), satisfaciendo las necesidades de los motores aeronáuticos de próxima generación para piezas resistentes a altas temperaturas.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Mecanizado simultáneo multieje

Los equipos modernos de electroerosión por hilo suelen estar equipados con un sistema CNC multieje que, combinado con la flexibilidad del hilo de molibdeno, puede lograr un mecanizado complejo de piezas tridimensionales. Por ejemplo, en la fabricación de micro conjuntos de engranajes en instrumentos de precisión, el alambre de molibdeno se puede utilizar para cortar estructuras de dientes con curvas espaciales complejas a través de un enlace de cinco ejes con precisión ISO 4. Esta capacidad es particularmente importante en la fabricación de dispositivos ópticos, instrumentos de precisión y relojes de alta gama.

Ejemplos prácticos

Tomando como ejemplo una empresa de fabricación de instrumentos de precisión, en la producción de soportes de espejo de alta precisión para telémetros láser, utiliza alambre de molibdeno de 0,15 mm de diámetro para el corte de alambre EDM y procesa con éxito un soporte con formas geométricas complejas, la tolerancia dimensional se controla dentro de $\pm 0,0015$ mm y la rugosidad de la superficie alcanza Ra 0,08 micras. Este soporte de alta precisión mejora significativamente la precisión de la medición del telémetro y se usa ampliamente en los campos de exploración geológica y topografía y cartografía de edificios.

Protección del medio ambiente y sostenibilidad

El uso de alambre de molibdeno en el procesamiento de piezas de alta precisión también tiene ciertas ventajas ambientales. En comparación con el mecanizado convencional, la electroerosión por hilo no requiere el uso de una gran cantidad de fluido de corte, lo que reduce la generación de residuos líquidos. Además, la alta durabilidad del alambre de molibdeno significa menores tasas de consumo y menos desperdicio de material. Por ejemplo, en la producción en masa de piezas de precisión, la tasa de reutilización del alambre de molibdeno puede alcanzar más del 80%, lo que reduce significativamente los costos de producción y el impacto ambiental.

5.2 Aplicación de la fuente de luz eléctrica

Debido a su alto punto de fusión (alrededor de 2623 °C), buena conductividad y resistencia a la oxidación, el alambre de molibdeno se usa ampliamente en la industria de fuentes de luz eléctrica para fabricar varios componentes clave, como puertas, ganchos, puntales, núcleos y cables calefactores.

5.2.1 Puertas, ganchos, puntales

En fuentes de luz eléctrica como lámparas fluorescentes, halógenas y de descarga de alta presión, el alambre de molibdeno se utiliza como componente clave, como puertas, ganchos y puntales, debido a su capacidad para mantener la estabilidad estructural y las propiedades eléctricas en entornos de alta temperatura y alto vacío.

Fabricación de compuertas

Las compuertas son componentes importantes en algunas fuentes de luz eléctrica, como las lámparas de halogenuros metálicos, para controlar el flujo de electrones o para estabilizar el proceso de descarga. Debido a su alta resistencia y resistencia a la corrosión, el alambre de molibdeno puede

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

funcionar durante mucho tiempo en un entorno de descarga a alta temperatura sin deformación. Por ejemplo, en la fabricación de puertas de lámparas de sodio de alta presión, los alambres de molibdeno se procesan en filamentos con un diámetro de 0,05 mm a 0,2 mm, que se enrollan con precisión para formar una estructura de puerta que garantiza la estabilidad del arco y la salida de luz de la lámpara.

Ganchos y puntales

Los ganchos y puntales se utilizan para sujetar los elementos emisores de luz (por ejemplo, alambres de tungsteno o electrodos) dentro de la fuente de luz eléctrica. El alto punto de fusión y la resistencia mecánica del alambre de molibdeno lo convierten en un material ideal. Por ejemplo, en la producción de lámparas halógenas para automóviles, el alambre de molibdeno se procesa en un gancho en miniatura para colgar luminarias de filamento de tungsteno para garantizar que no se rompan ni deformen en un entorno operativo de alta temperatura (aproximadamente 3000 °C). Además, el bajo coeficiente de expansión térmica del alambre de molibdeno garantiza la estabilidad dimensional del gancho y el puntal durante el ciclo térmico y evita la falla estructural de la lámpara debido a la expansión y contracción térmica.

Ejemplos prácticos

Por ejemplo, una empresa internacional de iluminación utiliza alambre de molibdeno de 0,1 mm de diámetro para fabricar puntales y ganchos en la producción de lámparas de descarga de gas de alta intensidad (lámparas HID). Estos componentes son capaces de funcionar de forma estable a una temperatura de trabajo de más de 2.000 °C, lo que garantiza una vida útil de la luminaria de más de 20.000 horas. Esta alta confiabilidad hace que las lámparas HID sean ampliamente utilizadas en el campo de la iluminación vial y la iluminación industrial.

5.2.2 Alambre central y alambre calefactor

Otra aplicación importante del alambre de molibdeno en fuentes de luz eléctrica es como núcleo y alambre calefactor, especialmente en lámparas incandescentes, tubos de vacío y algunas fuentes de luz especiales.

Aplicaciones principales

El alambre de molibdeno se usa a menudo como núcleo en lámparas incandescentes y tubos de vacío para soportar filamentos de tungsteno u otros materiales emisores de luz. El alto punto de fusión y la buena conductividad eléctrica del alambre de molibdeno le permiten transmitir corriente de manera estable en entornos de alta temperatura. Por ejemplo, en las lámparas incandescentes tradicionales, el alambre de molibdeno se enrolla en un núcleo en espiral que soporta la luminaria de filamento de tungsteno y garantiza que no se hunda ni se rompa a altas temperaturas. Además, la resistencia a la oxidación del alambre de molibdeno lo hace adecuado para su uso en entornos de vacío o gas inerte, lo que prolonga la vida útil de la lámpara.

Aplicación de alambre calefactor

En algunas fuentes de luz especiales, como las lámparas calefactoras infrarrojas, el alambre de molibdeno se utiliza directamente como hilo calefactor. Su alta resistividad y resistencia a altas

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

temperaturas le permiten generar altas temperaturas en un corto período de tiempo para un calentamiento rápido o radiación infrarroja. Por ejemplo, en equipos industriales de secado por infrarrojos, el alambre calefactor de alambre de molibdeno puede aumentar rápidamente la temperatura a más de 1000 °C, que se utiliza para el secado rápido de madera, pintura o alimentos.

Ejemplos prácticos

En una empresa de fabricación de equipos de calefacción por infrarrojos, el alambre de molibdeno se utiliza para producir alambre calefactor para lámparas infrarrojas de alta potencia, y el alambre de molibdeno con un diámetro de 0,3 mm se enrolla con precisión para formar un elemento calefactor, que puede elevar la temperatura a 1200 °C en 5 segundos. Este rendimiento de calentamiento eficiente es ampliamente utilizado en líneas de recubrimiento automotriz y en la industria de procesamiento de alimentos.

5.3 Pulverización térmica

La tecnología de pulverización térmica es una tecnología de tratamiento de superficies que rocía materiales fundidos o semifundidos sobre la superficie del sustrato para formar un recubrimiento, y el alambre de molibdeno se usa ampliamente en este campo debido a su alto punto de fusión y excelente resistencia al desgaste. El siguiente es un análisis detallado desde dos aspectos: fortalecimiento y reparación de la superficie, y preparación del recubrimiento resistente al desgaste.

5.3.1 Refuerzo y reparación de superficies

El alambre de molibdeno se utiliza como material de pulverización en la tecnología de pulverización térmica para formar un recubrimiento de alto rendimiento mediante pulverización por arco o pulverización por plasma, que se utiliza para fortalecer la superficie del sustrato o reparar piezas desgastadas.

Refuerzo de la superficie

Los recubrimientos en aerosol de alambre de molibdeno ofrecen una dureza y resistencia a la corrosión extremadamente altas, lo que puede mejorar significativamente las propiedades de la superficie de los sustratos. Por ejemplo, en la industria petroquímica, el alambre de molibdeno se rocía sobre la superficie de las válvulas de las tuberías para formar un recubrimiento de molibdeno con un espesor de aproximadamente 0,2 mm, que puede resistir eficazmente los gases ácidos y la corrosión a alta temperatura, y prolongar la vida útil de la válvula. Además, el bajo coeficiente de fricción del recubrimiento de molibdeno le confiere excelentes propiedades antidesgaste en piezas deslizantes como los segmentos de pistón.

Reparación de componentes

La pulverización térmica con alambre de molibdeno también se utiliza para reparar piezas mecánicas desgastadas. Por ejemplo, en la industria de maquinaria pesada, las piezas de eje desgastadas (por ejemplo, cigüeñales, ejes de transmisión) se pueden restaurar a su tamaño y rendimiento originales mediante pulverización de alambre de molibdeno. La alta fuerza de unión del recubrimiento de molibdeno (hasta más de 70 MPa) garantiza que las piezas reparadas puedan soportar altas cargas e impactos. Además, el costo de la reparación por pulverización de alambre de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

molibdeno es mucho menor que el reemplazo de piezas nuevas, lo que tiene importantes beneficios económicos.

Ejemplos prácticos

Tomando como ejemplo una empresa de construcción naval, al reparar el cigüeñal de un motor diésel marino, utilizó alambre de molibdeno para la pulverización por arco para formar un recubrimiento de molibdeno de 0,3 mm de espesor, que restauró con éxito la precisión dimensional y la dureza de la superficie del cigüeñal. El cigüeñal reparado exhibe una excelente resistencia al desgaste y la fatiga durante el funcionamiento con alta carga, lo que prolonga la vida útil en aproximadamente un 30%.

5.3.2 Preparación de recubrimientos resistentes al desgaste

El alambre de molibdeno también se utiliza en la pulverización térmica para preparar recubrimientos resistentes al desgaste, que son ampliamente utilizados en escenarios industriales que requieren una alta resistencia al desgaste.

Propiedades del recubrimiento resistente a la abrasión

El recubrimiento formado por la pulverización de alambre de molibdeno tiene una alta dureza (aprox. HV 800-1000) y excelentes propiedades antidesgaste, lo que lo hace adecuado para entornos de alta fricción. Por ejemplo, en los equipos de minería, el alambre de molibdeno se rocía sobre la superficie de los dientes de la excavadora para formar un recubrimiento resistente al desgaste que puede resistir eficazmente el desgaste de la arena y los minerales y prolongar la vida útil de los dientes. Además, las propiedades autolubrificantes del recubrimiento de molibdeno lo hacen excelente en entornos de fricción a alta temperatura.

Aplicaciones multisectoriales

En la industria siderúrgica, los recubrimientos en aerosol de alambre de molibdeno se aplican a las superficies de los rodillos para mejorar su resistencia al desgaste y a la fatiga térmica. Por ejemplo, los rollos de placas de acero laminado en caliente son propensos al desgaste de la superficie en entornos de alta temperatura y alta presión, y el recubrimiento formado por la pulverización de alambre de molibdeno puede prolongar la vida útil del rodillo 2-3 veces. Además, en las plantas de energía eólica, la pulverización de alambre de molibdeno se utiliza para el tratamiento de la superficie de los cojinetes de las palas, lo que mejora significativamente la resistencia al desgaste de los cojinetes.

Ejemplos prácticos

En una empresa de producción de cemento, el alambre de molibdeno se utiliza para rociar la placa de revestimiento de un molino de cemento para formar un recubrimiento resistente al desgaste con un espesor de 0,5 mm. La alta dureza y resistencia a la corrosión del recubrimiento lo hacen resistente al desgaste intenso del clínker de cemento, y la vida útil del revestimiento se extiende de 6 meses a 18 meses, lo que reduce significativamente los costos de mantenimiento.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

5.4 Otras aplicaciones industriales

Además de las principales áreas de aplicación mencionadas anteriormente, el alambre de molibdeno también desempeña un papel importante en varios campos de alta tecnología, como la industria aeroespacial, la de dispositivos médicos y la electrónica. Este es el análisis.

5.4.1 Procesamiento de materiales aeroespaciales

La industria aeroespacial tiene requisitos de rendimiento extremadamente altos para los materiales, y el alambre de molibdeno se usa ampliamente en el procesamiento de componentes críticos debido a su alta resistencia, resistencia a altas temperaturas y resistencia a la corrosión.

Mecanizado de álabes de turbina

El alambre de molibdeno se utiliza en la electroerosión por hilo para mecanizar orificios de enfriamiento y contornos complejos de las palas de las turbinas de los motores aeronáuticos. Estos orificios de enfriamiento suelen tener entre 0,1 y 0,3 mm de diámetro y tienen trayectorias espaciales complejas, que se cumplen con el diámetro fino y las capacidades de mecanizado de alta precisión del alambre de molibdeno. Por ejemplo, al mecanizar cuchillas de superaleación a base de níquel, el alambre de molibdeno puede alcanzar una tolerancia de orificio de $\pm 0,002$ mm, lo que garantiza el enfriamiento y el rendimiento de la cuchilla.

Procesamiento de materiales compuestos

Los compuestos de fibra de carbono (CFRP) y los compuestos de matriz cerámica (CMC), que se utilizan ampliamente en la industria aeroespacial, tienen una alta dureza y una baja conductividad, que son difíciles de procesar con el mecanizado tradicional. El alambre de molibdeno se puede procesar de manera eficiente mediante electroerosión por hilo para procesar estos materiales, por ejemplo, en la fabricación de pieles de alas de aviones, donde se utiliza para cortar aberturas complejas y orificios de conexión en paneles compuestos.

Ejemplos prácticos

Tomando como ejemplo una empresa de fabricación de motores aeronáuticos, en la producción de palas de motor turbofán, utiliza alambre de molibdeno de 0,18 mm de diámetro para el corte de alambre EDM, y procesa con éxito un orificio de enfriamiento con un diámetro de 0,2 mm, y la rugosidad de la pared del orificio alcanza Ra 0,1 micras. Este mecanizado de alta precisión mejora significativamente la eficiencia térmica y la vida útil de las cuchillas.

5.4.2 Fabricación de dispositivos médicos

La aplicación del alambre de molibdeno en la fabricación de dispositivos médicos se centra principalmente en escenarios con requisitos de alta precisión y biocompatibilidad.

Instrumental quirúrgico mínimamente invasivo

El alambre de molibdeno se utiliza para procesar instrumentos quirúrgicos mínimamente invasivos, como componentes endoscópicos, guías y stents. Por ejemplo, en la fabricación de stents cardíacos, el alambre de molibdeno se puede mecanizar en una estructura de rejilla en miniatura con un diámetro de menos de 0,05 mm mediante electroerosión por hilo, lo que garantiza la elasticidad y

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

biocompatibilidad del stent. Además, el alto acabado superficial del alambre de molibdeno reduce la fricción y la respuesta inflamatoria causada por el dispositivo en el cuerpo humano.

Implantes dentales y ortopédicos

El alambre de molibdeno se utiliza en el procesamiento de implantes dentales y dispositivos de fijación ortopédicos, como implantes dentales y tornillos óseos. Estos componentes a menudo requieren geometrías complejas y alta calidad de superficie, y las capacidades de mecanizado de precisión del alambre de molibdeno pueden cumplir con estos requisitos. Por ejemplo, en la fabricación de implantes dentales, el alambre de molibdeno se puede utilizar para cortar hilos del tamaño de una micra para mejorar la fuerza de unión del implante.

Ejemplos prácticos

En una empresa de dispositivos médicos, el alambre de molibdeno se utiliza para procesar tornillos óseos de aleación de titanio, la tolerancia de la rosca se controla dentro de ± 0.003 mm y la rugosidad de la superficie alcanza Ra 0.05 micras. Este tornillo de alta precisión es ampliamente utilizado en la cirugía de fijación de fracturas, mejorando significativamente la tasa de éxito de la cirugía y la velocidad de recuperación del paciente.

5.4.3 Aplicaciones en la industria electrónica

La aplicación del alambre de molibdeno en la industria electrónica se refleja principalmente en la fabricación de semiconductores y el procesamiento de dispositivos microelectrónicos.

Procesamiento de moldes de semiconductores

El alambre de molibdeno se utiliza en la electroerosión por hilo para procesar moldes de empaque de chips semiconductores y plantillas de corte de obleas. Por ejemplo, en la producción de moldes de embalaje de circuitos integrados (IC), el alambre de molibdeno es capaz de cortar ranuras microscópicas con un ancho de solo 0,02 mm, lo que garantiza una alta precisión y consistencia del molde.

Conectores microelectrónicos

El alambre de molibdeno se utiliza para procesar las estructuras complejas de los conectores microelectrónicos, como los orificios de conexión de las placas de circuitos de interconexión de alta densidad (HDI). Estos orificios de conexión suelen tener menos de 0,1 mm de diámetro, y la capacidad de mecanizado de alta precisión del alambre de molibdeno puede cumplir con sus estrictas tolerancias.

Ejemplos prácticos

En una empresa de fabricación de semiconductores, el alambre de molibdeno se utiliza para procesar plantillas de corte en cubitos de obleas, y la tolerancia del ancho de la ranura de la plantilla se controla dentro de ± 0.001 mm, y la rugosidad de la superficie alcanza Ra 0.03 micras. Esta plantilla de alta precisión mejora significativamente la tasa de rendimiento del corte en cubitos de obleas y se usa ampliamente en la producción de chips 5G y chips de IA.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal



CTIA GROUP LTD electroerosión por hilo de molibdeno

Capítulo 6 Equipo de producción para electroerosión por hilo de molibdeno

Como material metálico de alto rendimiento, el alambre de molibdeno se usa ampliamente en campos de alta tecnología como electroerosión por hilo, fuente de luz eléctrica, pulverización térmica y aeroespacial, y su proceso de producción tiene requisitos extremadamente altos para equipos. La producción de alambre de molibdeno implica múltiples eslabones, desde la preparación de la materia prima hasta el trefilado, el tratamiento de superficies, el tratamiento térmico y la inspección de calidad final, cada uno de los cuales requiere un equipo especial para garantizar la alta precisión, alta resistencia y excelente calidad superficial del alambre de molibdeno. En este capítulo se discutirán en detalle los diversos tipos de equipos involucrados en la producción de alambre de molibdeno, y se analizarán en profundidad sus funciones, características técnicas y parámetros del proceso.

6.1 Equipo de preparación de materias primas

La producción de alambre de molibdeno comienza con la preparación de materiales de molibdeno de alta pureza, y la calidad de las materias primas determina directamente el rendimiento del alambre de molibdeno final. El equipo de preparación de materias primas incluye principalmente equipos de producción de polvo de molibdeno y hornos de sinterización, y sus funciones y aplicaciones se describirán en detalle a continuación.

6.1.1 Equipo de producción de polvo de molibdeno

El polvo de molibdeno es la materia prima básica para la producción de alambre de molibdeno, y su pureza, tamaño de partícula y uniformidad son cruciales para el procesamiento posterior. El equipo de producción de polvo de molibdeno incluye principalmente hornos de reducción, molinos de bolas y equipos de cribado, que se utilizan para convertir el concentrado de molibdeno o el

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

molibdato de amonio en polvo de molibdeno de alta pureza.

Horno de reducción de hidrógeno El horno de reducción de hidrógeno es el equipo principal para la producción de polvo de molibdeno, que reduce el molibdato de amonio o el óxido de molibdeno (MoO_3) a polvo de molibdeno metálico mediante el uso de hidrógeno como agente reductor a altas temperaturas. El horno de reducción generalmente adopta un diseño de múltiples etapas, y la temperatura se controla entre 600 °C y 1100 °C, que se divide en dos etapas: reducción a baja temperatura y reducción a alta temperatura. El óxido de molibdeno se reduce a dióxido de molibdeno (MoO_2) en la etapa de baja temperatura (600-800 °C) y se reduce aún más a polvo de molibdeno metálico en la etapa de alta temperatura (900-1100 °C). Los hornos de reducción modernos están equipados con sistemas precisos de control de temperatura y dispositivos de control de flujo de gas para garantizar que la pureza del polvo de molibdeno alcance más del 99,95% y que el tamaño de partícula se distribuya uniformemente (generalmente de 1 a 5 micras).

Molino de bolas El molino de bolas se utiliza para refinar el polvo de molibdeno reducido preliminarmente para controlar aún más la distribución del tamaño de partícula. El interior del equipo adopta una placa de revestimiento de acero cerámico o tungsteno de alta dureza para evitar la introducción de impurezas en el proceso de molienda del polvo de molibdeno. La velocidad y el tiempo de molienda del molino de bolas deben controlarse con precisión, generalmente a 200-400 rpm, y una velocidad demasiado alta puede provocar la aglomeración de polvo de molibdeno, lo que afectará el efecto de sinterización posterior. La molienda húmeda de bolas también puede mejorar la eficiencia de la molienda al agregar medios como el etanol y evitar la oxidación del polvo de molibdeno.

Equipos de cribado y clasificación Los equipos de cribado (por ejemplo, cribas vibratorias o clasificadores de chorro) se utilizan para separar polvos de molibdeno de diferentes tamaños de partícula para garantizar que la distribución del tamaño de partícula cumpla con los requisitos de estirado. El clasificador de aire separa el polvo de molibdeno por tamaño de partícula a través del flujo de aire a alta velocidad, con una precisión de $\pm 0,1$ micras, que es adecuada para las materias primas necesarias para la producción de alambre de molibdeno ultrafino. Además, el equipo de cribado está equipado con dispositivos a prueba de polvo y antioxidantes para evitar que el polvo de molibdeno se oxide en el aire.

6.1.2 Sintering furnaces

El horno de sinterización se utiliza para prensar polvo de molibdeno en piezas en bruto de molibdeno, proporcionando una pieza en bruto uniforme y de alta densidad para el proceso de trefilado posterior. El proceso de sinterización debe llevarse a cabo a altas temperaturas y en una atmósfera protectora para evitar la oxidación del material de molibdeno.

Horno de sinterización de alta temperatura El horno de sinterización de alta temperatura generalmente adopta calentamiento por resistencia o calentamiento por inducción, y la temperatura de trabajo puede alcanzar 1800-2200 °C. El hidrógeno o argón se introduce en el horno como atmósfera protectora para evitar la oxidación de las palanquillas de molibdeno. Los hornos de

sinterización modernos están equipados con un sistema de control de temperatura de varias etapas, que puede controlar con precisión la velocidad de calentamiento (generalmente 5-10 °C / min) y el tiempo de retención (2-4 horas) para garantizar que la densidad de la palanquilla de molibdeno alcance más del 98%.

Con el fin de mejorar aún más la uniformidad y la resistencia de las palanquillas de molibdeno, algunas empresas utilizan hornos de sinterización de prensado isostático en caliente (HIP). El equipo HIP utiliza argón a alta presión (100-200 MPa) y alta temperatura (1800-2000 °C) para cerrar los poros internos de la palanquilla de molibdeno y mejorar significativamente la resistencia del material.

6.2 Equipos de trefilado

El trefilado es el proceso central de la producción de alambre de molibdeno, y la pieza en bruto de molibdeno se procesa gradualmente en filamento a través de un trefilado de varias pasadas. El equipo de trefilado incluye una máquina de trefilado de alta precisión y un troquel de trefilado de piedras preciosas, y sus funciones y requisitos técnicos se analizarán en detalle a continuación.

6.2.1 Máquina trefiladora de alta precisión

La máquina trefiladora de alta precisión es un equipo clave para la producción de alambre de molibdeno, que se utiliza para estirar piezas en bruto de molibdeno en filamentos con un diámetro de 0,05-0,3 mm. La máquina trefiladora debe tener un control de tensión de alta precisión y una velocidad de funcionamiento estable para garantizar la consistencia dimensional y la calidad de la superficie del alambre de molibdeno.

El trefilado de alambre de molibdeno de la máquina trefiladora de alambre de varias pasadas generalmente requiere 20-30 pasadas, y el diámetro se reduce gradualmente. Las modernas trefiladoras de varias pasadas son accionadas por servomotores y están equipadas con un sistema de control de tensión, que puede ajustar la velocidad de trefilado (5-20 m/s) y la tensión (0,1-2 N) en tiempo real para evitar la rotura del alambre de molibdeno durante el proceso de trefilado.

Los sistemas de lubricación y enfriamiento generan mucho calor durante el proceso de trefilado, y las máquinas de trefilado de alta precisión están equipadas con sistemas eficientes de lubricación y enfriamiento, a menudo utilizando lubricantes a base de aceite o agua. El lubricante no solo reduce la fricción, sino que también evita arañazos en la superficie del alambre de molibdeno.

6.2.2 Troqueles de dibujo de piedras preciosas

El troquel de trefilado de piedras preciosas es el componente central del proceso de trefilado, que afecta directamente la precisión dimensional y la calidad de la superficie del alambre de molibdeno. Los troqueles cepillados generalmente están hechos de diamante natural o diamante policristalino sintético (PCD).

Troquel de trefilado de diamante Los troqueles de trefilado de diamante tienen una dureza y resistencia al desgaste extremadamente altas, y son adecuados para procesar alambres de molibdeno

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

de alta dureza. El diámetro del orificio del troquel se reduce gradualmente de 1 mm a 0,05 mm, y la rugosidad de la superficie del orificio del troquel debe controlarse por debajo de Ra 0,01 micras para garantizar que la superficie del alambre de molibdeno sea lisa. Los troqueles de trefilado modernos utilizan tecnología de perforación láser y el error de redondez del orificio del troquel es inferior a 0,5 micras.

Diseño y mantenimiento del orificio del troquel El diseño del orificio del troquel incluye las áreas de entrada, trabajo y salida, y los ángulos y longitudes de cada área deben calcularse con precisión para optimizar el efecto del dibujo. Por ejemplo, el ángulo de la zona de entrada suele ser de 30-40° y la longitud de la zona de trabajo es de 0,5-1 veces el diámetro del orificio del troquel. El troquel de trefilado debe limpiarse y pulirse regularmente durante su uso para eliminar los residuos de polvo de molibdeno y el desgaste de la superficie.

6.3 Equipos de tratamiento de superficies

La calidad de la superficie del alambre de molibdeno es fundamental para su rendimiento en la electroerosión por hilo, y el equipo de tratamiento de superficies se utiliza para eliminar las capas de óxido de la superficie, mejorar los acabados y aplicar recubrimientos funcionales. El siguiente es un análisis detallado desde tres aspectos: lavado alcalino, pulido electrolítico y recubrimiento en emulsión de grafito.

6.3.1 Equipos de lavado cáustico

El equipo de lavado cáustico se utiliza para eliminar óxidos, aceites y otras impurezas de la superficie del alambre de molibdeno para mejorar la limpieza de la superficie.

Los baños cáusticos y los baños cáusticos en solución suelen estar hechos de acero inoxidable o plásticos resistentes a la corrosión, y la solución es una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH) con una concentración del 5-10%. La temperatura de lavado cáustico se controla a 60-80 °C, y el alambre de molibdeno pasa a través del tanque de lavado cáustico continuo a una velocidad de 5-10 m / min, y el tiempo de limpieza es de 10-20 segundos.

El líquido residual generado en el proceso de tratamiento de protección del medio ambiente del lavado con álcalis debe neutralizarse para cumplir con los requisitos de protección del medio ambiente. El equipo moderno de lavado cáustico está equipado con un sistema de recuperación de líquidos residuales, que aumenta la tasa de eliminación de iones de metales pesados en el líquido residual a más del 95% a través de dispositivos de filtración y neutralización ácido-álcali.

6.3.2 Equipos de pulido electrolítico

El pulido electrolítico mejora aún más el acabado y la resistencia a la corrosión de la superficie del alambre de molibdeno a través de reacciones electroquímicas.

Tanque de pulido electrolítico El tanque de pulido electrolítico está hecho de materiales resistentes a los ácidos, como el PTFE, y el electrolito suele ser una solución de ácido sulfúrico o ácido fosfórico con una concentración de 20-30%. Como ánodo, la protuberancia microscópica en la

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

superficie del alambre de molibdeno se disuelve después de ser energizado, y la rugosidad de la superficie se puede reducir a menos de Ra 0,02 micras. El equipo de pulido electrolítico está equipado con una fuente de alimentación de corriente constante, la densidad de corriente se controla a 10-20 A / dm² y el tiempo de pulido es de 5-15 segundos.

La calidad del electropulido controlado por proceso depende de la adaptación precisa de la temperatura del electrolito (50-70 °C), la densidad de corriente y la velocidad a la que pasa el alambre de molibdeno. El equipo moderno adopta un sistema de control PLC para monitorear los parámetros electrolíticos en tiempo real para garantizar resultados de pulido consistentes.

6.3.3 Equipo de recubrimiento en emulsión de grafito

El equipo de recubrimiento de emulsión de grafito se utiliza para aplicar un recubrimiento de grafito en la superficie del alambre de molibdeno para mejorar su lubricidad y resistencia al desgaste, especialmente en la aplicación de electroerosión por hilo.

Equipo de recubrimientoEl equipo de recubrimiento en emulsión de grafito generalmente incluye un tanque de recubrimiento, un horno de secado y un sistema de tracción. El alambre de molibdeno pasa a través del tanque de recubrimiento que contiene emulsión de grafito a una velocidad de 5-10 m / min, y el espesor del recubrimiento se controla a 1-2 micras. La temperatura del horno es de 100-150 °C, lo que garantiza que el recubrimiento se cure rápidamente.

Formulación de emulsión de grafitoLa emulsión de grafito generalmente se compone de polvo de grafito de alta pureza, aglutinante y solvente con un contenido de grafito del 10-20%. El equipo de recubrimiento está equipado con un dispositivo de agitación para garantizar la homogeneidad de la leche de grafito.

6.4 Equipo de tratamiento térmico

El tratamiento térmico es una parte importante de la producción de alambre de molibdeno, que se utiliza para eliminar las tensiones internas y mejorar la ductilidad y las propiedades mecánicas de los materiales durante el proceso de trefilado. El equipo de tratamiento térmico incluye principalmente un horno de tratamiento térmico al vacío y un horno de recocido.

6.4.1 Hornos de tratamiento térmico al vacío

Los hornos de tratamiento térmico al vacío se utilizan para tratar térmicamente el alambre de molibdeno en un entorno de vacío a alta temperatura para evitar la oxidación y mejorar la estructura cristalina.

Estructura del horno de vacíoEl horno de tratamiento térmico al vacío utiliza molibdeno o tungsteno como elemento calefactor, la temperatura de trabajo puede alcanzar los 1600-1800 °C y el grado de vacío se controla por debajo de 10⁻³ Pa. El horno está equipado con un sistema de control de temperatura de múltiples etapas, la velocidad de calentamiento se controla a 5-10 °C / min y el tiempo de mantenimiento es de 1-2 horas.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

El tratamiento térmico al vacío de optimización del proceso puede eliminar eficazmente la tensión residual dentro del alambre de molibdeno, mejorando su ductilidad y tenacidad. Los hornos de vacío modernos están equipados con un sistema de monitoreo en línea para detectar la temperatura y el grado de vacío del alambre de molibdeno en tiempo real para garantizar que el efecto del tratamiento térmico sea constante.

6.4.2 Hornos de recocido

Los hornos de recocido se utilizan para recocer alambre de molibdeno a temperaturas más bajas para optimizar aún más sus propiedades mecánicas.

Horno de recocido continuo El horno de recocido continuo adopta hidrógeno o argón para proteger la atmósfera, la temperatura se controla a 800-1200 °C y el alambre de molibdeno pasa a través del cuerpo del horno a una velocidad de 5-15 m / min. El horno de recocido está equipado con un termómetro infrarrojo con una precisión de control de temperatura de ± 5 °C.

Proceso de recocido segmentado El proceso de recocido generalmente se divide en tres etapas: precalentamiento, conservación del calor y enfriamiento, la temperatura de precalentamiento es de 600-800 °C, la temperatura de mantenimiento es de 1000-1100 °C y el enfriamiento adopta inyección de gas inerte para evitar la oxidación.

6.5 Equipos de ensayo y control de calidad

La calidad del alambre de molibdeno afecta directamente su rendimiento en la electroerosión por hilo, y se utilizan equipos de inspección y control de calidad para garantizar que la precisión dimensional, la calidad de la superficie y las propiedades mecánicas del alambre de molibdeno cumplan con los requisitos. El siguiente es un análisis detallado desde tres aspectos: medición del diámetro del alambre, detección de defectos superficiales y prueba de resistencia a la tracción.

6.5.1 Instrumento de medición del diámetro del alambre

Los calibres de diámetro de alambre se utilizan para medir con precisión el diámetro del alambre de molibdeno para garantizar que cumpla con las tolerancias.

Instrumento de medición de diámetro de alambre láser El instrumento de medición de diámetro de alambre láser adopta un principio de medición sin contacto, con una precisión de ± 0.0001 mm, y es adecuado para alambre de molibdeno con un diámetro de 0.05-0.3 mm. El equipo está equipado con un sistema de escaneo de alta velocidad con una frecuencia de medición de hasta 1000 veces por segundo, que puede detectar el cambio de diámetro del alambre de molibdeno en tiempo real.

El moderno instrumento de medición del diámetro del alambre está integrado en la línea de producción de trefilado, y el diámetro del alambre de molibdeno se monitorea en tiempo real a través del sistema de inspección en línea y se retroalimenta a la máquina de trefilado para su ajuste automático.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

6.5.2 Detector de defectos superficiales

Los detectores de defectos superficiales se utilizan para detectar defectos como arañazos, grietas y óxidos en la superficie del alambre de molibdeno para garantizar su calidad superficial.

Inspección de microscopio óptico El inspector de microscopio óptico está equipado con una cámara CCD de alta resolución con un aumento de hasta 1000 veces, que es capaz de detectar defectos a nivel de micras en la superficie del alambre de molibdeno.

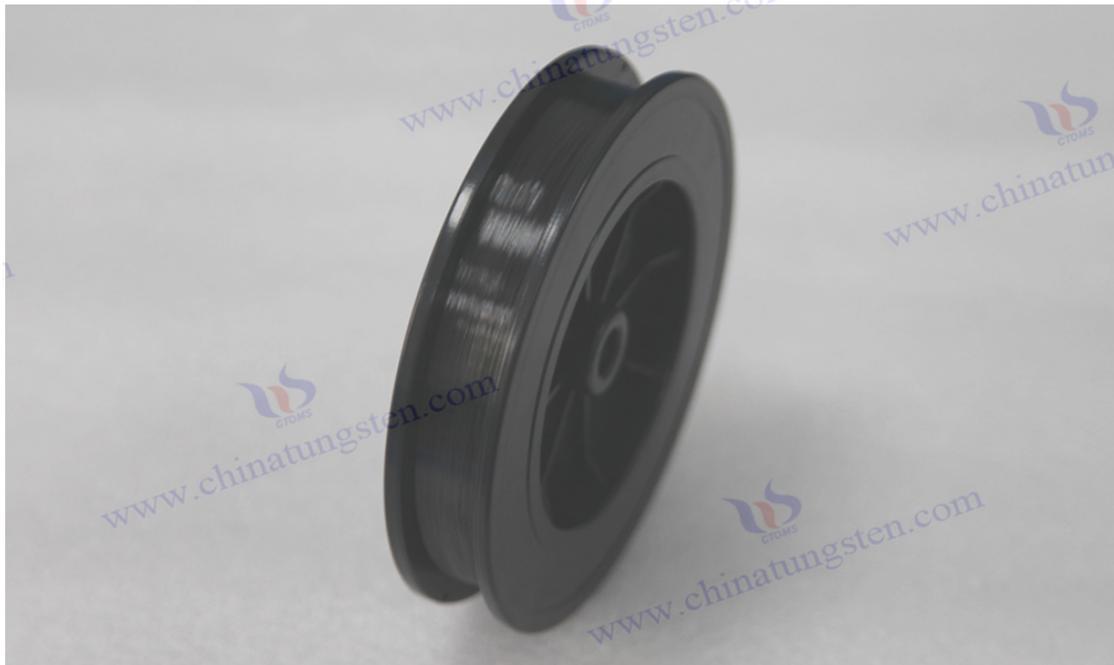
Equipo de prueba de corrientes de Foucault El equipo de prueba de corrientes de Foucault detecta defectos internos y grietas superficiales en la superficie del alambre de molibdeno a través del principio de inducción electromagnética, que es adecuado para la inspección continua de alta velocidad. El dispositivo tiene una sensibilidad de hasta 0,1 micras y una velocidad de detección de hasta 20 m/min.

6.5.3 Máquina de ensayo de resistencia a la tracción

Las máquinas de prueba de resistencia a la tracción se utilizan para medir las propiedades mecánicas del alambre de molibdeno para garantizar que no se rompa en un entorno de corte de alambre de alta resistencia.

Máquina de ensayo de microtracción La máquina de ensayo de microtracción está diseñada para alambres de molibdeno de diámetro fino, con un rango de ensayo de 0,1-100 N y una precisión de $\pm 0,1\%$. El equipo está equipado con accesorios de alta precisión para evitar daños en el alambre de molibdeno durante el proceso de sujeción.

Sistema de prueba dinámica Los probadores modernos de resistencia a la tracción están equipados con funciones de carga dinámica que simulan el estado de tensión real del alambre de molibdeno en el electroerosión por hilo.



Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Capítulo 7 Normas nacionales y extranjeras para electroerosión por hilo de molibdeno

Con el fin de estandarizar la producción, prueba y aplicación de alambre de molibdeno, se han formulado una serie de estándares estrictos en el país y en el extranjero, que cubren muchos aspectos, como la composición química, las propiedades mecánicas, la precisión dimensional, la calidad de la superficie y el control del proceso de producción. Estas normas proporcionan una base técnica para los fabricantes, proporcionan a los usuarios un marco de referencia para la evaluación de la calidad y promueven el progreso continuo de la tecnología de fabricación de alambre de molibdeno. Este capítulo discutirá exhaustivamente los estándares nacionales e internacionales de electroerosión por hilo de molibdeno y el análisis comparativo de los dos, y analizará en profundidad los requisitos técnicos, los impactos del proceso y los escenarios de aplicación de los estándares.

7.1 Norma nacional para la electroerosión por hilo de molibdeno

Como país importante en las reservas mundiales de molibdeno y en la producción de productos de molibdeno, China ha formulado una serie de normas nacionales (GB/T) y normas industriales para regular la producción y aplicación de alambre de molibdeno. Estas normas establecen requisitos estrictos para la pureza química, las propiedades mecánicas, la precisión dimensional y la calidad de la superficie de la electroerosión por hilo de molibdeno, que se utilizan ampliamente en los campos de la electroerosión por hilo, la fabricación de moldes, la industria electrónica y la fuente de luz eléctrica. A continuación se presenta un análisis detallado de su contenido técnico y la importancia de su aplicación a partir de las normas específicas.

7.1.1 GB/T 4182-2017

GB/T 4182-2017 "Alambre de molibdeno" es el estándar nacional básico para alambre de molibdeno formulado por China, que es adecuado para alambre de molibdeno en electroerosión por hilo, industria electrónica, fuente de luz eléctrica y otros campos de alta tecnología. La norma regula de manera integral la calidad del alambre de molibdeno desde muchos aspectos, como la composición química, las propiedades mecánicas, la precisión dimensional, la calidad de la superficie y los métodos de prueba.

Requisitos de composición química

GB/T 4182-2017 estipula que el contenido de molibdeno del alambre de molibdeno para el corte de alambre debe alcanzar más del 99.95%, y el contenido total de elementos de impurezas (como hierro, níquel, carbono, oxígeno, nitrógeno, etc.) no debe exceder el 0.05%. En concreto, el contenido de hierro (Fe) $\leq 0,005\%$, el de níquel (Ni) $\leq 0,003\%$, el de carbono (C) $\leq 0,01\%$, el de oxígeno (O) $\leq 0,003\%$ y el de nitrógeno (N) $\leq 0,002\%$. Los requisitos de alta pureza garantizan que el alambre de molibdeno tenga una excelente estabilidad química en entornos de descarga de alta frecuencia y alta temperatura. Por ejemplo, en la electroerosión por hilo, el alambre de molibdeno de alta pureza puede reducir significativamente las pérdidas de electrodos durante la descarga, prolongar la vida útil y mejorar la eficiencia de corte. Además, el estricto control de los oligoelementos en el estándar también reduce la tendencia a la oxidación del alambre de molibdeno a altas temperaturas, lo que mejora su confiabilidad en entornos de procesamiento complejos.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Requisitos de propiedades mecánicas

La resistencia a la tracción y el alargamiento a la rotura del alambre de molibdeno se especifican en detalle en la norma. La resistencia a la tracción de la electroerosión por hilo de molibdeno en el rango de 0,05-0,3 mm y el alargamiento a la rotura deben alcanzar los 1800-2200 MPa, y el alargamiento a la rotura debe ser del $\geq 2\%$. Estos indicadores de rendimiento garantizan que el alambre de molibdeno pueda soportar el estrés mecánico continuo y el choque de descarga sin romperse durante el corte de alambre de alta resistencia. La norma también exige que el alambre de molibdeno se someta a un tratamiento térmico adecuado (como el recocido al vacío o el recocido con hidrógeno) durante el proceso de producción para optimizar su estructura cristalina y eliminar las tensiones internas generadas durante el proceso de trefilado, mejorando así la tenacidad y la resistencia a la fatiga.

Precisión dimensional y calidad de la superficie

GB/T 4182-2017 tiene requisitos extremadamente estrictos para la precisión dimensional del alambre de molibdeno, la tolerancia del diámetro debe controlarse dentro de ± 0.002 mm y el error de redondez ≤ 0.001 mm para garantizar la uniformidad del espacio de descarga y la estabilidad de la precisión del mecanizado en el proceso de corte de alambre. En términos de calidad de la superficie, la norma requiere que la rugosidad de la superficie del alambre de molibdeno sea $Ra \leq 0.05$ micras, y no debe haber grietas, rayones, óxidos, manchas de aceite u otros defectos microscópicos en la superficie. Estos requisitos son críticos para la estabilidad de la descarga y el acabado superficial de la electroerosión por hilo, especialmente cuando se mecanizan microestructuras o moldes de alta precisión, donde la calidad de la superficie del alambre de molibdeno afecta directamente la precisión geométrica y la rugosidad de la superficie de las piezas mecanizadas.

Métodos de prueba y control de calidad

La norma especifica en detalle los métodos de prueba para el alambre de molibdeno, incluido el análisis de composición química, las pruebas de propiedades mecánicas, la medición dimensional y las pruebas de calidad de la superficie. El análisis de la composición química utiliza instrumentos de alta precisión, como la espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) o la espectroscopia de absorción atómica (AAS) para garantizar una medición precisa del contenido de impurezas. La prueba de propiedades mecánicas utiliza una máquina de prueba de tracción en miniatura para medir la resistencia a la tracción y el alargamiento a la rotura con una precisión del $\pm 0.1\%$. La medición del tamaño adopta un instrumento de medición del diámetro del alambre láser, y la frecuencia de detección puede alcanzar las 1000 veces por segundo para garantizar la consistencia del diámetro. La inspección de calidad de la superficie combina un microscopio óptico (aumento de 1000x) y un detector de corrientes de Foucault para identificar defectos superficiales en el rango de 0,1 micras. La norma también requiere que los fabricantes establezcan un sistema de control de calidad sólido, que incluya pruebas de entrada de materias primas, monitoreo del proceso de producción e inspección de la fábrica de productos terminados, para garantizar la consistencia del rendimiento de cada lote de alambre de molibdeno.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Importancia de la aplicación

GB/T 4182-2017 proporciona una especificación técnica unificada para la producción de electroerosión por hilo de molibdeno y promueve la estandarización y el desarrollo a gran escala de la industria nacional de alambre de molibdeno. Los altos requisitos de esta norma han llevado a los fabricantes a optimizar la preparación de la materia prima, los procesos de trefilado y las técnicas de tratamiento de superficies para mejorar el rendimiento y la fiabilidad de los alambres de molibdeno. Además, la norma proporciona a los usuarios indicadores de rendimiento claros para la selección de materiales y la evaluación de la calidad en áreas como la fabricación de moldes, la industria aeroespacial y la electrónica.

7.1.2 GB/t 3462-2017

GB/T 3462-2017 "Varilla de molibdeno y alambre de molibdeno" es un estándar nacional general para varilla de molibdeno y alambre de molibdeno en China, que es adecuado para varios escenarios de aplicación como corte de alambre, fuente de luz eléctrica, pulverización térmica, etc. Sobre la base de GB/T 4182-2017, esta norma perfecciona aún más la clasificación, los requisitos de rendimiento y las especificaciones del proceso de producción del alambre de molibdeno.

Clasificación y especificaciones

La norma divide el alambre de molibdeno en tres categorías según su aplicación: alambre de molibdeno para corte de alambre, alambre de molibdeno para fuente de luz eléctrica y alambre de molibdeno para fines especiales. El rango de diámetro del alambre de molibdeno para el corte de alambre es de 0,05-0,3 mm, y el requisito de tolerancia de diámetro es de $\pm 0,002$ mm. La norma también clasifica la condición de la superficie del alambre de molibdeno, incluido el alambre negro (sin pulir con una capa de óxido en la superficie), el alambre blanco (electropulido con una superficie lisa) y el alambre recubierto (recubierto con emulsión de grafito u otro recubrimiento lubricante). Por ejemplo, el alambre blanco para electroerosión por hilo requiere una rugosidad superficial de $Ra \leq 0,02$ micras para mejorar la estabilidad de descarga, mientras que los alambres recubiertos deben garantizar un espesor de recubrimiento uniforme (1-2 micras) para reducir el coeficiente de fricción y prolongar la vida útil.

Propiedades mecánicas y tratamiento térmico

GB/T 3462-2017 requiere que la resistencia a la tracción del alambre de molibdeno para el corte de alambre sea de 1800-2300 MPa, y el alargamiento a la rotura sea de $\geq 1.5\%$. En comparación con GB/T 4182-2017, esta norma tiene requisitos de resistencia ligeramente superiores, lo que refleja las necesidades especiales de la electroerosión por hilo de molibdeno en un entorno de procesamiento de alta resistencia. La norma también especifica que el alambre de molibdeno debe ser recocido o tratado térmicamente al vacío en un rango de temperatura de 800-1200 °C y una atmósfera protectora de hidrógeno o alto vacío ($\leq 10^{-3}$ Pa) para eliminar las tensiones residuales durante el proceso de estirado y optimizar el tamaño del grano (normalmente controlado a 5-10 micras). La estandarización del proceso de tratamiento térmico garantiza la estabilidad del alambre de molibdeno en la descarga de alta frecuencia y el estiramiento mecánico, y reduce el riesgo de rotura del cable.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Requisitos de embalaje y almacenamiento

La norma establece requisitos detallados para el embalaje y almacenamiento de alambre de molibdeno, que debe ser un embalaje a prueba de humedad y oxidación, como bolsas de plástico al vacío o envases llenos de gas inerte (argón o nitrógeno), para evitar que el alambre de molibdeno se oxide o humedezca durante el transporte y el almacenamiento. El empaque debe estar marcado con la especificación, el número de lote, el peso y la longitud del alambre de molibdeno, por ejemplo, la longitud de cada carrete de alambre de molibdeno suele ser de 1000 a 3000 metros y el peso es de 0,5 a 2 kg. La norma también exige que el material de embalaje tenga suficiente resistencia a la compresión para evitar daños en el alambre de molibdeno durante el transporte. Estos requisitos garantizan que el alambre de molibdeno se entregue al usuario de la mejor manera.

Importancia de la aplicación

GB/T 3462-2017 proporciona orientación técnica específica para diferentes escenarios de aplicación al refinar los requisitos de clasificación y rendimiento del alambre de molibdeno. Por ejemplo, los requisitos de alta resistencia y acabado superficial del alambre de molibdeno para el corte de alambre lo hacen adecuado para el procesamiento de moldes de alta precisión; La estabilidad a alta temperatura del alambre de molibdeno para fuente de luz eléctrica satisface las necesidades de la fabricación de lámparas. La implementación de esta norma ha promovido la optimización del proceso de producción de alambre de molibdeno y ha promovido el desarrollo de la industria nacional de alambre de molibdeno en la dirección de alto rendimiento y alto valor agregado.

7.1.3 Otras normas relevantes de la industria

Además de las normas nacionales, China también ha formulado una serie de normas de la industria que establecen requisitos más específicos para el alambre de molibdeno en áreas de aplicación específicas. Estas normas desempeñan un papel importante en campos de alta tecnología como la industria aeroespacial, los dispositivos médicos y la industria electrónica.

YS/T 357-2006

Este estándar de la industria está desarrollado específicamente para alambre de molibdeno para electroerosión por hilo, con un enfoque en su composición química, precisión dimensional y calidad de superficie. La norma requiere un contenido de molibdeno de $\geq 99,95\%$, un contenido total de impurezas de $\leq 0,05\%$, una tolerancia de diámetro de $\pm 0,0015$ mm y una rugosidad superficial de $Ra \leq 0,02$ micras. La norma también establece requisitos para la resistencia al desgaste y la estabilidad del alambre de molibdeno en entornos de descarga de alta frecuencia, como al cortar carburo cementado o superaleación, la tasa de pérdida del alambre de molibdeno debe ser inferior al 0,1%. Además, la norma exige que el alambre de molibdeno esté electropulido o recubierto con emulsión de grafito para mejorar el acabado de la superficie y la lubricidad, reduciendo así las pérdidas desiguales de arcos y electrodos durante la descarga.

HB 7742-2004

Este estándar de la industria aeroespacial está dirigido a aplicaciones de alambre de molibdeno en el sector aeroespacial, enfatizando el rendimiento a altas temperaturas, la resistencia a la fatiga y la estabilidad dimensional. La norma requiere que el alambre de molibdeno mantenga propiedades

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

mecánicas estables en un entorno de alta temperatura de 1500 °C, con una resistencia a la tracción de ≥ 1800 MPa y una vida útil a la fatiga de ≥ 10 veces. En términos de calidad de la superficie, la norma requiere una rugosidad superficial de $Ra \leq 0,015$ micras y sin defectos microscópicos en la superficie para cumplir con los requisitos de alta precisión del procesamiento de piezas de motores aeronáuticos. La norma también establece requisitos específicos para el proceso de tratamiento térmico del alambre de molibdeno, como el tratamiento térmico en un entorno de vacío de 1600-1800 °C para optimizar la estructura cristalina y las propiedades mecánicas.

Otros estándares de la industria

En el campo de los dispositivos médicos, los estándares relevantes de la industria (como la serie YY/T) establecen requisitos más altos para la biocompatibilidad y la calidad de la superficie del alambre de molibdeno. Por ejemplo, el alambre de molibdeno médico necesita un tratamiento superficial especial (como pulido electrolítico y limpieza ultrasónica) para garantizar la no toxicidad y la baja rugosidad de la superficie ($Ra \leq 0,01$ micras), que es adecuado para el procesamiento de dispositivos médicos de alta precisión, como stents cardíacos y tornillos óseos. Además, en la industria electrónica, los estándares requieren alambre de molibdeno con consistencia dimensional y conductividad extremadamente altas para satisfacer las necesidades de procesamiento de moldes de semiconductores y conectores microelectrónicos.

Importancia de la aplicación

Estas normas de la industria complementan las deficiencias de las normas nacionales y plantean requisitos más precisos para las necesidades de aplicación de campos específicos. Por ejemplo, YS/T 357-2006 promueve la aplicación de electroerosión por hilo de molibdeno en el procesamiento de materiales de alta dureza; HB 7742-2004 garantiza la fiabilidad del alambre de molibdeno en el sector aeroespacial. La implementación de estos estándares no solo mejora la calidad del alambre de molibdeno, sino que también promueve el progreso tecnológico y la competitividad en el mercado de las industrias relacionadas.

7.2 Norma internacional para la electroerosión por hilo de molibdeno

Las normas internacionales proporcionan un marco técnico mundial para la producción y aplicación de alambre de molibdeno, que se utiliza ampliamente en el comercio transfronterizo, el intercambio de tecnología y la cooperación internacional. El siguiente es un análisis detallado de los requisitos de la norma internacional para la electroerosión por hilo de molibdeno basada en ASTM, ISO y otras normas internacionales.

7.2.1 Especificación estándar ASTM B387 para varillas, alambres y placas de molibdeno y aleaciones de molibdeno

ASTM B387 es un estándar para productos de molibdeno y aleaciones de molibdeno formulado por la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM), que se usa ampliamente en varios escenarios, como electroerosión por hilo de molibdeno, alambre de molibdeno de fuente de luz eléctrica y alambre de molibdeno por pulverización térmica. Esta norma establece requisitos detallados para la composición química, las propiedades mecánicas, la precisión dimensional y la calidad de la superficie del alambre de molibdeno.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Composición química y clasificación

ASTM B387 clasifica el alambre de molibdeno en varios grados, siendo el Tipo 361 (molibdeno de alta pureza, contenido de molibdeno $\geq 99.95\%$) siendo el tipo principal de alambre de molibdeno para el corte de alambre. La norma exige que el contenido total de elementos de impurezas sea $\leq 0,05\%$, incluido el $\leq 0,005\%$ de hierro (Fe), $0,003\% \leq$ níquel (Ni), $0,01\% \leq$ carbono (C), $0,005\% \leq$ oxígeno (O) y $0,002\% \leq$ nitrógeno (N). En comparación con la norma nacional, ASTM B387 tiene requisitos ligeramente menos estrictos para el contenido de oxígeno, pero el control de otras impurezas es igual de estricto. Los requisitos de alta pureza garantizan la estabilidad del alambre de molibdeno en entornos corrosivos y de alta temperatura, y son adecuados para la fabricación de electroerosión por hilo y fuentes de luz eléctrica.

Requisitos de propiedades mecánicas

La norma estipula que la resistencia a la tracción del alambre de molibdeno para el corte de alambre es de 1700-2200 MPa, y el alargamiento a la rotura es del $\geq 2\%$, y el rendimiento específico varía según el diámetro y la aplicación. Por ejemplo, el alambre de molibdeno con un diámetro de 0,1-0,2 mm debe tener una alta resistencia a la tracción (≥ 2000 MPa) para soportar la alta tensión durante el corte del alambre. La norma también requiere que el alambre de molibdeno se recoche a una temperatura de 800-1200 °C y una atmósfera protectora de hidrógeno o vacío para optimizar las propiedades mecánicas y la tenacidad. El proceso de recocido requiere un control estricto de la velocidad de calentamiento (5-10 °C/min) y el tiempo de retención (1-2 horas) para evitar un tamaño de grano excesivo o residuos de tensión interna.

Precisión dimensional y calidad de la superficie

ASTM B387 requiere una tolerancia de diámetro de alambre de molibdeno de ± 0.002 mm, un error de redondez de ≤ 0.001 mm, una rugosidad superficial de $Ra \leq 0.05$ micras y sin grietas, rasguños, óxidos u otros defectos en la superficie. Estos requisitos garantizan la uniformidad de la descarga y la precisión del mecanizado del alambre de molibdeno en la electroerosión por hilo. Además, la norma también establece requisitos para el tratamiento de la superficie del alambre de molibdeno, como el pulido electrolítico o la limpieza química para eliminar la capa de óxido de la superficie y mejorar el acabado de la superficie y la resistencia a la corrosión.

Pruebas y certificación

La norma especifica los métodos de detección de alambre de molibdeno, incluido el análisis de composición química (mediante espectroscopia de fluorescencia de rayos X o ICP-MS), las pruebas de propiedades mecánicas (utilizando una máquina de ensayo de microtracción), la medición dimensional (utilizando un instrumento de medición del diámetro del alambre láser) y las pruebas de calidad de la superficie (utilizando un microscopio óptico o un microscopio electrónico de barrido). Los resultados de las pruebas se registran en un certificado de calidad y se proporcionan al usuario para garantizar la trazabilidad de la calidad del producto. La norma también exige que los fabricantes calibren regularmente sus equipos de prueba para garantizar que la precisión de la medición cumpla con los requisitos (por ejemplo, los instrumentos de medición láser deben tener una precisión de $\pm 0,0001$ mm).

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Importancia de la aplicación

ASTM B387 proporciona una especificación técnica unificada para los fabricantes mundiales de alambre de molibdeno y promueve la circulación y aplicación del alambre de molibdeno en el mercado internacional. Los altos requisitos de esta norma han impulsado mejoras en los procesos de producción, como la aplicación de trefilado de alta precisión, tratamiento térmico al vacío y tecnología de pulido de superficies, que han mejorado el rendimiento y la confiabilidad del alambre de molibdeno. Además, la norma proporciona a los usuarios indicadores de rendimiento claros para la selección de materiales y la evaluación de la calidad en la industria aeroespacial, electrónica y fabricación de moldes.

7.2.2 Certificación del Sistema de Gestión de Calidad ISO 9001

ISO 9001 es un estándar de sistema de gestión de calidad formulado por la Organización Internacional de Normalización (ISO), aunque no es un estándar especial para el alambre de molibdeno, es ampliamente utilizado en la gestión de calidad de las empresas de producción de alambre de molibdeno para garantizar la estandarización del proceso de producción y la estabilidad de la calidad del producto.

Requisitos del sistema de gestión de calidad

La norma ISO 9001 exige a los fabricantes que establezcan un sistema de gestión de calidad integral, que abarque la adquisición de materias primas, el control del proceso de producción, las pruebas de productos, el embalaje y el transporte, y el servicio postventa. Para la producción de alambre de molibdeno, es necesario garantizar la capacidad de control de todo el proceso, desde la preparación del polvo de molibdeno, la sinterización, el trefilado, el tratamiento de superficies hasta el tratamiento térmico. La norma requiere que las empresas formulen un plan de control de calidad detallado, que incluya estándares de aceptación de materias primas, monitoreo de parámetros de producción, especificaciones de prueba de productos terminados, etc. Por ejemplo, el polvo de molibdeno de la materia prima debe someterse a un análisis de composición química y pruebas de tamaño de partícula, la tolerancia del diámetro y la calidad de la superficie deben monitorearse en tiempo real durante el proceso de trefilado, y el alambre de molibdeno terminado debe probarse para determinar la resistencia a la tracción y la rugosidad de la superficie.

Control de Procesos y Trazabilidad

La norma ISO 9001 hace hincapié en la trazabilidad del proceso de producción y exige a las empresas que registren los parámetros de producción (por ejemplo, velocidad de estirado, temperatura de recocido, proceso de tratamiento de superficies) y los datos de prueba (por ejemplo, tolerancia de diámetro, rugosidad de la superficie, resistencia a la tracción) de cada lote de alambre de molibdeno. Estos registros se conservan durante un mínimo de 3 años y pueden ponerse a disposición de los usuarios para realizar un seguimiento de la calidad de sus productos. Además, la norma exige a las empresas que realicen auditorías internas periódicas y revisiones de gestión para identificar posibles problemas en el proceso de producción e implementar mejoras. Por ejemplo, al analizar los datos sobre la tasa de rotura durante el proceso de estirado, las empresas pueden optimizar las formulaciones de lubricantes o los diseños de troqueles de estirado para mejorar la eficiencia de la producción.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Mejora continua y satisfacción del cliente

La norma exige que las empresas mejoren la calidad del producto y la satisfacción del cliente a través de la mejora continua. Por ejemplo, los fabricantes de alambre de molibdeno pueden reducir las tasas de rechazo y mejorar la consistencia del producto mediante la introducción de equipos de inspección automatizados, como instrumentos de medición de diámetro de alambre láser en línea, o la optimización de los procesos de tratamiento térmico. La norma ISO 9001 también exige que las empresas establezcan mecanismos de retroalimentación de los clientes para hacer frente a los problemas de calidad y mejorar los procesos de producción de manera oportuna, mejorando así la competitividad en el mercado.

Importancia de la aplicación

La certificación ISO 9001 proporciona un marco internacional de gestión de calidad para los fabricantes de alambre de molibdeno, lo que ayuda a mejorar la eficiencia de la producción y la calidad del producto. Por ejemplo, al implementar la norma ISO 9001, las empresas pueden reducir la tasa de fallas del alambre de molibdeno del 0,1% al 0,02% y acortar el ciclo de producción en un 20%. Además, la certificación ISO 9001 mejora la competitividad de la empresa en el mercado internacional, facilitando el acceso a mercados con estrictos requisitos de calidad como Europa, Estados Unidos y Japón.

7.2.3 Otras normas internacionales para productos de molibdeno

Además de ASTM B387 e ISO 9001, existen varias normas internacionales relacionadas con el alambre de molibdeno, que establecen requisitos más específicos para áreas de aplicación específicas.

JIS H 4461

La norma industrial japonesa (JIS H 4461) es adecuada para el alambre de molibdeno en fuentes de luz eléctrica, electroerosión por hilo y aplicaciones de alta temperatura. La norma requiere un contenido de molibdeno de $\geq 99,95\%$, un contenido total de impurezas de $\leq 0,05\%$, una resistencia a la tracción de 1700-2100 MPa y una tolerancia de diámetro de $\pm 0,002$ mm. La norma pone especial énfasis en la estabilidad del rendimiento del alambre de molibdeno en entornos de alta temperatura, como el mantenimiento de las propiedades mecánicas y la estabilidad dimensional a 1500 °C. JIS H 4461 también impone requisitos sobre el tratamiento de la superficie del alambre de molibdeno, como la eliminación de la capa de óxido de la superficie mediante pulido electrolítico o limpieza química, y la rugosidad de la superficie de $Ra \leq 0,03$ micras para cumplir con los altos requisitos de la fabricación de fuentes de luz eléctrica.

DIN EN 10204 "Documentación de inspección para productos metálicos"

Esta norma europea exige que los fabricantes de alambre de molibdeno proporcionen documentos de inspección para demostrar que el producto cumple con las especificaciones técnicas. Los tipos de documentos incluyen 2.1 (Declaración de conformidad), 3.1 (Certificación del fabricante) y 3.2 (Certificación de terceros). Para la electroerosión por hilo de molibdeno, el archivo de inspección debe contener datos de prueba sobre la composición química, las propiedades mecánicas, la precisión dimensional y la calidad de la superficie. Por ejemplo, el certificado 3.1 registrará la

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

resistencia a la tracción, la tolerancia del diámetro y la rugosidad de la superficie del alambre de molibdeno, y será firmado y confirmado por el departamento de calidad de la empresa. La norma DIN EN 10204 garantiza la trazabilidad de la calidad de los hilos de molibdeno y refuerza la confianza de los usuarios en sus productos.

ISO 22489 Análisis de microhaces - Microanálisis de microsonda

Esta norma se aplica al análisis de la superficie y la microestructura interna del alambre de molibdeno, especialmente en las industrias aeroespacial y electrónica. La norma especifica el uso de un microanalizador de sonda electrónica (EPMA) para detectar la composición química y los defectos microscópicos de los hilos de molibdeno con una precisión del 0,01%. Por ejemplo, con el análisis EPMA, el alambre de molibdeno se puede detectar en busca de óxidos o inclusiones en el rango de 0,1 micras en la superficie del alambre de molibdeno, optimizando así el proceso de tratamiento de la superficie. La norma ISO 22489 proporciona soporte técnico avanzado para la inspección de alambres de molibdeno de alta precisión.

Importancia de la aplicación

Estas normas internacionales proporcionan soporte técnico para la producción y aplicación global de alambre de molibdeno. Por ejemplo, JIS H 4461 promueve la producción estandarizada de alambre de molibdeno en el campo de la fuente de luz eléctrica y el corte de alambre; La norma DIN EN 10204 garantiza la trazabilidad de la calidad del producto; La norma ISO 22489 proporciona soporte técnico para el análisis microscópico de hilos de molibdeno de alta precisión. La implementación de estas normas ha promovido la amplia aplicación del alambre de molibdeno en los campos aeroespacial, electrónico y médico, y ha mejorado el nivel técnico general de la industria mundial del alambre de molibdeno.

7.3 Análisis comparativo estándar de la electroerosión por hilo de molibdeno

La diferencia entre los estándares nacionales y extranjeros afecta directamente el proceso de producción, el control de calidad y la aplicación en el mercado del alambre de molibdeno. A través del análisis comparativo, podemos comprender profundamente la aplicabilidad de las normas nacionales y extranjeras, los requisitos técnicos y su impacto en la calidad del producto.

7.3.1 Diferencias entre normas nacionales y extranjeras

Requisitos de composición química

Las normas nacionales (como GB/T 4182-2017, GB/T 3462-2017) exigen un contenido de molibdeno de $\geq 99,95\%$ y un contenido total de impurezas del $\leq 0,05\%$, que es básicamente coherente con los requisitos de ASTM B387 (Tipo 361). Sin embargo, las normas nacionales son más estrictas en el control de impurezas específicas (como el oxígeno y el nitrógeno), por ejemplo, GB/T 4182-2017 requiere un contenido de oxígeno $\leq 0,003\%$ y un contenido de nitrógeno $\leq 0,002\%$, mientras que ASTM B387 permite un contenido de oxígeno $\leq 0,005\%$ y un contenido de nitrógeno $\leq 0,003\%$. Esta diferencia refleja los requisitos de estabilidad más altos de los estándares nacionales para la electroerosión por hilo de molibdeno en entornos de descarga de alta frecuencia, especialmente cuando se procesan materiales de alta dureza (como carburo cementado y aleación de titanio), el bajo contenido de oxígeno puede reducir la pérdida del electrodo durante la descarga.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Requisitos de propiedades mecánicas

La norma nacional requiere que la resistencia a la tracción de la electroerosión por hilo de molibdeno sea de 1800-2300 MPa, que es ligeramente superior a los 1700-2200 MPa de ASTM B387. Esto se debe a que los equipos domésticos de electroerosión por corte de alambre generalmente adoptan configuraciones de alta tensión (tensión de hasta 2-3 N), que tiene requisitos más altos para la resistencia del alambre de molibdeno. Además, los requisitos de elongación a la rotura en el estándar nacional ($\geq 1.5\%$ - 2%) son ligeramente más bajos que los de ASTM B387 ($\geq 2\%$), lo que refleja el enfoque doméstico en la resistencia del alambre de molibdeno en lugar de la tenacidad. Esta diferencia conduce al hecho de que el alambre de molibdeno doméstico es más adecuado para el procesamiento de materiales de alta resistencia y alta dureza, mientras que el alambre de molibdeno estándar internacional tiene más ventajas en escenarios con requisitos de alta tenacidad (como la fabricación de fuentes de luz eléctrica).

Precisión dimensional y calidad de la superficie

Tanto las normas nacionales como las extranjeras exigen una tolerancia de diámetro de $\pm 0,002$ mm, pero las normas nacionales tienen requisitos más estrictos para la rugosidad de la superficie ($R_a \leq 0,02$ micras frente a $R_a \leq 0,05$ μm). Esto está relacionado con los requisitos más altos del corte de alambre EDM doméstico para la estabilidad de descarga y la precisión del mecanizado. Por ejemplo, al mecanizar microestructuras (como piezas MEMS), la baja rugosidad superficial requerida por las normas nacionales puede reducir significativamente el arco desigual durante la descarga y mejorar la calidad de la superficie de las piezas mecanizadas. Además, la norma nacional tiene un control más estricto de los defectos superficiales, requiriendo que la superficie esté libre de arañazos u óxidos microscópicos, mientras que ASTM B387 permite trazas de defectos superficiales ($< 0,1$ micras de diámetro).

Métodos de prueba y control de calidad

Los estándares nacionales e internacionales son básicamente los mismos en términos de métodos de detección, como ICP-MS para analizar la composición química, el instrumento de medición del diámetro del alambre láser para detectar la precisión dimensional, el microscopio óptico y el detector de corrientes de Foucault para detectar la calidad de la superficie. Sin embargo, las normas nacionales ponen más énfasis en las pruebas en línea y el control de calidad de todo el proceso. Por ejemplo, GB/T 4182-2017 requiere un monitoreo en tiempo real de las tolerancias del diámetro y la rugosidad de la superficie durante el trefilado y la preparación de la superficie, mientras que ASTM B387 se enfoca más en la inspección fuera de línea de productos terminados. Esta diferencia refleja los mayores requisitos de los fabricantes nacionales para la eficiencia y la consistencia de la producción, especialmente en la producción de alto volumen, donde la inspección en línea puede reducir significativamente la tasa de fallas.

Requisitos de embalaje y almacenamiento

Las normas nacionales (como GB/T 3462-2017) tienen requisitos más detallados para el embalaje y el almacenamiento, estipulando claramente que se requiere un embalaje al vacío o con gas inerte para evitar la oxidación o la humedad del filamento de molibdeno, y requiere que se marque el número de lote, la especificación y el peso. ASTM B387 tiene requisitos relativamente indulgentes

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

para el embalaje, requiriendo solo que el empaque proteja el alambre de molibdeno de daños físicos. Esta diferencia refleja el mayor enfoque de las normas nacionales en el almacenamiento a largo plazo y la estabilidad del transporte del alambre de molibdeno, especialmente en ambientes húmedos o de alta temperatura.

7.3.2 El impacto de las normas en la calidad del producto

Optimización del proceso de producción

Los estrictos requisitos de las normas nacionales y extranjeras han promovido la mejora continua del proceso de producción de alambre de molibdeno. Por ejemplo, los requisitos de GB/T 4182-2017 para bajo contenido de oxígeno han llevado a las empresas a adoptar hornos de sinterización de alto vacío y hornos de reducción de hidrógeno para reducir la oxidación del polvo de molibdeno y el alambre de molibdeno; Los requisitos de calidad de la superficie de ASTM B387 han impulsado el uso generalizado del electropulido, el recubrimiento en emulsión de grafito y las técnicas de limpieza ultrasónica. Estas mejoras en el proceso mejoran significativamente la estabilidad química, las propiedades mecánicas y el acabado superficial del alambre de molibdeno. Por ejemplo, al optimizar el proceso de recocido al vacío (1700 °C, manteniendo durante 1,5 horas), la resistencia a la tracción del alambre de molibdeno se puede aumentar de 1800 MPa a 2200 MPa, y la tasa de rotura se puede reducir en un 60%.

Calidad, consistencia y fiabilidad

Los requisitos estandarizados de la norma garantizan la consistencia y confiabilidad de la calidad del alambre de molibdeno. Por ejemplo, el sistema de gestión de calidad ISO 9001 requiere que las empresas establezcan un sistema de control de calidad de todo el proceso, desde la adquisición de materias primas hasta las pruebas del producto terminado, que debe registrarse y monitorearse, para reducir la tasa de fallas. El estricto control de los defectos superficiales en las normas nacionales (como YS/T 357-2006) ha llevado a las empresas a introducir equipos de prueba de alta precisión (como los microscopios electrónicos de barrido) para aumentar la tasa de detección de defectos superficiales a más del 99,5%. Estas medidas garantizan el rendimiento estable del alambre de molibdeno en aplicaciones como electroerosión por hilo, fuente de luz eléctrica y pulverización térmica.

Se mejora la competitividad en el mercado

El alambre de molibdeno que cumple con los estándares internacionales tiene una mayor competitividad en el mercado global. Por ejemplo, el alambre de molibdeno que cumple con las normas ASTM B387 y JIS H 4461 se puede ingresar directamente en los mercados europeo, estadounidense y japonés y es adecuado para su uso en los campos de semiconductores, aeroespacial y fuentes de luz eléctrica. La certificación ISO 9001 mejora aún más la reputación de la marca de la empresa y la confianza en el mercado, y promueve la exportación de alambre de molibdeno y la cooperación internacional. Además, los altos requisitos de las normas nacionales han llevado a las empresas locales a invertir en investigación y desarrollo tecnológico y control de calidad, lo que les permite competir con los líderes mundiales en el mercado internacional.

Ampliación de las áreas de aplicación

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Las normas estrictas promueven la amplia aplicación del alambre de molibdeno en campos de alta tecnología. Por ejemplo, la norma HB 7742-2004 garantiza el rendimiento a altas temperaturas y la resistencia a la fatiga del alambre de molibdeno en el campo aeroespacial, y es adecuada para el mecanizado de álabes de turbinas y piezas de aleación de titanio; La norma JIS H 4461 promueve la aplicación de alambre de molibdeno en la fabricación de fuentes de luz eléctrica para prolongar la vida útil de las lámparas; La norma ISO 22489 proporciona soporte técnico para el análisis microscópico de alambres de molibdeno, cumpliendo con los requisitos de ultra alta precisión en los sectores de semiconductores y dispositivos médicos. La implementación de estos estándares permite que el alambre de molibdeno satisfaga las necesidades de diferentes industrias para materiales de alto rendimiento y promueve el progreso tecnológico de las industrias relacionadas.

Innovación tecnológica y desarrollo de futuro

Los altos requisitos de las normas nacionales y extranjeras han estimulado la innovación continua de la tecnología de producción de alambre de molibdeno. Por ejemplo, para cumplir con los requisitos de GB/T 4182-2017 para la rugosidad de la superficie, la empresa ha desarrollado una nueva formulación de lechada de pulido electrolítico (ácido sulfúrico: ácido fosfórico = 3:1) para reducir la rugosidad de la superficie de Ra 0,05 micras a Ra 0,01 micras. Con el fin de cumplir con los requisitos de resistencia a la tracción de ASTM B387, la compañía ha introducido la tecnología de trefilado de múltiples pasadas y troqueles de trefilado de alta precisión, que mejoran significativamente las propiedades mecánicas del alambre de molibdeno. En el futuro, con el rápido desarrollo de las industrias de alta tecnología, los estándares de alambre de molibdeno se refinarán y unificarán aún más, y se promoverá el desarrollo de equipos de producción inteligentes, tecnología de pruebas automatizadas y procesos de producción ecológicos.



CTIA GROUP LTD electroerosión por hilo de molibdeno

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Capítulo 8 Métodos de detección de electroerosión por hilo de molibdeno

El rendimiento de la electroerosión por hilo de molibdeno afecta directamente a la precisión del mecanizado, la eficiencia y la fiabilidad del producto final. Para garantizar que el alambre de molibdeno cumpla con los estrictos requisitos de calidad, se requieren una serie de métodos de prueba avanzados para evaluar exhaustivamente su composición química, propiedades físicas, propiedades mecánicas, propiedades termofísicas, calidad de la superficie y adaptabilidad ambiental. Estos métodos de prueba no solo proporcionan una base para el control de calidad para los fabricantes, sino que también proporcionan a los usuarios un marco de referencia para la evaluación del rendimiento. Este capítulo discutirá en detalle los diversos métodos de detección de electroerosión por hilo de molibdeno y analizará en profundidad sus principios técnicos, requisitos de equipo, parámetros de proceso e importancia de la aplicación.

8.1 Ensayos de composición química de la electroerosión por hilo de molibdeno

Las pruebas de composición química son la base del control de calidad del alambre de molibdeno, que está diseñado para garantizar una alta pureza y un bajo contenido de impurezas del alambre de molibdeno para satisfacer las necesidades de aplicaciones de alta precisión, como la electroerosión por hilo. El siguiente es un análisis detallado desde dos aspectos: análisis espectral y detección de pureza de molibdeno.

8.1.1 Análisis espectroscópico (ICP-MS)

La espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) es un método de alta precisión para detectar la composición química de los alambres de molibdeno y se usa ampliamente para el análisis del contenido de molibdeno y trazas de impurezas.

Principio técnico

ICP-MS utiliza una muestra líquida para formar una muestra líquida disolviéndola en una solución ácida (por ejemplo, ácido nítrico o ácido clorhídrico), que luego se ioniza utilizando plasma (a una temperatura de aproximadamente 6.000-10.000 °C) y se analiza mediante espectrometría de masas para determinar la relación masa-carga de los iones. ICP-MS tiene límites de detección de hasta ppb (partes por billón) y es capaz de medir con precisión las trazas de impurezas en alambres de molibdeno como hierro (Fe), níquel (Ni), carbono (C), oxígeno (O), nitrógeno (N), etc. La norma exige un contenido de molibdeno de $\geq 99,95\%$ y un contenido total de impurezas del $\leq 0,05\%$, como un $0,005\% \leq$ hierro y un $0,003\%$ de oxígeno \leq .

Parámetros de equipos y procesos

Los equipos ICP-MS modernos, como el Agilent 7900 o el Thermo Fisher iCAP Q, están equipados con un espectrómetro de masas de alta resolución y un sistema de muestreo automatizado con una precisión analítica del $\pm 0,001\%$. La preparación de la muestra debe realizarse en un entorno ultralimpio para evitar la contaminación del mundo exterior. Durante la prueba, la potencia del plasma suele ser de 1200-1500 W, el caudal de gas portador (argón) es de 0,8-1,2 L/min y el tiempo de análisis es de 5-10 minutos. Para mejorar la eficiencia de detección, se puede adoptar el modo de análisis simultáneo de múltiples elementos, que cubre molibdeno y más de 10 elementos de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

impurezas.

Optimización de procesos y desafíos

La disolución del alambre de molibdeno requiere el uso de ácidos de alta pureza (ácido nítrico de grado electrónico o ácido clorhídrico) para evitar la introducción de impurezas adicionales. Durante la prueba, es necesario calibrar el instrumento y utilizar la muestra estándar de molibdeno de alta pureza (pureza $\geq 99,999\%$) como referencia para garantizar la precisión de los resultados de la medición. Además, la detección de elementos no metálicos como el oxígeno y el nitrógeno requiere un módulo de detección especial (por ejemplo, una celda de reacción de colisión) para eliminar la interferencia del argón. La alta sensibilidad de ICP-MS le permite detectar impurezas en el rango de 0,1 ppb, cumpliendo con los requisitos del alambre de molibdeno de alta precisión para EDM.

Importancia de la aplicación

La detección de ICP-MS garantiza una alta pureza del alambre de molibdeno y reduce el impacto de las impurezas en la estabilidad de la descarga de electroerosión por hilo y la pérdida de electrodos. Por ejemplo, el bajo contenido de oxígeno puede reducir la tendencia a la oxidación del alambre de molibdeno en la descarga a alta temperatura y prolongar la vida útil; El bajo contenido de hierro reduce el arco desigual durante el proceso de descarga y mejora la precisión del mecanizado. ICP-MS también proporciona datos trazables para la certificación de calidad del alambre de molibdeno, que cumple con los requisitos de normas como GB/T 4182-2017 y ASTM B387.

8.1.2 Ensayo de pureza del molibdeno

La prueba de pureza del molibdeno es una medición precisa del contenido del componente principal del alambre de molibdeno (molibdeno), generalmente en combinación con métodos como ICP-MS, espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) o espectroscopia de absorción atómica (AAS).

Principio técnico

Las pruebas de pureza del molibdeno verifican si cumple con los requisitos estándar de más del 99,95% mediante el análisis del contenido relativo de molibdeno. XRF excita la superficie del alambre de molibdeno mediante rayos X, analiza la intensidad del espectro de fluorescencia y determina el contenido de molibdeno e impurezas, lo cual es adecuado para una detección rápida y no destructiva. AAS determina con precisión el contenido de molibdeno midiendo la absorción de átomos de molibdeno por una longitud de onda específica de luz, con una precisión de detección del $\pm 0,01\%$. Ambos métodos deben combinarse con ICP-MS para mejorar la exhaustividad y la precisión del ensayo.

Parámetros de equipos y procesos

Los equipos XRF (por ejemplo, el Bruker S8 TIGER) utilizan una fuente de rayos X de alta energía (50 kV, 1 mA) con un tiempo de inspección de 1 a 3 minutos, lo que los hace adecuados para la inspección en línea. Los dispositivos AAS, como el PerkinElmer PinAAcle 900, utilizan una lámpara de cátodo hueco de molibdeno con una longitud de onda de 313,3 nm y un límite de detección de 0,01 ppm. La preparación de la muestra consiste en cortar el alambre de molibdeno en pequeños segmentos (1-2 cm) y limpiar la superficie para eliminar el aceite y los óxidos y garantizar

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

resultados fiables.

Optimización de procesos y desafíos

Las pruebas de pureza del molibdeno requieren un control estricto de las condiciones ambientales para evitar la humedad o la oxidación de la muestra. Las pruebas XRF requieren la calibración del instrumento utilizando una muestra estándar de molibdeno de alta pureza (certificada por el NIST) como referencia; La detección de AAS debe optimizar la temperatura de la llama (aproximadamente 2700 °C) y el flujo de gas (acetileno 2 L/min, aire 10 L/min) para mejorar la sensibilidad de la medición. Durante el proceso de detección, se debe prestar especial atención a la interferencia de elementos no metálicos como el carbono y el oxígeno, y las impurezas de la superficie se pueden eliminar mediante un pretratamiento químico (como el decapado).

Importancia de la aplicación

Las pruebas de pureza del molibdeno son el eslabón central del control de calidad, que afecta directamente el rendimiento del alambre de molibdeno en el electroerosión por hilo. El alambre de molibdeno de alta pureza ($\geq 99.95\%$) tiene una excelente conductividad y resistencia a altas temperaturas, lo que puede mantener la estabilidad en entornos de descarga de alta frecuencia y reducir las pérdidas de electrodos. Los resultados de las pruebas también proporcionan datos para respaldar la optimización del proceso de producción de alambre de molibdeno, por ejemplo, mediante el análisis de la fuente de impurezas, lo que puede mejorar la reducción de polvo de molibdeno y el proceso de sinterización.

8.2 Ensayo de las propiedades físicas de la electroerosión por hilo de molibdeno

Las pruebas de propiedades físicas se utilizan para evaluar la precisión dimensional y las propiedades de la superficie del alambre de molibdeno para garantizar que cumpla con los requisitos de alta precisión y calidad de la superficie del electroerosión por hilo. El siguiente es un análisis detallado desde dos aspectos: medición del diámetro y la tolerancia del alambre, y prueba de rugosidad superficial.

8.2.1 Medición del diámetro y la tolerancia del alambre

La medición del diámetro y la tolerancia del alambre es una prueba clave para garantizar la consistencia dimensional del alambre de molibdeno, lo que afecta el espacio de descarga y la precisión del mecanizado en el proceso de corte del alambre.

Principio técnico

La medición del diámetro del cable generalmente utiliza tecnología de medición láser sin contacto, que escanea la superficie del cable de molibdeno a través de un rayo láser para obtener datos de diámetro con una precisión de ± 0.0001 mm. La norma (como GB/T 4182-2017) exige que la tolerancia del diámetro de la electroerosión por hilo de molibdeno sea de $\pm 0,002$ mm y el error de redondez $\leq 0,001$ mm. Durante el proceso de medición, se debe considerar la influencia de la ovalidad y las irregularidades de la superficie del alambre de molibdeno en los resultados.

Parámetros de equipos y procesos

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Los medidores de diámetro de alambre láser, como el Keyence LS-9000, están equipados con un sistema de escaneo láser de alta frecuencia con una frecuencia de medición de hasta 1000 veces/seg y son adecuados para inspecciones en línea y fuera de línea. El dispositivo debe calibrarse según el filamento estándar (error de diámetro $\pm 0,00005$ mm) para garantizar la precisión de la medición. Durante la inspección, el alambre de molibdeno pasa a través del área de medición a una velocidad de 5-20 m/min y la temperatura ambiente se controla a 20 ± 2 °C para evitar los efectos de la expansión térmica.

Optimización de procesos y desafíos

Las pruebas en línea deben garantizar la estabilidad operativa del alambre de molibdeno y evitar errores de medición causados por cambios de vibración o tensión. Para la detección fuera de línea, es necesario muestrear y medir alambres de molibdeno de múltiples segmentos (10-20 metros por sección), y se cuentan el diámetro medio y la desviación estándar para garantizar la consistencia. Durante el proceso de inspección, la lente láser debe limpiarse regularmente para evitar la interferencia del polvo. Para aumentar la eficiencia, la tecnología de medición simultánea multipunto se puede utilizar para inspeccionar simultáneamente múltiples secciones transversales de alambres de molibdeno.

Importancia de la aplicación

La medición precisa del diámetro del alambre y la tolerancia garantiza la uniformidad del espacio de descarga del alambre de molibdeno en el corte del alambre EDM, evitando desviaciones durante el procesamiento. Por ejemplo, el alambre de molibdeno con una tolerancia de diámetro de ± 0.0015 mm puede controlar la tolerancia de mecanizado dentro de ± 0.005 mm, lo que satisface las necesidades de moldes de alta precisión y procesamiento de microestructuras. Los datos medidos también proporcionan la base para la optimización del proceso de trefilado, por ejemplo, mediante el análisis de las desviaciones de diámetro, el ajuste del tamaño del orificio del troquel de trefilado o la formulación del lubricante.

8.2.2 Ensayo de rugosidad superficial

La prueba de rugosidad superficial se utiliza para evaluar el acabado de la superficie del alambre de molibdeno, lo que afecta directamente la estabilidad de descarga y la calidad de la superficie de las piezas mecanizadas en el corte de alambre.

Principio técnico

Las pruebas de rugosidad de la superficie generalmente se realizan utilizando un método de contacto o sin contacto. Los métodos de contacto (por ejemplo, perfilómetros) escanean la superficie del alambre de molibdeno con una sonda, miden el cambio en la altura de la superficie y calculan el valor Ra (rugosidad media aritmética). Los métodos sin contacto, como la microscopía láser, analizan la topografía de la superficie por reflexión láser con una precisión de 0,001 micras. La norma requiere una rugosidad superficial de $Ra \leq 0,02$ micras para la electroerosión por hilo de molibdeno para garantizar una descarga uniforme y un rendimiento de baja fricción.

Parámetros de equipos y procesos

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Los perfiladores de contacto (por ejemplo, Mitutoyo SJ-410) están equipados con una sonda de diamante con una velocidad de escaneo de 0,5-1 mm/s y una longitud de medición de 2-5 mm. Los microscopios láser sin contacto, como el Keyence VK-X1000, emplean un láser de 405 nm con un aumento de 1000-2000x y una precisión de medición de $\pm 0,002 \mu\text{m}$. Durante la inspección, el alambre de molibdeno debe fijarse en una plataforma sin vibraciones y la humedad ambiental debe controlarse al 40-60% para evitar la influencia de la humedad.

Optimización de procesos y desafíos

La prueba de rugosidad de la superficie garantiza que la superficie del alambre de molibdeno esté limpia, libre de aceite u óxidos, y que la muestra pueda ser tratada previamente con limpieza ultrasónica (frecuencia 40 kHz, tiempo de 5 minutos). La prueba de contacto debe controlar la presión de la sonda (0,1-0,5 mN) para evitar rayar la superficie del alambre de molibdeno; Las pruebas sin contacto requieren la calibración de la distancia focal del láser para garantizar la precisión de los datos topográficos. Durante el proceso de detección, es necesario muestrear y probar el alambre de molibdeno de múltiples segmentos (5-10 cm por segmento), y se cuenta el rango de distribución del valor Ra.

Importancia de la aplicación

El alambre de molibdeno con baja rugosidad superficial puede reducir el arco desigual en el corte de alambre EDM, mejorar la estabilidad de descarga y la precisión del mecanizado. Por ejemplo, un alambre de molibdeno $\leq 0,015$ micras puede controlar la rugosidad de la superficie de las piezas mecanizadas por debajo de Ra 0,1 micras, lo que cumple con los requisitos de los moldes de lentes ópticas y las piezas semiconductoras. Los datos de prueba también proporcionan una base para la optimización de los procesos de tratamiento de superficies, como el electropulido.

8.3 Ensayo de las propiedades mecánicas de la electroerosión por hilo de molibdeno

Las pruebas de propiedades mecánicas se utilizan para evaluar la resistencia y tenacidad del alambre de molibdeno para garantizar que no se rompa ni se deforme en un entorno de corte de alambre de alta resistencia. Se analiza desde dos aspectos: ensayo de resistencia a la tracción, ensayo de elongación y ensayo de curvatura.

8.3.1 Ensayo de resistencia a la tracción

La prueba de resistencia a la tracción es un método central para evaluar las propiedades mecánicas del alambre de molibdeno, lo que refleja su capacidad para soportar cargas de tracción.

Principio técnico

La prueba de resistencia a la tracción calcula la resistencia a la tracción (unidad: MPa) fijando el alambre de molibdeno en una máquina de prueba de tracción, aplicando una fuerza de tracción que aumenta gradualmente y midiendo la carga máxima antes de la rotura. La norma requiere una resistencia a la tracción de 1800-2300 MPa para la electroerosión por hilo de molibdeno para satisfacer las necesidades de corte de hilo de alta tensión (2-3 N). La prueba también mide la deformación en el punto de rotura y evalúa la tenacidad del alambre de molibdeno.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Parámetros de equipos y procesos

Las máquinas de ensayo de microtracción (por ejemplo, Instron 5948) están diseñadas para hilos de molibdeno de diámetro fino con un rango de ensayo de 0,1-100 N y una precisión de $\pm 0,1\%$. El accesorio está envuelto con un material suave como caucho o PTFE para evitar daños en el alambre de molibdeno durante el proceso de sujeción. La velocidad de prueba es de 1-5 mm/min, la longitud de la muestra es de 50-100 mm y la temperatura ambiente se controla a 20 ± 2 °C para garantizar resultados consistentes.

Optimización de procesos y desafíos

La prueba debe garantizar que el alambre de molibdeno esté sujetado de manera uniforme para evitar fracturas prematuras causadas por concentraciones de tensión locales. Las muestras se seleccionan al azar (10-20 muestras por lote) cubriendo diferentes etapas de producción para evaluar la consistencia del rendimiento. Durante la prueba, se registra la curva de tensión-deformación para analizar el módulo elástico (aproximadamente 320 GPa) y el comportamiento de fractura del alambre de molibdeno. Para aumentar la eficiencia, los sistemas de prueba automatizados se pueden utilizar para registrar y analizar datos en tiempo real.

Importancia de la aplicación

El alambre de molibdeno con alta resistencia a la tracción puede soportar la alta tensión y el impacto de descarga durante el proceso de corte del alambre, lo que reduce el riesgo de rotura del alambre. Por ejemplo, el alambre de molibdeno con una resistencia a la tracción de 2200 MPa puede ser estable y tener una larga vida útil en el mecanizado de materiales de alta dureza como el carburo cementado. Los datos de prueba también proporcionan la base para la optimización del proceso de tratamiento térmico, por ejemplo, ajustando la temperatura de recocido (1000-1200 °C), lo que puede aumentar la resistencia a la tracción en un 10-15%.

8.3.2 Ensayo de elongación y curvatura

Las pruebas de elongación y curvatura se utilizan para evaluar la tenacidad y las propiedades de bobinado del alambre de molibdeno, lo que afecta su idoneidad para el bobinado y el corte de alambre.

Principio técnico

La prueba de elongación calcula el alargamiento a la rotura (1,5%-2% según lo requerido por la norma) midiendo el alargamiento del alambre de molibdeno antes de la rotura. La prueba de curvatura evalúa la flexibilidad del alambre de molibdeno enrollándolo alrededor de un mandril estándar (1-5 mm de diámetro) para ver si aparecen grietas o fracturas. La combinación de los dos refleja la capacidad de deformación y la estabilidad del bobinado del alambre de molibdeno en un entorno de alta resistencia.

Parámetros de equipos y procesos

La prueba de elongación utiliza una máquina de prueba de tracción en miniatura en las mismas condiciones que la prueba de resistencia a la tracción y registra el alargamiento antes de la rotura (precisión $\pm 0,01$ mm). La prueba de curvatura utiliza un dispositivo de bobinado especial y el

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

diámetro del mandril se selecciona de acuerdo con la especificación del alambre de molibdeno (por ejemplo, se usa un mandril de 2 mm para el alambre de molibdeno de 0,18 mm). La prueba debe llevarse a cabo en un entorno libre de vibraciones con una velocidad de bobinado de 10-20 ciclos por minuto y un ciclo de bobinado de 5-10 vueltas.

Optimización de procesos y desafíos

La prueba de elongación debe garantizar que la superficie del alambre de molibdeno esté libre de defectos y que la muestra se trate previamente con limpieza ultrasónica. La prueba de velocidad de curvatura necesita controlar la tensión del devanado (0.1-0.5 N) para evitar rayar el alambre de molibdeno en la superficie de la varilla del mandril. Durante la prueba, es necesario muestrear alambres de molibdeno de múltiples segmentos y se debe contar la tasa de defectos de elongación y rizo para garantizar un rendimiento constante. Con el fin de mejorar la precisión de la prueba, se puede utilizar la tecnología de análisis de imágenes digitales para registrar la deformación microscópica durante el proceso de bobinado.

Importancia de la aplicación

El alambre de molibdeno con alta elongación y curvatura tiene excelentes propiedades de tenacidad y bobinado, y es adecuado para máquinas de corte de alambre de alta precisión y fabricación de fuentes de luz eléctrica. Por ejemplo, un alambre de molibdeno con un alargamiento del 2% se puede estabilizar a alta tensión (3 N), reduciendo la rotura del cable; El alambre de molibdeno con curvatura calificada se puede enrollar suavemente en una bobina de 2000 metros de largo para satisfacer las necesidades de procesamiento continuo.

8.4 Ensayos de las propiedades termofísicas de la electroerosión por hilo de molibdeno

La prueba de rendimiento termofísico se utiliza para evaluar la estabilidad y la conductividad eléctrica y térmica del alambre de molibdeno en entornos de alta temperatura, lo que afecta su efecto de aplicación en la electroerosión por hilo y la fuente de luz eléctrica.

8.4.1 Ensayo de estabilidad a alta temperatura

La prueba de estabilidad a alta temperatura se utiliza para evaluar las propiedades mecánicas y la estabilidad estructural del alambre de molibdeno en un entorno de alta temperatura.

Principio técnico

La prueba mide la resistencia a la tracción, el alargamiento y la estructura cristalina del alambre de molibdeno exponiéndolo a un entorno de alta temperatura (1000-1800 °C). La norma requiere que el alambre de molibdeno mantenga una resistencia a la tracción de ≥ 1800 MPa a 1500 °C, sin crecimiento u oxidación de grano evidentes. La prueba generalmente se realiza en un entorno de vacío o gas inerte (argón o hidrógeno) para evitar la oxidación.

Parámetros de equipos y procesos

Los hornos de prueba de alta temperatura (por ejemplo, Carbolite Gero HTF 1800) están equipados con elementos calefactores de molibdeno o tungsteno, con una precisión de control de temperatura de ± 5 °C y un nivel de vacío de $\leq 10^{-3}$ Pa. La longitud de la muestra de prueba fue de 50-100 mm,

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

la velocidad de calentamiento fue de 5-10 °C / min y el tiempo de retención fue de 1-2 horas. Después de la prueba, el tamaño de grano se analizó por difracción de rayos X (DRX) y la topografía de la superficie se observó por microscopía electrónica de barrido (SEM).

Optimización de procesos y desafíos

La prueba requiere un control estricto de la atmósfera protectora para evitar la infiltración de oxígeno y la oxidación del alambre de molibdeno. La muestra debe calentarse uniformemente para evitar el crecimiento anormal del grano causado por el sobrecalentamiento local. Durante la prueba, se debe registrar la curva de temperatura-tiempo para analizar la estabilidad térmica del alambre de molibdeno. Para aumentar la eficiencia, se puede utilizar un sistema de prueba multicanal para probar varios cables de molibdeno al mismo tiempo.

Importancia de la aplicación

Las pruebas de estabilidad a alta temperatura garantizan la confiabilidad del alambre de molibdeno en la fabricación de electroerosión por hilo y fuentes de luz eléctrica. Por ejemplo, el alambre de molibdeno estabilizado a 1500 °C se puede utilizar para procesar piezas de superaleación y prolongar la vida útil del electrodo; Los datos de prueba también proporcionan una base para la optimización del proceso de tratamiento térmico, por ejemplo, ajustando la temperatura de recocido, que puede controlar el tamaño de grano de 5 a 10 micras.

8.4.2 Ensayos de conductividad eléctrica y térmica

Las pruebas de conductividad eléctrica y térmica se utilizan para evaluar las propiedades eléctricas y térmicas del alambre de molibdeno, lo que afecta su eficiencia en la electroerosión.

Principio técnico

La prueba de conductividad mide la resistividad del alambre de molibdeno midiendo la resistividad del alambre de molibdeno mediante un método de cuatro sondas y calcula la conductividad (el estándar requiere alrededor de 18 MS / m). La prueba de conductividad térmica calcula la conductividad térmica midiendo la difusividad térmica midiendo el método de destello láser (el estándar requiere alrededor de 138 W / m·K). La combinación de los dos refleja las capacidades de transferencia de corriente y difusión de calor del cable de molibdeno en descarga de alta frecuencia.

Parámetros de equipos y procesos

Las pruebas de conductividad utilizan un medidor de resistividad de cuatro sondas (por ejemplo, Keithley 2635B) con un espaciado de sondas de 0,5-1 mm y un rango de corriente de 1-10 mA con una precisión de medición de $\pm 0,01\%$. La prueba de conductividad térmica utiliza un analizador de flash láser (por ejemplo, Netzsch LFA 467) con una energía de pulso láser de 10-20 J, un espesor de muestra de 0,1-0,3 mm y una temperatura de prueba de 20-1000 °C.

Optimización de procesos y desafíos

La prueba debe garantizar que la superficie del alambre de molibdeno esté limpia y que la capa de óxido o la contaminación por aceite no afecten la medición de la resistividad. La prueba de conductividad térmica requiere la calibración del espesor de la muestra con un error de $\pm 0,001$ mm.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Durante la prueba, se debe registrar la influencia de la temperatura en la conductividad eléctrica y térmica, y se debe analizar el cambio de rendimiento del alambre de molibdeno en la descarga a alta temperatura. Para aumentar la eficiencia, se pueden utilizar sistemas de prueba automatizados para registrar datos en tiempo real.

Importancia de la aplicación

El alambre de molibdeno con alta conductividad eléctrica y térmica puede mejorar la eficiencia de descarga del electroerosión por hilo y reducir la acumulación de calor. Por ejemplo, un alambre de molibdeno con una conductividad de 18 MS/m puede reducir la pérdida de energía de descarga en un 10%; El alambre de molibdeno con una conductividad térmica de 138 W/m·K puede disipar rápidamente el calor y prolongar la vida útil del electrodo. Los datos de prueba también proporcionan una base para la selección de materiales y la optimización del proceso de alambre de molibdeno.

8.5 Inspección de la calidad de la superficie de la electroerosión por hilo de molibdeno

La inspección de la calidad de la superficie se utiliza para evaluar los defectos microscópicos y el acabado de la superficie del alambre de molibdeno, lo que afecta directamente la estabilidad de la descarga y la precisión del mecanizado.

8.5.1 Observación microscópica

La microscopía es un método común para detectar defectos superficiales en alambres de molibdeno, lo que permite la identificación de rasguños, grietas y óxidos a nivel de micras.

Principio técnico

La morfología de la superficie del alambre de molibdeno se observa mediante un microscopio óptico a gran aumento (1000-2000x) para identificar defectos en el rango de 0,1 micras. La microscopía electrónica de barrido (SEM) proporciona una mayor resolución (0,01 micras) a través del barrido por haz de electrones para analizar la microestructura de la superficie y la distribución elemental. La norma requiere que la superficie del alambre de molibdeno esté libre de grietas, arañazos u óxidos, y que la rugosidad sea de $Ra \leq 0,02$ micras.

Parámetros de equipos y procesos

Los microscopios ópticos (por ejemplo, Zeiss Axio Observer) están equipados con una cámara CCD con un aumento de 1000x y un campo de visión de 0,1-1 mm. Los SEM (por ejemplo, JEOL JSM-7800F) utilizan un haz de electrones de 5-15 kV con una velocidad de escaneo de 1-10 seg/fotograma. Antes de la prueba, el alambre de molibdeno debe limpiarse por ultrasonidos (frecuencia 40 kHz, tiempo de tiempo 5 minutos) para eliminar el aceite y el polvo de la superficie.

Optimización de procesos y desafíos

La prueba debe realizarse en un entorno libre de vibraciones y polvo para evitar interferencias externas. El microscopio óptico necesita calibrar la intensidad de la fuente de luz para garantizar que la imagen sea clara; SEM necesita optimizar la energía del haz de electrones para evitar daños en la superficie del cable de molibdeno. Durante la prueba, se deben muestrear múltiples segmentos

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

de alambre de molibdeno (5-10 cm por sección) y se debe contar la distribución e incidencia de defectos.

Importancia de la aplicación

La observación microscópica garantiza que la superficie del alambre de molibdeno sea lisa y esté libre de defectos microscópicos, y reduce el arco desigual en el electroerosión por hilo. Por ejemplo, el alambre de molibdeno sin arañazos en el rango de 0,1 micras puede controlar la rugosidad de la superficie de la pieza mecanizada por debajo de Ra 0,1 micras, lo que cumple con los requisitos de los moldes de alta precisión. Los datos de prueba también proporcionan una base para la optimización de los procesos de tratamiento de superficies, como el electropulido.

8.5.2 Técnicas de ensayos no destructivos (ultrasonidos, corrientes de Foucault)

La tecnología de pruebas no destructivas se utiliza para detectar defectos microscópicos en la superficie y en el interior de los alambres de molibdeno para garantizar una calidad constante.

Principio técnico

Las pruebas ultrasónicas detectan inclusiones, porosidad o grietas dentro de los cables de molibdeno mediante la propagación de ondas sonoras de alta frecuencia (1-10 MHz) a una profundidad de hasta 0,01 mm. Las pruebas de corrientes de Foucault utilizan la inducción electromagnética para identificar defectos superficiales y cercanos a la superficie (por ejemplo, arañazos en el rango de 0,1 micras) con una sensibilidad de 0,05 micras. La combinación de los dos permite una evaluación completa de la calidad del alambre de molibdeno.

Parámetros de equipos y procesos

Los detectores ultrasónicos, como el Olympus EPOCH 650, utilizan una sonda de 5 MHz con un acoplante de agua de alta pureza y una velocidad de escaneo de 10-20 mm/s. Los detectores de corrientes de Foucault (por ejemplo, Eddyfi Ectane 2) utilizan una frecuencia de excitación de 100 kHz-1 MHz con un espaciado de sonda de 0,1-0,5 mm. La prueba debe realizarse en un entorno de temperatura constante (20 ± 2 °C) para evitar que las fluctuaciones de temperatura afecten los resultados.

Optimización de procesos y desafíos

Las pruebas ultrasónicas deben optimizar la uniformidad del recubrimiento del acoplante para evitar la interferencia de burbujas. Las pruebas de corrientes de Foucault requieren la calibración de la sensibilidad de la sonda para garantizar la detección de defectos en el rango de 0,1 micras. Durante la prueba, el alambre de molibdeno multisegmento debe escanearse continuamente para calcular la incidencia y distribución de defectos. Para aumentar la eficiencia, se puede utilizar un sistema de escaneo automatizado para registrar los datos de defectos en tiempo real.

Importancia de la aplicación

La tecnología de pruebas no destructivas garantiza que el alambre de molibdeno esté libre de defectos internos y superficiales, lo que mejora su confiabilidad en el corte de alambre de alta precisión. Por ejemplo, las pruebas de corrientes de Foucault pueden identificar arañazos

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

superficiales en el rango de 0,05 micras para reducir la descarga desigual, mientras que las pruebas ultrasónicas pueden detectar inclusiones internas de hasta 0,01 milímetros de profundidad, lo que reduce el riesgo de rotura de cables. Los datos de prueba proporcionan la base para la optimización de los procesos de dibujo y tratamiento de superficies.

8.6 Ensayo de adaptabilidad ambiental de la electroerosión por hilo de molibdeno

Las pruebas de idoneidad ambiental se utilizan para evaluar el rendimiento del alambre de molibdeno en entornos corrosivos o de alta temperatura, lo que afecta su estabilidad en condiciones de procesamiento complejas.

8.6.1 Ensayo de resistencia a la corrosión

Las pruebas de resistencia a la corrosión se utilizan para evaluar la estabilidad del alambre de molibdeno en medios corrosivos como ácidos, álcalis o soluciones salinas.

Principio técnico

La prueba mide la tasa de pérdida de masa o el grado de corrosión de la superficie sumergiendo el alambre de molibdeno en un medio corrosivo (por ejemplo, una solución de NaCl al 5% o una solución de HNO₃ al 10%). La norma requiere que la tasa de pérdida de masa del alambre de molibdeno en la prueba de corrosión de 24 horas sea del $\leq 0.01\%$ y que no haya rastros de corrosión obvios en la superficie. La prueba también se puede combinar con métodos electroquímicos para medir el potencial de corrosión y la densidad de corriente del alambre de molibdeno.

Parámetros de equipos y procesos

Las cámaras de prueba de corrosión (por ejemplo, Q-FOG CCT) controlan la temperatura 40-60 °C, la humedad 80-95%, el tiempo de prueba 24-72 horas. Los potencióstatos (por ejemplo, Gamry Interface 1010E) utilizan un sistema de tres electrodos (alambre de molibdeno como electrodo de trabajo, electrodo de platino como electrodo auxiliar y electrodo de calomel saturado como electrodo de referencia) con un rango de potencial de prueba de -1 a 1 V y una velocidad de escaneo de 1 mV/s.

Optimización de procesos y desafíos

Las pruebas se realizan para garantizar la pureza de los medios y evitar la interferencia de las impurezas. Las pruebas electroquímicas requieren la calibración de la distancia entre electrodos (1-2 mm) para garantizar la precisión de la medición. Durante la prueba, se deben registrar la velocidad de corrosión y los cambios en la morfología de la superficie, y se debe analizar el mecanismo de resistencia a la corrosión del alambre de molibdeno. Para aumentar la eficiencia, se puede utilizar un sistema de prueba multicanal para probar varios cables de molibdeno al mismo tiempo.

Importancia de la aplicación

El alambre de molibdeno con alta resistencia a la corrosión se puede estabilizar en ambientes húmedos o ácidos, lo que lo hace adecuado para escenarios de corte de alambre con refrigerante corrosivo. Por ejemplo, un alambre de molibdeno que ha pasado la prueba de resistencia a la corrosión puede funcionar de forma continua durante 100 horas en un refrigerante que contenga un

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

5% de NaCl sin ningún rastro de corrosión en la superficie. Los datos de prueba proporcionan una base para el diseño de recubrimientos superficiales (por ejemplo, emulsión de grafito) de alambre de molibdeno.

8.6.2 Ensayo de oxidación a alta temperatura

La prueba de oxidación a alta temperatura se utiliza para evaluar la resistencia a la oxidación del alambre de molibdeno en un entorno de aire a alta temperatura.

Principio técnico

La prueba mide la tasa de ganancia de peso oxidativa o el grosor de la capa de óxido en la superficie colocando el alambre de molibdeno en aire a alta temperatura (500-1000 °C). La norma requiere que la tasa de ganancia de peso por oxidación del alambre de molibdeno a 800 °C durante 24 horas sea del $\leq 0,1\%$ y el espesor de la capa de óxido sea $\leq 0,5$ micras. La prueba también se puede combinar con el análisis termogravimétrico (TGA) para registrar los cambios de calidad en tiempo real.

Parámetros de equipos y procesos

Los oxidantes de alta temperatura (por ejemplo, Nabertherm HT 08/18) controlan la precisión de la temperatura ± 5 °C, el flujo de aire de 0,1-0,5 L/min, el tiempo de prueba de 12 a 48 horas. Los analizadores termogravimétricos (por ejemplo, TA Instruments Q500) miden $\pm 0,1$ μg con una velocidad de calentamiento de 5-10 °C/min. Después de la prueba, la composición y el espesor del óxido se analizaron mediante SEM y espectroscopia de dispersión de energía (EDS).

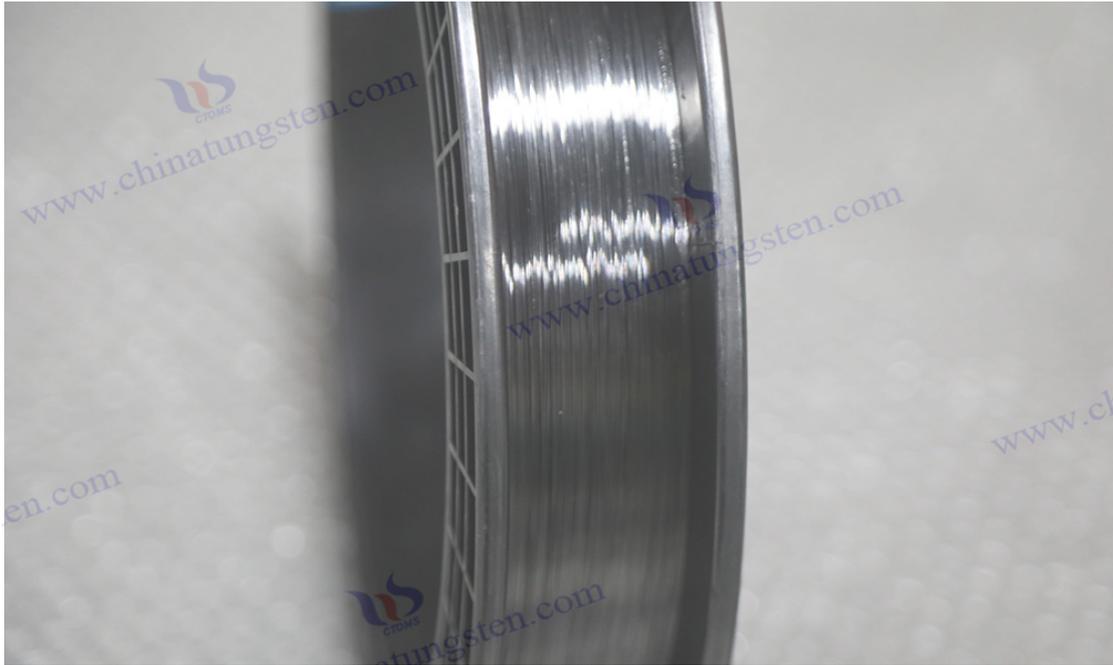
Optimización de procesos y desafíos

La prueba necesita controlar la humedad del aire ($<10\%$) para evitar la oxidación acelerada de la humedad. La muestra debe calentarse uniformemente para evitar el sobrecalentamiento local y la capa de óxido desigual. Durante la prueba, se debe registrar la curva cinética de oxidación para analizar la velocidad y el mecanismo de oxidación. Para aumentar la eficiencia, se puede utilizar un analizador termogravimétrico multicanal para probar varios cables de molibdeno al mismo tiempo.

Importancia de la aplicación

El alambre de molibdeno con alta resistencia a la oxidación puede permanecer estable en un entorno de descarga a alta temperatura y prolongar la vida útil. Por ejemplo, el alambre de molibdeno con una tasa de ganancia de peso oxidativa del $\leq 0,05\%$ a 800 °C se puede utilizar en la fabricación de fuentes de luz eléctrica, y la resistencia a altas temperaturas aumenta en un 20%. Los datos de prueba proporcionan una base óptima para el tratamiento térmico y el proceso de protección de superficies del alambre de molibdeno.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal



CTIA GROUP LTD electroerosión por hilo de molibdeno

Capítulo 9 Optimización y mejora técnica de la electroerosión por hilo de molibdeno

Con la creciente demanda de la industria moderna de alta precisión, alta eficiencia y bajo costo, la optimización y la mejora técnica del alambre de molibdeno se han convertido en el foco de la investigación de la industria. Las direcciones de optimización incluyen la mejora de la resistencia a la tracción y la durabilidad, la mejora de los procesos de tratamiento de superficies, la reducción de la tasa de rotura del alambre, la mejora de la eficiencia de corte y la introducción de tecnologías de producción inteligentes. Este capítulo discutirá estos métodos de optimización y mejoras técnicas en detalle, y analizará en profundidad sus principios técnicos, parámetros de proceso, requisitos de equipo e importancia de la aplicación, con el objetivo de proporcionar una referencia técnica completa para la producción y aplicación de alambre de molibdeno.

9.1 Métodos para mejorar la resistencia a la tracción y la durabilidad

La resistencia a la tracción y la durabilidad son los principales indicadores de rendimiento de la electroerosión por hilo de molibdeno, que afectan directamente a su estabilidad y vida útil en entornos de corte de hilo de alta resistencia. El siguiente es un análisis detallado de los métodos para mejorar la resistencia a la tracción y la durabilidad desde los aspectos de optimización del material, mejora del tratamiento térmico, control de la microestructura y tecnología de dopaje.

Preparación y optimización de polvo de molibdeno de alta pureza

La resistencia a la tracción y la durabilidad del alambre de molibdeno están estrechamente relacionadas con la pureza de sus materias primas. El polvo de molibdeno de alta pureza (pureza $\geq 99,95\%$) puede reducir significativamente el daño de los elementos de impureza (como hierro, níquel, carbono, oxígeno, nitrógeno) en la estructura cristalina, mejorando así la resistencia y tenacidad del material. La preparación de polvo de molibdeno de alta pureza generalmente se lleva

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

a cabo mediante un proceso de reducción de hidrógeno de múltiples etapas, en el que el óxido de molibdeno (MoO_3) se reduce gradualmente a polvo de molibdeno metálico mediante el uso de un horno de reducción de hidrógeno continuo (temperatura de trabajo 600-1100 °C, caudal de hidrógeno 1-2 L / min, presión 0,1-0,5 MPa). El proceso de reducción se divide en una fase de baja temperatura (600-800 °C, se genera MoO_2) y una etapa de alta temperatura (900-1100 °C, se genera molibdeno metálico), y la velocidad de calentamiento (5-10 °C / min) y el mantenimiento se controlan con precisión (1-2 horas) para garantizar que la distribución del tamaño de partícula del polvo de molibdeno sea de 1-3 micras, y la desviación de la uniformidad del tamaño de partícula sea de $\leq 0,1$ micras. El moderno horno de reducción está equipado con un sistema de control de temperatura de alta precisión (precisión ± 5 °C) y un dispositivo de purificación de gas (tasa de eliminación $\geq 99,9\%$), que controla el contenido de oxígeno en el polvo de molibdeno al $\leq 0,003\%$, el contenido de carbono $\leq 0,01\%$ y el contenido de hierro $\leq 0,005\%$. Además, el polvo de molibdeno se tamiza mediante un clasificador de aire (velocidad del aire de 10-20 m/s, precisión de separación $\pm 0,05$ micras) para eliminar partículas grandes y aglomeradas para mejorar aún más la pureza y la consistencia de las materias primas. El polvo de molibdeno optimizado proporciona una pieza en bruto homogénea de alta densidad para el proceso de sinterización posterior, lo que garantiza que el alambre de molibdeno tenga excelentes propiedades mecánicas.

Optimización del proceso de tratamiento térmico

El tratamiento térmico es una parte clave para mejorar la resistencia a la tracción y la durabilidad del alambre de molibdeno, mejorando el rendimiento al eliminar las tensiones internas durante el proceso de trefilado, optimizando la estructura cristalina y mejorando la tenacidad del material. El tratamiento térmico generalmente se realiza en un horno de tratamiento térmico al vacío (temperatura 1600-1800 °C, grado de vacío $\leq 10^{-3}$ Pa) o en un horno de recocido de hidrógeno (temperatura 800-1200 °C, flujo de hidrógeno 0,5-1 L / min). El tratamiento térmico al vacío puede controlar el tamaño de grano del alambre de molibdeno a 5-10 micras, aumentar la resistencia a la tracción a 2000-2300 MPa y aumentar el alargamiento a la rotura a 2-3% a alta temperatura (1700 °C) durante 1-2 horas y la velocidad de calentamiento de 5-10 °C / min. El recocido con hidrógeno se calienta en secciones (precalentamiento 600-800 °C, mantenimiento 1000-1100 °C, velocidad de enfriamiento 5 °C/min), lo que elimina eficazmente la tensión residual y reduce el riesgo de fractura. Los hornos de tratamiento térmico modernos están equipados con un sistema de control de temperatura de varias etapas (precisión ± 3 °C) y un dispositivo de monitoreo en línea que registra la temperatura, la presión y el flujo de gas en tiempo real para garantizar la estabilidad del proceso. Además, al optimizar los parámetros del tratamiento térmico (por ejemplo, extendiendo el tiempo de retención a 2,5 horas o reduciendo la velocidad de enfriamiento a 3 °C/min), se puede mejorar aún más la uniformidad del grano y reducir los defectos del límite del grano, mejorando así la resistencia a la fatiga y la durabilidad del alambre de molibdeno.

Control de microestructura

La resistencia a la tracción y la durabilidad del alambre de molibdeno están estrechamente relacionadas con su microestructura. Al controlar el tamaño de grano y las propiedades del límite de grano, las propiedades mecánicas del material se pueden mejorar significativamente. Utilizando la tecnología de sinterización de prensado isostático en caliente (HIP) (temperatura 1800-2000 °C,

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

presión 100-200 MPa, protección de argón), la densidad de la palanquilla de molibdeno se puede aumentar al 99,5%, la porosidad interna y las inclusiones se pueden reducir, y la resistencia a la tracción se puede aumentar a más de 2200 MPa. Durante el proceso de trefilado, a través del trefilado de múltiples pasadas (20-30 pasadas, tasa de reducción de superficie de una sola pasada del 10-15%) y el recocido intermedio (900-1100 °C, manteniendo durante 10-20 segundos), el grano (tamaño 3-8 micras) se puede refinar, la estructura cristalina fibrosa se puede mejorar y se puede mejorar la resistencia y tenacidad del alambre de molibdeno. Además, la difracción de rayos X (XRD) se utiliza para analizar el tamaño y la orientación del grano, y la microscopía electrónica de barrido (SEM) se utiliza para observar defectos microscópicos y garantizar que la optimización de la estructura cumpla con los requisitos de las normas (por ejemplo, GB/T 4182-2017).

Tecnología de dopaje y aleación

La adición de oligoelementos (por ejemplo, lantano, cerio, itrio) al alambre de molibdeno puede mejorar aún más su resistencia a la tracción y durabilidad. Por ejemplo, el dopaje de 0,1-0,5% de óxido de lantano (La_2O_3) puede formar partículas finas de óxido (0,1-0,5 μm de diámetro), que pueden aumentar la resistencia a la tracción a 2300-2500 MPa a través de un mecanismo de fortalecimiento por precipitación, al tiempo que mejora la resistencia a la fluencia a altas temperaturas. El proceso de dopaje necesita distribuir uniformemente los elementos dopantes a través de la tecnología de pulvimetalurgia en la etapa de sinterización, la temperatura de sinterización se controla a 1900-2100 °C y el tiempo de retención es de 2-3 horas. El alambre de molibdeno dopado aún puede mantener propiedades mecánicas estables en un entorno de alta temperatura de 1500 °C, y la vida útil a la fatiga se extiende a más de 10 veces. Además, al controlar el tamaño de partícula (0,05-0,2 micras) y la uniformidad de distribución (desviación $\leq 5\%$) de los elementos dopados, se puede evitar el efecto de aglomeración y se puede garantizar la estabilidad de las propiedades del alambre de molibdeno.

Importancia de la aplicación

Los métodos que mejoran la resistencia a la tracción y la durabilidad mejoran significativamente el rendimiento del alambre de molibdeno en entornos de corte de alambre de alta resistencia. El alambre de molibdeno con una resistencia a la tracción de 2200 MPa puede soportar una tensión de 3-5 N, lo que es adecuado para procesar materiales de alta dureza como el carburo cementado y la aleación de titanio. El alambre de molibdeno de durabilidad optimizada puede funcionar continuamente durante más de 100 horas en un entorno de descarga de alta frecuencia, y la tasa de rotura del cable se reduce a menos del 0,05%. Estas mejoras proporcionan una mayor estabilidad y eficiencia para que la electroerosión por hilo cumpla con los exigentes requisitos de la industria aeroespacial, la fabricación de moldes y más.

9.2 Optimizar el proceso de tratamiento de superficies

El proceso de tratamiento de la superficie afecta directamente la calidad de la superficie, el acabado y la resistencia al desgaste del alambre de molibdeno, lo cual es muy importante para la estabilidad de descarga y la precisión del mecanizado del hilo EDM. El siguiente es un análisis detallado de los métodos para optimizar el proceso de tratamiento de superficies desde los aspectos de lavado con álcalis, pulido electrolítico y tecnología de recubrimiento.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

Optimización del proceso de lavado cáustico

El lavado cáustico se utiliza para eliminar óxidos, aceites y partículas de la superficie del alambre de molibdeno para mejorar la limpieza de la superficie. El proceso de lavado cáustico optimizado adopta un tanque de lavado cáustico continuo (material: acero inoxidable o PTFE), utilizando una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 5-10%, la temperatura se controla a 60-80 °C, la velocidad de paso del alambre de molibdeno es de 5-10 m / min y el tiempo de limpieza es de 10-20 segundos. Los modernos equipos de lavado cáustico están equipados con un oscilador ultrasónico (frecuencia 40-60 kHz, potencia 100-200 W), que aumenta la tasa de eliminación de impurezas superficiales hasta en un 99,9% y reduce la rugosidad de la superficie a Ra 0,05 micras. Además, al optimizar la formulación de la solución (añadiendo un 0,5% de tensioactivo), se puede mejorar el efecto de limpieza y reducir los residuos superficiales. Para cumplir con los requisitos de protección del medio ambiente, el equipo de lavado cáustico está equipado con un sistema de tratamiento de líquidos residuales, que aumenta la tasa de eliminación de iones de metales pesados en el líquido residual a más del 95% a través de la neutralización ácido-alcalina (pH 6-8) y el dispositivo de filtración (tamaño de poro 0,1 micras).

Mejora de la tecnología de electropulido

El pulido electrolítico elimina las protuberancias microscópicas en la superficie del alambre de molibdeno a través de reacciones electroquímicas, mejorando aún más el acabado de la superficie y la resistencia a la corrosión. El proceso de electropulido optimizado utiliza un electrolito mixto de ácido sulfúrico y ácido fosfórico (relación 3:1, concentración 20-30%) a una temperatura de 50-70 °C, una densidad de corriente de 10-20 A/dm² y un tiempo de pulido de 5-15 segundos. Los equipos modernos de electropulido, como los tanques de pulido continuo, están equipados con una fuente de alimentación de corriente constante (precisión ± 0,1%) y un sistema de control automático de temperatura (precisión ± 2 °C), que reduce la rugosidad de la superficie a menos de Ra 0,015 micras y aumenta la reflectividad de la superficie al 90%. Al optimizar la velocidad del ciclo del electrolito (0,5-1 L/min) y el espaciado de los electrodos (1-2 mm), se puede reducir el arco durante el proceso de pulido y mejorar la uniformidad de la superficie. Además, el uso de la tecnología de pulido electrolítico pulsado (frecuencia de pulso 50-100 Hz, ciclo de trabajo 50-70%) puede reducir aún más la incidencia de microfisuras superficiales a menos del 0,1%.

Mejoras en la tecnología de recubrimiento de emulsión de grafito

El recubrimiento de emulsión de grafito reduce el coeficiente de fricción y la resistencia al desgaste mediante la aplicación de un recubrimiento lubricante de 1-2 micras de espesor a la superficie del alambre de molibdeno, lo que prolonga la vida útil en el corte del alambre. El proceso de recubrimiento optimizado utiliza un baño de recubrimiento continuo (material: plástico resistente a la corrosión) y una formulación de emulsión de grafito de 10-20% de polvo de grafito de alta pureza (tamaño de partícula de 0,1-0,5 micras), aglutinante (alcohol polivinílico o silicato de sodio) y solvente (agua desionizada). El equipo de recubrimiento está equipado con un dispositivo de agitación (velocidad 100-200 rpm) y un horno de secado (temperatura 100-150 °C, tiempo de secado 10-20 segundos) para garantizar que la uniformidad del espesor del recubrimiento sea superior al 98% y la fuerza de unión aumente a 10 MPa. Los equipos de recubrimiento modernos utilizan tecnología de recubrimiento por pulverización o inmersión para controlar la desviación del espesor

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

del recubrimiento $\pm 0,1$ micras, y la temperatura de secado se monitorea en tiempo real mediante un termómetro infrarrojo (precisión ± 1 °C) para evitar el agrietamiento o la descamación del recubrimiento.

Nueva tecnología de tratamiento de superficies

En los últimos años, la tecnología de nanorrecubrimiento y la tecnología de modificación de superficies por plasma han proporcionado una nueva dirección para el tratamiento de superficies de alambre de molibdeno. Los nanorrecubrimientos (por ejemplo, nitruro de titanio o carburo de molibdeno, de 0,5-1 micras de espesor) se aplican por deposición física de vapor (PVD) o deposición química de vapor (CVD) con una dureza de hasta HV 2000 y un coeficiente de fricción reducido a menos de 0,1. La modificación de la superficie del plasma trata la superficie del alambre de molibdeno con un plasma de baja temperatura (potencia 100-200 W, presión 0,1-1 Pa) para formar una capa de óxido densa (espesor 0,2-0,5 micras) para mejorar la resistencia a la corrosión y al desgaste. Estas tecnologías mejoran significativamente la estabilidad del alambre de molibdeno en entornos de descarga de alta intensidad.

Importancia de la aplicación

El proceso optimizado de tratamiento de superficies mejora significativamente el acabado superficial y la resistencia al desgaste del alambre de molibdeno. El alambre de molibdeno con una rugosidad superficial de Ra 0,015 micras puede reducir el arco desigual en el electroerosión por hilo y mejorar la estabilidad de descarga en un 30%; El recubrimiento de emulsión de grafito reduce el coeficiente de fricción en un 40% y prolonga la vida útil en un 50%. Estas mejoras proporcionan una garantía fiable para el mecanizado de moldes de alta precisión y el mecanizado de microestructuras, que cumplen con los estrictos requisitos de los sectores aeroespacial y de semiconductores.

9.3 Técnicas para reducir la tasa de filamentos rotos

El alambre roto es un problema común en la electroerosión por hilo, que afecta la eficiencia y el costo del procesamiento. La reducción de la tasa de rotura requiere la optimización de materiales, la mejora de procesos y el control de equipos, y a continuación se presenta un análisis detallado de las tecnologías relevantes.

Optimización de las propiedades del material

La tasa de rotura del filamento está estrechamente relacionada con la resistencia a la tracción, la tenacidad y la microestructura del alambre de molibdeno. Mediante el uso de polvo de molibdeno de alta pureza (pureza $\geq 99,97\%$) y técnicas de dopaje como el óxido de lantano al 0,3%, la resistencia a la tracción se puede aumentar a 2300 MPa y el alargamiento a la rotura se puede aumentar al 2,5%, reduciendo significativamente el riesgo de rotura del cable. En el proceso de trefilado, se puede optimizar la estructura cristalina fibrosa, se puede reducir la grieta del límite de grano y la tasa de rotura del alambre se puede reducir a menos del 0.05% controlando la tasa de reducción de superficie de una sola pasada (8-12%) y la temperatura de recocido intermedia (900-1100 °C).

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Mejora del proceso de trefilado

La optimización del proceso de trefilado afecta directamente la uniformidad y la calidad de la superficie del alambre de molibdeno. Utilizando una máquina trefiladora de alambre de alta precisión (accionada por un servomotor, velocidad 5-20 m/s, tensión 0,1-2 N), a través del trefilado múltiple (20-30 pasadas) y el control de tensión en línea (precisión $\pm 0,01$ N), la tolerancia del diámetro se puede controlar a $\pm 0,001$ mm y el error de redondez $\leq 0,0005$ mm. El uso de troqueles de trefilado de diamante policristalino (PCD) (rugosidad de la superficie del orificio del troquel Ra 0,01 micras, vida útil de más de 1000 horas) puede reducir los arañazos en la superficie y reducir la tasa de rotura del cable. Además, la formulación optimizada del lubricante (lubricante a base de aceite con 5% de grafito con viscosidad 10-20 cSt) reduce el calor de fricción durante el trefilado en un 50% y evita las microfisuras causadas por el sobrecalentamiento local.

Optimización de los parámetros del equipo de corte de alambre

Los parámetros de funcionamiento del equipo de corte de alambre tienen un impacto importante en la tasa de rotura del alambre. La optimización de los parámetros de descarga (por ejemplo, ancho de pulso 50-100 μ s, densidad de corriente 10-20 A / cm²) puede reducir el choque térmico durante la descarga y reducir el daño por fatiga térmica del cable de molibdeno. El sistema de control de tensión adaptativo (rango de tensión 2-5 N, precisión $\pm 0,05$ N) puede ajustar la tensión en tiempo real de acuerdo con las condiciones de procesamiento para evitar la rotura del cable causada por una tensión excesiva. Además, al optimizar la formulación del refrigerante (5% de inhibidor de óxido, pH 7-8, caudal 0,5-1 L/min), se puede reducir la tendencia del alambre de molibdeno a corroerse y oxidarse durante el procesamiento.

Monitoreo en línea y control de retroalimentación

El moderno equipo de corte de alambre está equipado con un sistema de monitoreo en línea, que monitorea el diámetro y los defectos superficiales del alambre de molibdeno en tiempo real a través de un instrumento de medición de diámetro de alambre láser (precisión ± 0.0001 mm) y un detector de corrientes de Foucault (sensibilidad de 0.05 micras), y ajusta automáticamente los parámetros de tensión o descarga cuando se encuentran anomalías. Por ejemplo, cuando se detecta una desviación del diámetro de $\pm 0,001$ mm, el sistema puede reducir la tensión en un 10% o pausar el procesamiento para evitar la rotura del hilo. El sistema de monitoreo también puede registrar la frecuencia de descarga y la distribución del calor, optimizar los parámetros de procesamiento y reducir la tasa de rotura del cable a menos del 0.03%.

Importancia de la aplicación

Las técnicas que reducen la tasa de rotura del filamento mejoran significativamente la continuidad y la eficiencia del corte del alambre. El alambre de molibdeno con un alambre roto de menos del 0.05% puede soportar el procesamiento continuo durante más de 100 horas, reducir el tiempo de inactividad y aumentar la eficiencia de producción en un 20%. Estas tecnologías proporcionan un soporte estable para el mecanizado de materiales de alta dureza, como aleaciones de titanio y cerámica, para cumplir con los exigentes requisitos de la industria aeroespacial y la fabricación de moldes.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

9.4 Innovaciones para mejorar la eficiencia de corte

Mejorar la eficiencia de corte de la electroerosión por hilo es un objetivo importante para optimizar el rendimiento del alambre de molibdeno, lo que implica la mejora del material, la optimización de la descarga y la actualización de los equipos. A continuación se presenta un análisis detallado de las innovaciones relevantes.

Desarrollo de alambre de molibdeno altamente conductor

El aumento de la conductividad del alambre de molibdeno (conductividad 18-20 MS / m) puede mejorar la eficiencia de descarga y acortar el tiempo de procesamiento. Al dopar trazas de plata (Ag, 0,1-0,3%) o cobre (Cu, 0,2-0,5%), la conductividad se puede aumentar en un 10% y la pérdida de energía de descarga se puede reducir en un 15%. El proceso de dopaje se lleva a cabo en un horno de sinterización al vacío (temperatura 1900-2100 °C, presión 0,1 MPa) para garantizar una distribución uniforme de los elementos de dopaje (desviación $\leq 5\%$). El alambre de molibdeno de alta conductividad puede aumentar la frecuencia de descarga (10-20 kHz) y aumentar la velocidad de corte en un 20-30%.

Optimización de los parámetros de descarga

La optimización de los parámetros de descarga es la clave para mejorar la eficiencia de corte. Los modernos equipos de electroerosión por hilo utilizan una fuente de alimentación pulsada de alta frecuencia (frecuencia 10-50 kHz, ancho de pulso 20-100 μs) que aumenta las tasas de eliminación de material hasta en un 30% mediante un control preciso de la energía de descarga (10-50 J/cm²) y el espaciado de pulsos (50-200 μs). Por ejemplo, la velocidad de corte se puede aumentar de 2 mm/min a 3 mm/min con una descarga de alta frecuencia de pulso corto (ancho de pulso 30 μs , frecuencia 30 kHz). Además, al optimizar el espacio entre electrodos (0,01-0,03 mm) y el caudal de refrigerante (0,5-1 L/min), se puede reducir la acumulación de calor y prolongar la vida útil del alambre de molibdeno.

Nuevo sistema de refrigeración e inyección

El refrigerante desempeña un papel en la disipación de calor, la eliminación de escoria y la protección contra la corrosión en el corte de alambre. La formulación optimizada del refrigerante (5-10% de etilenglicol, 2% de inhibidor de óxido, viscosidad 5-10 cSt) puede mejorar la conductividad térmica (0,5 W/m·K) y la eficiencia de eliminación de escoria, y aumentar la velocidad de corte en un 15%. El nuevo sistema de inyección de alta presión (presión 0,5-1 MPa, ángulo de inyección 30-45°) puede rociar uniformemente el refrigerante en el área de descarga, reduciendo el daño térmico del electrodo y aumentando la eficiencia del procesamiento en un 10-20%.

Enganche multieje y control adaptativo

El equipo moderno de corte de alambre adopta un sistema de control numérico de cinco o seis ejes y realiza el procesamiento de estructuras tridimensionales complejas a través de un enlace multieje (precisión de rotación $\pm 0,001^\circ$), y la eficiencia de corte aumenta en un 25%. El sistema de control adaptativo reduce el tiempo de procesamiento en un 15-20% al monitorear la corriente de descarga (precisión $\pm 0,1$ A) y el espacio entre electrodos (precisión $\pm 0,001$ mm) en tiempo real, ajustando

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

dinámicamente los parámetros de descarga y la tensión, optimizando la trayectoria de corte.

Importancia de la aplicación

Las tecnologías innovadoras que aumentan la eficiencia de corte reducen significativamente los tiempos de procesamiento y los costos de producción. El alambre de molibdeno de alta conductividad y los parámetros de descarga optimizados pueden aumentar la velocidad de corte en un 30%, lo que es adecuado para procesar materiales de alta dureza; Las nuevas tecnologías de refrigerantes y multiteje mejoran la eficiencia del mecanizado de estructuras complejas para satisfacer las necesidades de los campos aeroespacial, de semiconductores y otros.

9.5 Aplicación de la tecnología de producción inteligente

La tecnología de producción inteligente mejora la eficiencia de la producción de alambre de molibdeno y la consistencia de la calidad a través de la automatización y el monitoreo en tiempo real. El siguiente es un análisis desde dos aspectos: control automático de dibujo y sistema de monitoreo de calidad en tiempo real.

9.5.1 Control automático de trefilado

El control automatizado de trefilado mejora la precisión y la eficiencia del proceso de trefilado mediante la integración de sensores, servosistemas y control PLC.

Principio técnico

El sistema automático de control de trefilado monitorea los cambios de tensión, velocidad y diámetro durante el proceso de trefilado en tiempo real a través de servomotores (potencia 5-10 kW, velocidad 100-2000 rpm) y sensores de alta precisión (precisión de tensión $\pm 0,01$ N, precisión de diámetro $\pm 0,0001$ mm). El sistema adopta un algoritmo de control de circuito cerrado para ajustar la velocidad de estirado (5-20 m/s) y la tensión (0,1-2 N) de acuerdo con datos en tiempo real, asegurando una tolerancia de diámetro de $\pm 0,001$ mm y un error de redondez de $\leq 0,0005$ mm.

Parámetros de equipos y procesos

Las trefiladoras automatizadas (por ejemplo, Schumag o Niehoff) están equipadas con sistemas de trefilado de varias pasadas (20-30 pasadas, tasa de reducción de superficie del 8-12%) e instrumentos de medición láser en línea (frecuencia de 1000 pasadas/segundo). El sistema de lubricación utiliza un lubricante a base de aceite que contiene un 5% de grafito (viscosidad 10-20 cSt), que se aplica uniformemente mediante una bomba de flujo constante (caudal de 0,1-0,5 L/min) para reducir el calor por fricción en un 50%. Los sistemas de control PLC, como el Siemens S7-1500, muestran los parámetros del proceso en tiempo real a través de una interfaz de pantalla táctil, lo que permite la supervisión remota y el almacenamiento de datos.

Optimización de procesos y desafíos

El trefilado automatizado necesita optimizar el diseño del troquel de trefilado (orificio de troquel PCD, rugosidad de la superficie Ra 0,01 micras, vida útil de 1000 horas) para evitar la desviación del diámetro causada por el desgaste del orificio del troquel. El sistema necesita calibrar el sensor a intervalos regulares (cada 500 horas) para garantizar la precisión de la medición. El desafío es lidiar

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

con las perturbaciones de vibración en el trefilado a alta velocidad, que se pueden resolver agregando dispositivos de amortiguación (tasa de amortiguación del 80%) y optimizando las formulaciones de lubricantes.

Importancia de la aplicación

El control automático de trefilado aumenta la eficiencia de producción en un 20% y reduce la tasa de fallas al 0,02%, lo que garantiza la consistencia del diámetro del alambre de molibdeno y la calidad de la superficie para satisfacer las necesidades de corte de alambre de alta precisión. El sistema también admite la optimización automática de los parámetros del proceso, reduciendo el ciclo de producción en un 15%.

9.5.2 Sistema de control de calidad en tiempo real

El sistema de monitoreo de calidad en tiempo real garantiza la consistencia de la calidad de todo el proceso de producción de alambre de molibdeno a través de la integración de equipos de prueba y tecnología de análisis de datos.

Principio técnico

El sistema de monitoreo de calidad en tiempo real detecta el diámetro, los defectos de la superficie y la microestructura del alambre de molibdeno en tiempo real a través de un instrumento de medición del diámetro del alambre láser (precisión $\pm 0,0001$ mm), detector de corrientes de Foucault (sensibilidad 0,05 micras) y microscopio óptico (aumento 1000-2000 veces). El sistema utiliza la tecnología de Internet Industrial de las Cosas (IIoT) para recopilar datos a través de una red de sensores, combinada con análisis de big data y algoritmos de aprendizaje automático para predecir problemas de calidad y optimizar los parámetros del proceso.

Parámetros de equipos y procesos

El sistema de monitoreo está equipado con un instrumento de medición láser de alta frecuencia (Keyence LS-9000, frecuencia 1000 veces/seg), detector de corrientes de Foucault (Eddyfi Ectane 2, frecuencia 100 kHz-1 MHz) y SEM (JEOL JSM-7800F, resolución 0,01 micras). Frecuencias de adquisición de datos de 10-100 Hz, capacidad de almacenamiento de hasta 1 TB, copia de seguridad en la nube y acceso remoto. El sistema está conectado con el equipo de producción a través de PLC para ajustar la velocidad de trefilado, la tensión y los parámetros de tratamiento de la superficie en tiempo real.

Optimización de procesos y desafíos

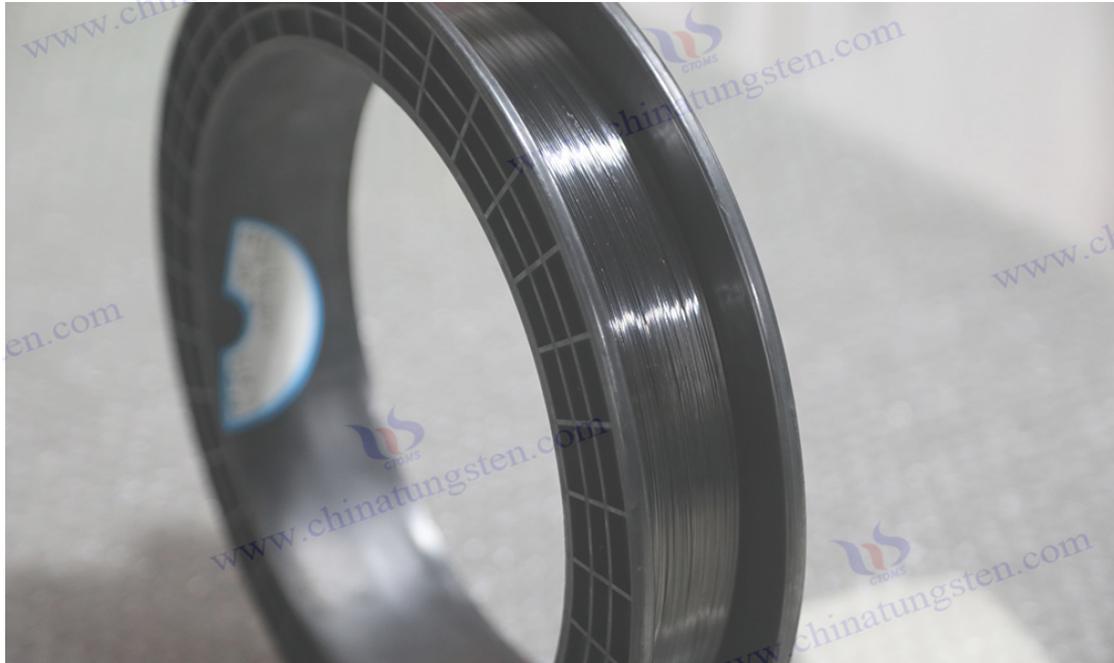
El sistema de monitoreo necesita calibrar el sensor (cada 500 horas) para garantizar la precisión de la detección. El reto consiste en procesar el análisis en tiempo real de datos de alta frecuencia (1000 puntos/s), que pueden aumentarse mediante edge computing y redes 5G con una latencia de < 10 ms. El sistema también necesita optimizar el algoritmo para reducir la tasa de falsas alarmas a menos del 0,01% para garantizar la confiabilidad del control de calidad.

Importancia de la aplicación

El sistema de monitoreo de calidad en tiempo real reduce la tasa de fallas al 0.01% y aumenta la

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

eficiencia de producción en un 15%, lo que garantiza que el rendimiento del alambre de molibdeno cumpla con las normas GB / T 4182-2017 y ASTM B387. El sistema también admite la trazabilidad de los datos de calidad, lo que proporciona una garantía fiable para el corte de alambre de alta precisión.



CTIA GROUP LTD electroerosión por hilo de molibdeno

Capítulo 10 Mercado y desarrollo de la electroerosión por hilo de molibdeno

Con la creciente demanda de mecanizado de alta precisión, fabricación de microelectrónica y producción ecológica, el mercado de alambre de electroerosión por hilo muestra una tendencia de rápida expansión y diversificación. Este capítulo discutirá exhaustivamente la descripción general del mercado global y la tendencia de desarrollo futuro de la electroerosión por hilo de molibdeno, y proporcionará un análisis en profundidad de los principales países productores, el tamaño del mercado, los impulsores de la demanda y las direcciones de innovación tecnológica, incluida la investigación y el desarrollo de alambre de molibdeno de diámetro de alambre más delgado, la promoción de procesos de producción respetuosos con el medio ambiente y la tendencia de la sustitución de nuevos materiales.

10.1 Visión general del mercado global

El mercado global de electroerosión por hilo de molibdeno está impulsado por la demanda de mecanizado de alta precisión, que se usa ampliamente en la fabricación de moldes, aeroespacial, semiconductores, dispositivos médicos y nuevas energías, entre otros. El siguiente es un análisis detallado del estado actual del mercado global desde dos aspectos: principales países y regiones productoras, tamaño del mercado y análisis de la demanda.

10.1.1 Principales países y regiones productoras

La producción de electroerosión por hilo de molibdeno depende en gran medida de los recursos de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

molibdeno y la tecnología de procesamiento avanzada, y los principales países y regiones de producción del mundo incluyen China, Estados Unidos, Japón, Europa (representada por Alemania y Austria) y Rusia. Estos países y regiones ocupan una posición importante en el mercado mundial de alambre de molibdeno en virtud de la sinergia de las ventajas de los recursos, la acumulación de tecnología y la demanda del mercado.

China

China es el mayor productor mundial de recursos de molibdeno, con ricas reservas de mineral de molibdeno (que representan alrededor del 50% del total mundial), como Luanchuan en la provincia de Henan y Jinduicheng en la provincia de Shaanxi, con una producción anual de más de 100.000 toneladas de concentrado de molibdeno. Confiando en las ventajas de los recursos, China se ha convertido en un importante productor de electroerosión por hilo de molibdeno, representando más del 60% del mercado mundial. Las empresas nacionales como la industria de molibdeno de Jinduicheng y la industria de molibdeno de Luoyang han producido alambre de molibdeno de alto rendimiento de acuerdo con el estándar GB / T 4182-2017 con un rango de diámetro de 0.05-0.3 mm, resistencia a la tracción de 1800-2300 MPa y rugosidad superficial de $Ra \leq 0.02$ micras a través de la introducción de equipos de producción avanzados (como la máquina de trefilado de alta precisión y el horno de tratamiento térmico al vacío) y un proceso optimizado (reducción de hidrógeno de múltiples etapas y caliente sinterización por presión isostática). Los productos de alambre de molibdeno de China no solo satisfacen las necesidades de la fabricación nacional de moldes y la industria aeroespacial, sino que también exportan una gran cantidad de ellos al sudeste asiático, Europa y América del Norte, lo que representa más del 40% del mercado mundial. Además, las empresas chinas han mantenido la competitividad de los precios mediante la innovación tecnológica (por ejemplo, el dopaje con óxido de lantano) y el control de los costos, con un precio medio del alambre de molibdeno de 0,18 mm de 50 a 70 dólares EE.UU. por kilómetro.

Estados Unidos

Estados Unidos es el segundo mayor productor mundial de alambre de molibdeno, con abundantes recursos de mineral de molibdeno (como la mina Climax en Colorado) y tecnología de producción avanzada. Empresas como Climax Molybdenum y Plansee USA se especializan en el desarrollo de alambres de molibdeno de alto rendimiento que cumplen con las normas ASTM B387 para su uso en los campos aeroespacial y de semiconductores. La producción de alambre de molibdeno en los Estados Unidos se centra en la alta pureza ($\geq 99,95\%$) y la calidad de la superficie ($Ra \leq 0,05$ micras), y mejora la resistencia al desgaste a través de tecnologías de recubrimiento de deposición física de vapor (PVD), como los recubrimientos de nitruro de titanio, de 0,5-1 micras de espesor. El mercado estadounidense tiene una fuerte demanda de alambre de molibdeno de diámetro fino (0,05-0,1 mm), lo que representa el 30% de su producción total, principalmente en microelectrónica y procesamiento de dispositivos médicos. El precio del alambre de molibdeno en los Estados Unidos es relativamente alto, con un promedio de \$ 80-100 por kilómetro, lo que refleja su posicionamiento en el mercado de alta gama.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

Japón

Japón es conocido por su alta precisión y calidad en la producción de alambre de molibdeno, y empresas como Sumitomo Electric y Toshiba Materials producen alambre de molibdeno de acuerdo con el estándar JIS H 4461, que se usa ampliamente en fuentes de luz eléctrica y fabricación de moldes de precisión. La tecnología de producción de alambre de molibdeno de Japón se centra en el control del grano (tamaño de 3-8 micras) y el tratamiento de la superficie (como el pulido electrolítico, $Ra \leq 0,03$ micras), mediante el estirado de varias pasadas (25-35 pasadas, tasa de reducción de la superficie del 8-12%) y el recocido al vacío (1600-1800 °C), para lograr una resistencia a la tracción de 2000-2200 MPa. La demanda de alambre de molibdeno ultrafino ($\leq 0,08$ mm de diámetro) en el mercado japonés está creciendo rápidamente, representando el 25% de su producción total, principalmente para la fabricación de obleas de semiconductores y MEMS. Las exportaciones de alambre de molibdeno de Japón se dirigen principalmente a Asia y América del Norte, y el precio es de 70-90 dólares por kilómetro.

Europa

La producción de alambre de molibdeno en Europa está dominada por Alemania y Austria, y empresas como Plansee Group y H.C. Starck utilizan procesos de producción de última generación (por ejemplo, máquinas de trefilado continuo, modificación de superficies por plasma) para producir alambre de molibdeno de acuerdo con la norma DIN EN 10204. El mercado europeo se centra en la producción respetuosa con el medio ambiente, utilizando hornos de sinterización de baja energía (20% menos de consumo de energía) y lubricantes reciclables, de acuerdo con la directiva RoHS de la UE. El alambre de molibdeno en Europa se utiliza principalmente en la fabricación de moldes aeroespaciales y automotrices, con un diámetro de 0,1-0,2 mm que representa el 50% de la producción total, una resistencia a la tracción de 1900-2300 MPa y una rugosidad superficial de $Ra \leq 0,02$ micras. El precio del alambre de molibdeno en Europa es más alto, con un promedio de US\$90-120 por kilómetro, lo que refleja su tecnología de alta gama y su estricto control de calidad.

Rusia

Rusia tiene una fuerte presencia en el mercado mundial con ricos recursos de mineral de molibdeno, como la zona minera de Siberia, con una producción anual de unas 20.000 toneladas de concentrado de molibdeno. Los fabricantes de alambre de molibdeno en Rusia, como la planta metalúrgica de Cheliábinsk, se especializan en alambre de molibdeno de gran diámetro (0,2-0,3 mm) para aplicaciones aeroespaciales y de pulverización térmica. El producto cumple con el estándar GOST, con una resistencia a la tracción de 1800-2100 MPa y una rugosidad superficial de $Ra \leq 0,05$ micras. El precio del alambre de molibdeno en Rusia es relativamente bajo, con un promedio de 40-60 dólares por kilómetro, y se exporta principalmente a los mercados de Europa del Este y Asia.

Otras regiones

Otros países como Chile, Canadá y Australia también producen alambre de molibdeno, pero la producción es menor y depende principalmente del concentrado de molibdeno importado para el procesamiento. La producción de alambre de molibdeno en estas áreas es principalmente para satisfacer las necesidades del mercado local, y el nivel técnico es relativamente bajo, y los productos se utilizan principalmente en la fabricación general de moldes, con un precio de 50-80 dólares

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

estadounidenses por kilómetro.

Distribución del mercado y panorama competitivo

El mercado mundial de alambre de molibdeno presenta un patrón de competencia regional, con China dominando con bajo costo y alta producción, Estados Unidos y Japón centrándose en aplicaciones de alta tecnología y alta gama, Europa centrándose en la protección del medio ambiente y la certificación de calidad, y Rusia compitiendo con ventajas de precio. Las empresas multinacionales han aumentado su competitividad en el mercado mundial mediante la integración de recursos mediante la cooperación técnica y las fusiones y adquisiciones. En el futuro, la cooperación interregional promoverá aún más el intercambio de tecnología y la expansión del mercado.

10.1.2 Análisis del tamaño del mercado y de la demanda

El tamaño del mercado global de electroerosión por hilo de molibdeno continúa expandiéndose con el crecimiento de la demanda de mecanizado de alta precisión, y lo siguiente se analiza desde tres aspectos: tamaño del mercado, impulsores de la demanda y distribución regional.

Tamaño del mercado

Según los datos de la industria, el tamaño del mercado mundial de electroerosión por hilo de molibdeno será de unos 500 millones de dólares en 2024 y se espera que alcance los 750 millones de dólares en 2030, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) de alrededor del 7%. El crecimiento en el tamaño del mercado se debe principalmente a la amplia aplicación de equipos de electroerosión por hilo en las industrias de fabricación de moldes, aeroespacial y de semiconductores. En cuanto a la producción, la producción mundial de alambre de molibdeno en 2024 será de unas 12.000 toneladas, de las cuales China representará el 60% (7.200 toneladas), Estados Unidos el 15% (1.800 toneladas), Japón el 10% (1.200 toneladas), Europa el 10% (1.200 toneladas) y otras regiones el 5% (600 toneladas). Por área de aplicación, la fabricación de moldes representó el 40% de la cuota de mercado, la aeroespacial el 25%, los semiconductores el 20%, las fuentes de luz eléctrica el 10% y otros campos el 5%.

Impulsores de la demanda

Necesidades de fabricación de moldes: La fabricación de moldes es el área de aplicación más grande del alambre de electroerosión por hilo, especialmente en las industrias automotriz, electrónica y de electrodomésticos. Los moldes de alta precisión (tolerancias $\pm 0,005$ mm) tienen requisitos estrictos para la tolerancia de diámetro ($\pm 0,001$ mm), resistencia a la tracción (≥ 2000 MPa) y rugosidad superficial ($Ra \leq 0,02$ micras) de los alambres de molibdeno, lo que impulsa el crecimiento de la demanda del mercado.

Demanda aeroespacial: El campo aeroespacial tiene una fuerte demanda de estabilidad a alta temperatura (resistencia a la tracción a $1500\text{ °C} \geq 1800$ MPa) y resistencia a la fatiga (vida útil ≥ 10 veces) del alambre de molibdeno, que se utiliza para procesar álabes de turbinas, piezas de aleación de titanio, etc., lo que representa el 25% de la demanda del mercado.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Demanda de semiconductores y microelectrónica: La industria de los semiconductores tiene una demanda en rápido crecimiento de alambre de molibdeno ultrafino (0,05-0,08 mm de diámetro) para la fabricación de obleas y MEMS, aumentando su cuota de mercado del 10% en 2015 al 20% en 2024.

Demanda de nuevas fuentes de energía y luz eléctrica: El nuevo campo de energía (como la fabricación de células fotovoltaicas) y la industria de fuentes de luz eléctrica (como la lámpara de sodio de alta presión) tienen altos requisitos de alta conductividad (18-20 MS / m) y resistencia a altas temperaturas (1500-2000 °C) de alambre de molibdeno, lo que promueve el desarrollo de la diversificación del mercado.

Globalización y avance tecnológico: La transformación digital de la industria manufacturera global y las tecnologías de producción inteligentes (como las máquinas cortadoras de alambre CNC de cinco ejes) han mejorado la eficiencia del uso de alambre de molibdeno y estimulado la demanda del mercado.

Distribución regional de la demanda

Mercado asiático: Asia (especialmente China, Japón y Corea del Sur) es el mayor mercado consumidor mundial de alambre de molibdeno, representando el 50% del mercado. El rápido desarrollo de la industria de fabricación de moldes de China ha impulsado la demanda de alambre de molibdeno de 0,18-0,2 mm, con un consumo anual de unas 4.000 toneladas. Japón y Corea del Sur están dominados por las aplicaciones de semiconductores y fuentes de luz eléctrica, y la demanda de alambre de molibdeno ultrafino representa el 30%.

Mercado norteamericano: El mercado norteamericano representa el 25% de la cuota de mercado mundial, siendo las industrias aeroespacial y de semiconductores la principal demanda. Existe una fuerte demanda de alambre de molibdeno de alto rendimiento (resistencia a la tracción ≥ 2200 MPa) de las empresas estadounidenses, con un consumo anual de unas 1.500 toneladas.

Mercado europeo: El mercado europeo representa el 20% de la cuota de mercado mundial, dominado por Alemania, Francia e Italia, y la demanda se concentra en la fabricación de moldes aeroespaciales y de automoción, con un consumo anual de unas 1.000 toneladas. La demanda de alambre de molibdeno respetuoso con el medio ambiente (que cumple con RoHS) está creciendo rápidamente en Europa.

Otras regiones: América del Sur, África y Medio Oriente tienen una menor demanda de alambre de molibdeno, que representa el 5% de la cuota de mercado mundial, utilizado principalmente para la fabricación general de moldes y la pulverización térmica, con un consumo anual de alrededor de 500 toneladas.

Desafíos y oportunidades del mercado

Los desafíos del mercado incluyen la volatilidad de los precios de las materias primas (fluctuaciones del 10-15% en los precios del concentrado de molibdeno), las estrictas regulaciones ambientales

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

(por ejemplo, EU REACH) y las presiones competitivas de los nuevos materiales (por ejemplo, el alambre de acero galvanizado). Las oportunidades radican en la creciente demanda de mecanizado de alta precisión, la difusión de tecnologías de producción inteligentes y el rápido crecimiento de mercados emergentes como India y el sudeste asiático. En el futuro, el mercado se desarrollará en la dirección de alto rendimiento, protección del medio ambiente y bajo costo.

10.2 Tendencias de desarrollo

El desarrollo futuro de la electroerosión por hilo de molibdeno está influenciado por la innovación tecnológica, los requisitos de protección del medio ambiente y la competencia en nuevos materiales. El siguiente es un análisis detallado de la tendencia de desarrollo de la industria desde tres aspectos: la investigación y el desarrollo de alambres de diámetro más delgado, el proceso de producción de protección del medio ambiente y la tendencia de la sustitución de nuevos materiales.

10.2.1 Investigación y desarrollo de alambre de diámetro más delgado

Con el rápido desarrollo de las industrias de microelectrónica, semiconductores y dispositivos médicos, la demanda de alambre de molibdeno de diámetro ultrafino ($\leq 0,08$ mm de diámetro) continúa creciendo. A continuación se analiza la tendencia de investigación y desarrollo del alambre de molibdeno de diámetro más delgado desde tres aspectos: desafíos técnicos, mejora de procesos y perspectivas de aplicación.

Desafíos técnicos

La producción de alambre de molibdeno ultrafino (diámetro 0,03-0,08 mm) presenta requisitos más altos para las materias primas, el proceso de trefilado y la tecnología de prueba. La materia prima necesita utilizar polvo de molibdeno de ultra alta pureza (pureza $\geq 99,99\%$, tamaño de partícula 0,5-2 micras) para reducir el daño de las impurezas a la microestructura. El proceso de trefilado requiere una máquina de trefilado de ultra alta precisión (precisión de control de tensión $\pm 0,005$ N, velocidad 2-10 m/s) y un troquel de trefilado de diamante natural (rugosidad de la superficie del orificio del troquel Ra 0,005 micras, vida útil 500 horas), y la tasa de reducción de superficie de una sola pasada se controla al 5-8% para evitar la rotura del hilo. La tecnología de inspección requiere el uso de un instrumento de medición de alambre láser de alta resolución (precisión $\pm 0,00005$ mm) y un microscopio electrónico de barrido (resolución de 0,01 micras) para garantizar una tolerancia de diámetro de $\pm 0,0005$ mm y una rugosidad superficial de Ra $\leq 0,01$ micras.

Mejoras en los procesos

Tecnología de trefilado micro: utilizando un proceso de trefilado de 40-50 veces, combinado con recocido intermedio (temperatura 800-1000 °C, conservación del calor 5-10 segundos, protección de hidrógeno), el diámetro del alambre de molibdeno se puede reducir gradualmente de 0,5 mm a 0,05 mm, y la tasa de rotura del alambre se controla por debajo del 0,01%.

Optimización del tratamiento de la superficie: El pulido electrolítico por pulsos (frecuencia 100 Hz, ciclo de trabajo 60%, densidad de corriente 15 A/dm²) reduce la rugosidad de la superficie a Ra 0,008 micras y mejora la estabilidad de la descarga.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Dopaje y aleación: se agrega 0.1-0.3% de óxido de cerio (CeO_2) u óxido de itrio (Y_2O_3) para aumentar la resistencia a la tracción a 2400 MPa a través del fortalecimiento por precipitación para cumplir con los requisitos de alta resistencia del alambre de molibdeno ultrafino.

Monitoreo en línea: La introducción de la medición láser en línea y el sistema de detección de corrientes de Foucault puede monitorear el diámetro y los defectos de la superficie en tiempo real, ajustar automáticamente los parámetros de dibujo y aumentar la eficiencia de la producción en un 15%.

Perspectivas de aplicación

La investigación y el desarrollo del alambre de molibdeno ultrafino ha promovido su aplicación en los campos de la microelectrónica y la medicina. El alambre de molibdeno con un diámetro de 0,05 mm se puede utilizar para cortar obleas de semiconductores, y la tolerancia del ancho de la ranura $\pm 0,001$ mm; El alambre de molibdeno de 0,03 mm de diámetro es adecuado para el procesamiento de dispositivos médicos (por ejemplo, moldes de stents cardíacos) y tiene una rugosidad superficial de Ra 0,005 micras, lo que cumple con los requisitos de ultra alta precisión. En el futuro, con el desarrollo de 5G, inteligencia artificial y tecnología biomédica, se espera que la demanda del mercado de alambre de molibdeno ultrafino crezca a una tasa de crecimiento anual compuesta del 10%, lo que representa el 30% del mercado mundial para 2030.

10.2.2 Proceso de producción respetuoso con el medio ambiente

El proceso de producción respetuoso con el medio ambiente es una importante tendencia de desarrollo de la industria del alambre de molibdeno, que responde a los requisitos de la fabricación ecológica mundial y el desarrollo sostenible. A continuación se analiza el desarrollo de procesos amigables con el medio ambiente desde tres aspectos: producción de baja energía, tratamiento de líquidos residuales y materiales reciclables.

Tecnología de producción de baja energía

La producción convencional de alambre de molibdeno (por ejemplo, sinterización, tratamiento térmico) consume un alto nivel de energía (aprox. 5000 kWh por tonelada de alambre de molibdeno). Las nuevas tecnologías de baja energía incluyen:

Horno de sinterización de alta eficiencia: horno de sinterización por inducción de frecuencia media (temperatura 1800-2000 °C, consumo de energía reducido en un 20%), equipado con sistema de recuperación de calor (tasa de recuperación del 30%), el consumo total de energía se reduce a 4000 kWh / tonelada.

Trefiladora de ahorro de energía: Utilizando una trefiladora accionada por un servomotor (5-8 kW de potencia, 15% más eficiente), el consumo de energía de fricción se reduce en un 30% optimizando la velocidad de trefilado (10-15 m/s) y la formulación del lubricante (viscosidad 8-15 cSt).

Tratamiento térmico a baja temperatura: El desarrollo de la tecnología de recocido al vacío a baja

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

temperatura (temperatura 1000-1200 °C, grado de vacío $\leq 10^{-4}$ Pa) reduce el consumo de energía del tratamiento térmico en un 25%, al tiempo que mantiene la resistencia a la tracción de más de 2000 MPa.

Tratamiento de residuos líquidos y gaseosos

El lavado cáustico y el electropulido en la producción de alambre de molibdeno producen líquidos residuales que contienen metales pesados, que son costosos e ineficientes de eliminar. Las nuevas tecnologías de tratamiento respetuosas con el medio ambiente incluyen:

Tratamiento de líquidos residuales de ciclo cerrado: La neutralización ácido-base (pH 6-8) y la tecnología de filtración por membrana (tamaño de poro de 0,1 micras) se utilizan para aumentar la tasa de eliminación de iones de metales pesados en el líquido residual al 98% y reducir el costo del tratamiento en un 30%.

Purificación de gases de escape: En el proceso de reducción de hidrógeno y tratamiento térmico, se utilizan unidades de adsorción de carbón activado y combustión catalítica (tasa de eliminación $\geq 99\%$) para reducir los compuestos orgánicos volátiles (COV) y las emisiones de óxidos a menos de 0,01 mg/m³, de acuerdo con las normas de emisiones de la UE.

Recuperación de recursos: Desarrollar la tecnología de recuperación de iones de molibdeno en líquidos residuales (como resina de intercambio iónico, tasa de recuperación del 90%) y utilizar el molibdeno recuperado para producir productos de molibdeno de baja pureza, reduciendo los costos de materia prima en un 10%.

Materiales reciclables y envases ecológicos

El uso de lubricantes reciclables (que contienen un 5 % de aceite de base biológica, una tasa de degradación del 95 %) y materiales de embalaje respetuosos con el medio ambiente (por ejemplo, plásticos biodegradables, espesor de envasado al vacío de 0,05 mm) reduce la contaminación ambiental en el proceso de producción. El troquel de trefilado está hecho de diamante policristalino renovable (PCD), lo que prolonga la vida útil en un 20% y reduce el consumo de recursos. Los envases ecológicos se llenan con vacío o gas inerte (argón o nitrógeno, pureza $\geq 99,99\%$) para garantizar la resistencia a la oxidación del alambre de molibdeno durante el almacenamiento y reducir los residuos de envases en un 50%.

Perspectivas de aplicación

El proceso de producción respetuoso con el medio ambiente reduce el impacto ambiental de la producción de alambre de molibdeno y está en línea con las tendencias mundiales de fabricación ecológica (por ejemplo, el Pacto Verde de la UE). La tecnología de bajo consumo de energía y el sistema de tratamiento de líquidos residuales reducen los costos de producción en un 15-20% y mejoran la competitividad del mercado. El uso de materiales reciclables está impulsando el modelo de economía circular, y se espera que el alambre de molibdeno, respetuoso con el medio ambiente, represente el 40% del mercado mundial para 2030, con un rápido crecimiento en Europa y América del Norte, especialmente en Europa.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

10.2.3 Sustitución de nuevos materiales

Con el desarrollo de una nueva tecnología de materiales, la electroerosión por hilo de molibdeno se enfrenta a la presión competitiva de otros materiales de alto rendimiento. A continuación se analiza la tendencia de sustitución de nuevos materiales desde tres aspectos: los tipos de materiales alternativos, los desafíos técnicos y las perspectivas de mercado.

Tipos de materiales alternativos

Alambre de acero galvanizado: El alambre de acero galvanizado mejora la conductividad y la resistencia a la corrosión al galvanizar la superficie del alambre de acero (espesor de 5-10 micras) al 50% del alambre de molibdeno (\$ 20-30 por kilómetro). Su resistencia a la tracción (1500-1800 MPa) es menor que la del alambre de molibdeno, pero es adecuado para la fabricación de moldes de baja precisión.

Alambre compuesto a base de cobre: El alambre compuesto a base de cobre (por ejemplo, aleación de cobre-tungsteno con 20-30% de contenido de tungsteno) tiene alta conductividad (25-30 MS / m) y resistencia al desgaste, adecuado para electroerosión por hilo de precisión media y alta, y el precio es de \$ 40-60 por kilómetro.

Filamento compuesto de fibra de carbono: El filamento compuesto de fibra de carbono es liviano (densidad 1.8 g / cm³) y de alta resistencia (2000 MPa) mediante la aplicación de un recubrimiento conductor (grafito o metal, espesor de 1-2 micras), pero la conductividad (10-15 MS / m) es menor que la del alambre de molibdeno, lo que lo hace adecuado para escenarios específicos de microfabricación.

Alambres recubiertos de cerámica: Los alambres recubiertos de cerámica (por ejemplo, circonio o nitruro de silicio, de 0,5-1 micras de espesor) tienen alta dureza (HV 2000) y resistencia a altas temperaturas (1500 °C), pero son caros de producir (\$ 80-100 por kilómetro).

Desafíos técnicos

Los materiales alternativos tienen limitaciones en términos de rendimiento y costo. La resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la tracción del alambre de acero galvanizado son insuficientes, lo que es difícil de satisfacer las necesidades del procesamiento aeroespacial y de semiconductores; El proceso de producción de alambre compuesto a base de cobre es complejo y la uniformidad (desviación ± 0.002 mm) es difícil de comparar con el alambre de molibdeno; La escasa conductividad y estabilidad de descarga del filamento compuesto de fibra de carbono limitan su aplicación en entornos de descarga de alta frecuencia. El costo de producción del alambre recubierto de cerámica es alto y la fuerza de unión del recubrimiento (≤ 8 MPa) es menor que la del recubrimiento de emulsión de grafito del alambre de molibdeno (10 MPa). Además, las normas de ensayo para materiales alternativos (por ejemplo, tolerancias de diámetro, rugosidad de la superficie) no se han armonizado, lo que limita su adopción en el mercado.

Perspectivas del mercado

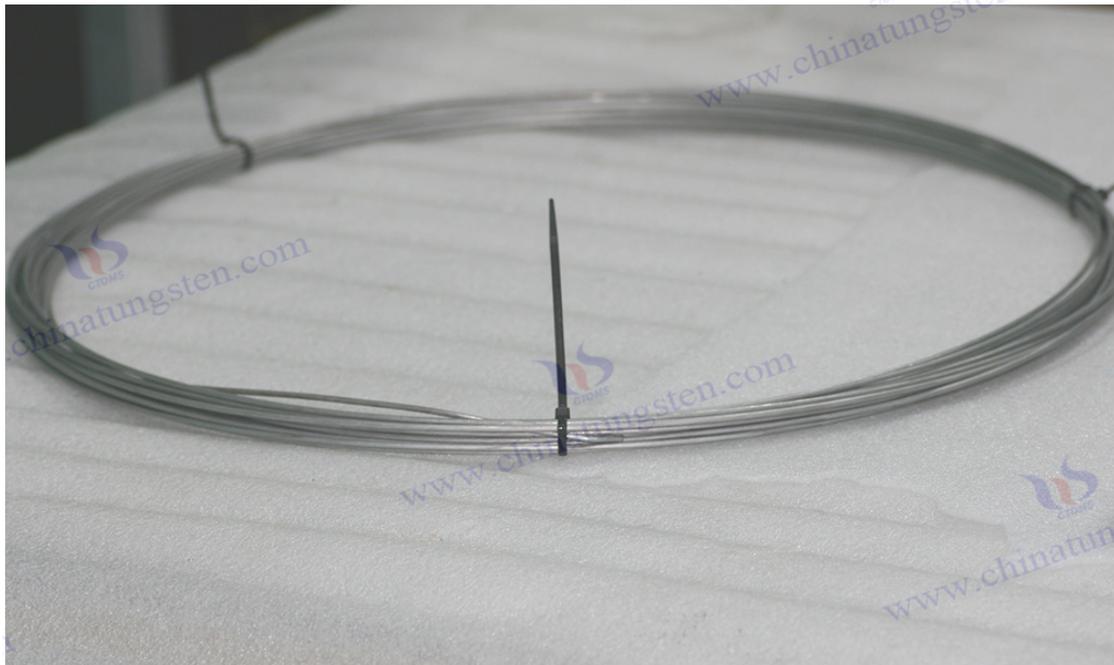
A pesar de las ventajas de costo de los materiales alternativos, el alambre de molibdeno seguirá

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

siendo el material principal para la electroerosión por hilo debido a su alta resistencia a la tracción (2000-2300 MPa), excelente conductividad eléctrica (18-20 MS / m) y calidad de superficie ($Ra \leq 0.02$ micras), y se espera que su participación de mercado se mantenga por encima del 70% para 2030. Los materiales alternativos ocuparán un cierto mercado en áreas de baja precisión y bajo costo, como la fabricación general de moldes, y se espera que representen el 20% del mercado mundial. En el futuro, la tecnología compuesta de alambre de molibdeno y nuevos materiales (como el alambre compuesto de molibdeno-cobre o el alambre recubierto de fibra de molibdeno-carbono) puede convertirse en una nueva dirección de desarrollo, combinando las ventajas de ambos para satisfacer la demanda diversificada del mercado.

Perspectivas de aplicación

La tendencia a la sustitución de nuevos materiales ha promovido el desarrollo diversificado de la tecnología de electroerosión por hilo. El alambre de molibdeno continuará dominando el campo del procesamiento de materiales de alta precisión y alta dureza, mientras que el alambre de acero galvanizado y el alambre compuesto a base de cobre crecerán rápidamente en el mercado de gama baja. Se espera que los materiales compuestos, como los alambres recubiertos de cerámica de molibdeno, abran nuevas aplicaciones en microelectrónica y dispositivos médicos, con una cuota de mercado del 10% que se espera que alcance el 10% para 2030.



CTIA GROUP LTD electroerosión por hilo de molibdeno

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Capítulo 11 Instalación y uso de la electroerosión por hilo de molibdeno

Como consumibles principales en el corte de alambre de electroerosión, la instalación, operación y mantenimiento de la electroerosión por hilo de molibdeno afecta directamente la precisión del procesamiento, la eficiencia y la vida útil del equipo. Los pasos de instalación correctos, los métodos de uso estandarizados y las medidas de mantenimiento científico pueden maximizar el rendimiento del alambre de molibdeno, reducir la tasa de rotura del cable y mejorar la calidad del procesamiento. Este capítulo discutirá en detalle los pasos de instalación, las precauciones de uso y los métodos de mantenimiento y reemplazo de la electroerosión por hilo de molibdeno, y analizará en profundidad los principios técnicos, las especificaciones de operación, los requisitos del equipo y los parámetros del proceso.

11.1 Pasos de instalación del hilo EDM

La instalación adecuada de la electroerosión por hilo de molibdeno es la base para garantizar la estabilidad y la precisión del procesamiento. El proceso de instalación implica roscado, fijación, ajuste de la rueda y control de contacto del bloque conductor, lo que requiere una operación precisa para evitar daños al cable de molibdeno o fallas en el equipo. A continuación se presenta un análisis detallado desde dos aspectos: roscado y fijación, y control de contacto entre la rueda guía y el bloque conductor.

11.1.1 Roscado y fijación de alambre de molibdeno

El roscado y la fijación del alambre de molibdeno es un paso clave antes de que se inicie el equipo de corte de alambre, lo que afecta directamente la estabilidad de la tensión y el buen funcionamiento del alambre de molibdeno.

Principio técnico

El roscado de alambre es el proceso de pasar el alambre de molibdeno desde el barril de almacenamiento de alambre a través de la rueda guía, el bloque conductor y el área de procesamiento, y finalmente fijarlo en la rueda de bobinado. El proceso de fijación debe garantizar que la tensión del alambre de molibdeno sea uniforme (generalmente 2-5 N) y evitar la deformación o relajación por tracción. El diámetro del alambre de molibdeno suele ser de 0,05 a 0,3 mm, la tolerancia es de $\pm 0,001$ mm y la rugosidad de la superficie $Ra \leq 0,02$ micras. El accesorio debe proporcionar una fuerza de sujeción estable (10-20 N) para evitar deslizamientos o roturas.

Procedimiento

Preparación: Verifique la apariencia del alambre de molibdeno para asegurarse de que no haya rayones en la superficie, óxidos o defectos de curvatura (usando una lupa, aumento de 20-50x). Confirme la limpieza del tambor de almacenamiento y la rueda de bobinado, elimine el polvo y el aceite (limpie con etanol absoluto, pureza $\geq 99,9\%$). Calibra la posición de la rueda guía y el bloque conductor de la electroerosión por hilo para garantizar que la precisión de alineación \pm de 0,01 mm.

Proceso de roscado: El alambre de molibdeno se conduce fuera del cilindro de almacenamiento de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

alambre y pasa a través de la rueda guía superior, el área de procesamiento, la rueda guía inferior y el bloque conductor mediante un dispositivo de roscado manual o automático (velocidad 1-5 m / min) a su vez. Al roscar, es necesario mantener el alambre de molibdeno recto, evitar enrollarse o anudarse y controlar la temperatura ambiente de funcionamiento a 20 ± 2 °C y la humedad 40-60% para evitar interferencias electrostáticas.

Fijación del alambre de molibdeno: El extremo del alambre de molibdeno se fija en la rueda tensora y se utiliza un dispositivo de sujeción especial (fuerza de sujeción 15 N, área de contacto 2-5 mm²). La tensión inicial (2-3 N) se ajusta mediante un dispositivo de ajuste de tensión (precisión $\pm 0,05$ N) para garantizar que el alambre de molibdeno se estrese uniformemente en el área de mecanizado. Verifique la trayectoria del alambre de molibdeno para asegurarse de que no haya una flexión excesiva (radio de curvatura ≥ 10 mm).

Verificación y ajuste: ponga en marcha el equipo para que funcione a baja velocidad (0,1-0,5 m/s), observe la trayectoria de funcionamiento del alambre de molibdeno y utilice un telémetro láser (precisión $\pm 0,001$ mm) para comprobar la uniformidad de la tensión y la desviación de la trayectoria. Ajuste la posición de la rueda guía (precisión $\pm 0,005$ mm) para garantizar que el alambre de molibdeno funcione sin problemas sin vibraciones ni desplazamientos.

Optimización de procesos y desafíos

Durante el proceso de enhebrado, se deben utilizar herramientas de enhebrado especiales (como agujas guía de alambre de molibdeno, de 0,5 mm de diámetro) para evitar daños en la superficie causados por la operación manual. El dispositivo de roscado automático (equipado con un servomotor con precisión de control de velocidad $\pm 0,1$ m/min) aumenta la eficiencia en un 30%, pero requiere una calibración regular (cada 500 horas). El desafío es lidiar con la rotura de alambre de molibdeno de diámetro fino ($\leq 0,08$ mm de diámetro), que se puede resolver reduciendo la velocidad de roscado (1-2 m / min) y optimizando el material de la rueda guía (diamante cerámico o policristalino, rugosidad superficial Ra 0,01 μ m). Durante el proceso de fijación, es necesario evitar una fuerza de sujeción excesiva (> 20 N) para evitar la deformación local del alambre de molibdeno.

Importancia de la aplicación

El enhebrado y la fijación correctos garantizan la estabilidad de la tensión y el buen funcionamiento del alambre de molibdeno durante el procesamiento. El alambre de molibdeno con una desviación de tensión de $\pm 0,05$ N puede reducir la fluctuación del espacio de descarga a 0,001 mm y mejorar la precisión del mecanizado en un 20%. Los pasos de instalación estandarizados también reducen la rotura del cable (del 0,1% al 0,03%) y prolongan la vida útil del alambre de molibdeno (100-150 horas) para herramientas de alta precisión y piezas aeroespaciales.

11.1.2 Control de contacto entre la rueda guía y el bloque conductor

La rueda guía y el bloque conductor son los componentes clave de la máquina cortadora de alambre para controlar el funcionamiento y la descarga del alambre de molibdeno, y su control de contacto afecta directamente la estabilidad del procesamiento y la pérdida de electrodos.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Principio técnico

Las poleas guía se utilizan para guiar el alambre de molibdeno a lo largo de una trayectoria predeterminada con baja fricción (coeficiente de fricción $\leq 0,1$) y alta precisión (excentricidad $\leq 0,005$ mm). El bloque conductor transmite una corriente de descarga (10-20 A/cm²) a través de cables de molibdeno de contacto, y se debe garantizar que la resistencia de contacto sea $\leq 0,01$ ohmios para evitar sobrecalentamiento o daños por arco. Los materiales de las ruedas guía y los bloques conductores (por ejemplo, ruedas guía de cerámica, bloques conductores de aleación de cobre y tungsteno) deben tener una alta resistencia al desgaste (dureza HV 1500-2000) y conductividad eléctrica (conductividad 20-30 MS/m).

Procedimiento

Instalación y calibración de la rueda guía: seleccione una rueda guía cerámica de alta precisión (diámetro 10-20 mm, rugosidad superficial Ra 0,01 micras), instálela en el asiento de la rueda guía y utilice un instrumento de alineación láser (precisión $\pm 0,002$ mm) para calibrar el eje de la rueda guía y garantizar que la excentricidad $\leq 0,005$ mm. Compruebe la redondez de la ranura de la rueda guía (error $\leq 0,001$ mm) para asegurarse de que el alambre de molibdeno circule sin desplazamiento.

Instalación de bloques conductores: Se selecciona e instala en el dispositivo conductor el bloque conductor de aleación de cobre y tungsteno (contenido de tungsteno 70-80%, conductividad 25 MS / m), la presión de contacto se controla a 5-10 N y el área de contacto es de 2-5 mm². La resistencia de contacto se mide utilizando un medidor de alta precisión (exactitud $\pm 0,001$ ohmios) para garantizar una $\leq 0,01$ ohmios.

Control de contacto: El sistema de servocontrol ajusta la presión de contacto de la rueda guía y el bloque conductor (precisión $\pm 0,01$ N) para mantener la tensión del alambre de molibdeno de 2-5 N. Monitoreo en tiempo real de la velocidad de la rueda guía (100-500 rpm) y la temperatura del bloque conductor (≤ 80 °C) para evitar el calor por fricción o el daño al arco.

Ajuste dinámico: Inicie el dispositivo para que funcione a baja velocidad (0,1-0,5 m/s), utilice un sensor de vibración (sensibilidad 0,01 mm/s²) para detectar la vibración de la rueda guía, ajuste el ángulo de la rueda guía (precisión $\pm 0,01$ °) para eliminar la desviación. Se utiliza un termómetro infrarrojo (precisión ± 1 °C) para controlar la temperatura del bloque conductor y ajustar el caudal de refrigerante (0,5-1 L/min) para disipar el calor.

Optimización de procesos y desafíos

Las ruedas guía deben limpiarse regularmente (cada 100 horas, con un limpiador ultrasónico, frecuencia 40 kHz, 5 minutos) para eliminar los depósitos superficiales y mantener baja la fricción. El bloque conductor debe pulirse regularmente (cada 200 horas, con papel de lija de diamante, malla de tamaño de grano 2000) para garantizar que la superficie de contacto sea plana y que la resistencia de contacto sea $\leq 0,01$ ohmios. El desafío radica en la alta sensibilidad de la manipulación de diámetros de alambre finos ($\leq 0,08$ mm), que se puede resolver optimizando el diseño de la ranura de la rueda guía (ranura en V, ángulo 30-45°) y el área de contacto del bloque conductor (1-2 mm²). El sistema de control automático (PLC, tiempo de respuesta < 10 ms) ajusta los parámetros de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

contacto en tiempo real y mejora la estabilidad en un 30%.

Importancia de la aplicación

El control de contacto preciso entre la rueda guía y el bloque conductor puede controlar la desviación del funcionamiento del alambre de molibdeno a ± 0.001 mm, y la estabilidad de descarga se puede mejorar en un 25%. La baja resistencia de contacto ($\leq 0,01$ ohmios) reduce las pérdidas de electrodos en un 20% y prolonga la vida útil del bloque conductor (500-1000 horas). Estas medidas garantizan un mecanizado de alta precisión (por ejemplo, tolerancias de molde $\pm 0,005$ mm) para satisfacer las necesidades de las industrias aeroespacial y de semiconductores.

11.2 Precauciones para el uso de electroerosión por hilo de molibdeno

El uso correcto de la electroerosión por hilo de molibdeno es la clave para garantizar la calidad del procesamiento y la eficiencia del equipo, lo que implica la configuración de los parámetros de corriente y voltaje, evitando la rotura y el deslizamiento del cable y otros aspectos. A continuación se presenta un análisis detallado desde dos aspectos.

11.2.1 Ajustes de los parámetros de corriente y tensión

Los parámetros de corriente y voltaje afectan directamente la eficiencia de descarga, la velocidad de procesamiento y la pérdida de alambre de molibdeno, y deben optimizarse de acuerdo con el material de la pieza de trabajo, los requisitos de procesamiento y las especificaciones del alambre de molibdeno.

Principio técnico

La electroerosión por hilo elimina el material creando una chispa entre el hilo de molibdeno y la pieza de trabajo mediante una descarga de pulso de alta frecuencia (frecuencia 10-50 kHz). La densidad de corriente ($10-20$ A/cm²) y el voltaje (50-100 V) deben coincidir con la conductividad del alambre de molibdeno (18-20 MS/m) y la conductividad del material de la pieza de trabajo (por ejemplo, 7-10 MS/m para acero). Una corriente o voltaje excesivos harán que el cable de molibdeno se sobrecaliente (temperatura > 500 °C), lo que aumentará el riesgo de rotura del cable; Los parámetros demasiado bajos reducirán la eficiencia del procesamiento. Las normas (por ejemplo, YS/T 357-2006) recomiendan anchos de pulso de 20-100 μ s e intervalos de pulso de 50-200 μ s.

Código de Conducta

Selección de parámetros: Seleccione los parámetros de corriente y voltaje de acuerdo con el material de la pieza de trabajo. Por ejemplo, al mecanizar carburo de tungsteno (dureza HRC 60-70), la densidad de corriente se establece en 15 A/cm², el voltaje es de 80 V y el ancho de pulso es de 50 μ s. Al mecanizar aleación de aluminio (conductividad 30 MS / m), la densidad de corriente es de 10 A / cm², el voltaje es de 60 V y el ancho de pulso es de 30 μ s.

Ajustes de potencia de pulso: Utilizando una fuente de alimentación de pulso de alta frecuencia (frecuencia 20-30 kHz, precisión $\pm 0,1\%$), el ancho de pulso y el espaciado se ajustan mediante un sistema de control numérico (CNC, tiempo de respuesta < 10 ms) para garantizar una energía de descarga uniforme.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Adaptación del refrigerante: Utilice un refrigerante que contenga un 5% de etilenglicol (viscosidad 5-10 cSt, pH 7-8) con un caudal de 0,5-1 L / min, mantenga la temperatura del área de descarga ≤ 80 °C y reduzca el daño térmico del alambre de molibdeno.

Monitoreo en tiempo real: Monitoreo en tiempo real de los parámetros de descarga a través de sensores de corriente (precisión ± 0.1 A) y voltímetro (precisión ± 0.1 V), y reduce automáticamente la frecuencia de pulso (reducción del 20%) o suspende el procesamiento cuando se encuentra anormal (como fluctuación de corriente $>10\%$).

Optimización de procesos y desafíos

Los ajustes de los parámetros deben optimizarse de acuerdo con el diámetro del alambre de molibdeno, por ejemplo, alambre de molibdeno de 0,18 mm para densidades de corriente de 12-15 A/cm², alambre de molibdeno de 0,08 mm para 8-10 A/cm². El reto consiste en equilibrar la velocidad de procesamiento con la vida útil del alambre de molibdeno y optimizar la eficiencia de descarga ajustando dinámicamente los parámetros con un sistema de control adaptativo (basado en el algoritmo PID con un tiempo de respuesta de <5 ms). El refrigerante debe filtrarse regularmente (tamaño de poro de 0,1 micras) para evitar impurezas que afecten a la estabilidad de la descarga.

Importancia de la aplicación

Los parámetros optimizados de corriente y voltaje aumentan la velocidad de procesamiento hasta en un 20 por ciento (de 2 mm/min a 2,4 mm/min) y reducen las pérdidas de hilo de molibdeno hasta en un 15 por ciento. El ajuste preciso de los parámetros garantiza un espacio de descarga uniforme (0,01-0,03 mm), y la tolerancia de mecanizado se controla a $\pm 0,005$ mm, lo que satisface las necesidades de procesamiento de moldes de alta precisión y piezas microelectrónicas.

11.2.2 Evite cables rotos y resbaladizos

Los cables rotos y resbaladizos son problemas comunes en el corte de alambre, lo que provoca interrupciones en el mecanizado y pérdida de precisión. A continuación se presenta un análisis de las medidas preventivas en términos de control de tensión, optimización de la descarga y gestión ambiental.

Principio técnico

Los filamentos rotos suelen estar causados por una tensión excesiva (>5 N), fatiga térmica (temperatura > 500 °C) o defectos superficiales (arañazos $> 0,1$ micras); El cable resbaladizo es causado por una tensión insuficiente (<2 N) o un alto coeficiente de fricción de la rueda guía ($>0,2$). La prevención de la rotura y el deslizamiento del cable se puede lograr optimizando la tensión (2-5 N), los parámetros de descarga (densidad de corriente 10-15 A/cm²) y la calidad de la rueda guía (rugosidad de la superficie Ra 0,01 μ m).

Código de Conducta

Control de tensión: Mantenga la tensión a 2-3 N (alambre de molibdeno de 0,18 mm) o 1-2 N (alambre de molibdeno de 0,08 mm) utilizando un sistema de control de tensión servo (precisión $\pm 0,05$ N). El sensor de tensión (sensibilidad 0,01 N) se monitoriza en tiempo real y se ajusta

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

automáticamente cuando la tensión fluctúa $> 10\%$.

Optimización de la descarga: Establezca el intervalo de pulso de 100-150 μs para reducir la acumulación de calor y evitar el sobrecalentamiento del cable de molibdeno. El uso de descarga de pulso corto (ancho 30-50 μs) reduce el choque térmico y reduce la tasa de rotura del cable al 0,03%.

Mantenimiento de ruedas y bloques: Inspeccione regularmente la ranura de la rueda guía (cada 100 horas) para asegurarse de que no haya desgaste (profundidad de la ranura $< 0,1$ mm). El bloque conductor debe mantenerse limpio (limpiado por ultrasonidos, frecuencia de 40 kHz) con una resistencia de contacto de $\leq 0,01$ ohmios.

Gestión ambiental: Mantenga la temperatura del área de procesamiento a 20 ± 2 °C, la humedad al 40-60% y utilice el dispositivo antiestático (aire ionizante, potencia 100 W) para evitar la adsorción electrostática de impurezas. El refrigerante debe mantenerse limpio (el contenido de impurezas $< 0,01\%$) y el caudal debe ser de 0,5-1 L/min.

Optimización de procesos y desafíos

Para evitar cables rotos, es necesario monitorear los defectos de la superficie del alambre de molibdeno en tiempo real, y se puede usar un probador de corrientes de Foucault en línea (sensibilidad de 0,05 micras) para identificar rayones en el rango de 0,1 micras, y el procesamiento se puede suspender cuando se encuentran defectos. El problema del deslizamiento se puede resolver optimizando el material de la rueda guía (cerámica, coeficiente de fricción 0,08) y el lubricante (5% grafito, viscosidad 10 cSt). El desafío radica en la rotura del diámetro del alambre fino ($\leq 0,08$ mm), que se puede resolver reduciendo la tensión (1-1,5 N) y la frecuencia de descarga (10-20 kHz).

Importancia de la aplicación

Las medidas de precaución efectivas para la rotura y el deslizamiento del cable reducen la tasa de rotura del cable al 0,02% y aumentan la continuidad del procesamiento en un 30%. El funcionamiento estable del alambre de molibdeno garantiza una tolerancia de procesamiento de $\pm 0,005$ mm y una rugosidad superficial de Ra 0,1 micras para cumplir con los exigentes requisitos de las industrias aeroespacial y de semiconductores.

11.3 Mantenimiento y sustitución de la electroerosión por hilo de molibdeno

El mantenimiento regular y el reemplazo oportuno del alambre de molibdeno es la clave para garantizar el funcionamiento estable a largo plazo del equipo de electroerosión por hilo. El siguiente es un análisis desde dos aspectos: ajuste de estanqueidad, limpieza regular e inspección.

11.3.1 Ajuste de la estanqueidad del alambre de molibdeno

El ajuste de la estanqueidad se utiliza para mantener la estabilidad de la tensión del alambre de molibdeno y evitar problemas de procesamiento causados por la holgura o el exceso de tensión.

Principio técnico

La tensión del alambre de molibdeno debe mantenerse a 2-5 N (dependiendo del diámetro),

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

demasiado alta (>5 N) hará que el cable se rompa y demasiado baja (<2 N) causará deslizamiento o desplazamiento. El ajuste de la tensión se realiza mediante servosistemas de control de tensión (precisión $\pm 0,05$ N) y sensores de tensión (sensibilidad 0,01 N), que se optimizan dinámicamente según el material a procesar y el diámetro del alambre de molibdeno.

Código de Conducta

Ajuste inicial: Después de instalar el alambre de molibdeno, establezca la tensión inicial con un dispositivo de ajuste de tensión (2-3 N para alambre de molibdeno de 0,18 mm y 1-2 N para 0,08 mm). El valor de tensión objetivo se introduce a través de la interfaz NC (precisión $\pm 0,01$ N) y el sistema ajusta automáticamente la velocidad de la rueda de bobinado (100-200 rpm).

Ajuste dinámico: Durante el mecanizado, las fluctuaciones de tensión se controlan en tiempo real (frecuencia 10 Hz) mediante un sensor de tensión y se ajustan automáticamente (tiempo de respuesta < 5 ms) cuando se detecta una desviación del > 10%. Por ejemplo, al mecanizar carburo cementado, la tensión se puede aumentar a 4 N; Cuando se procesan materiales blandos como el cobre, esto se reduce a 2 N.

Calibración y validación: Calibre el transductor de tensión (utilizando pesos estándar con una precisión de $\pm 0,01$ N) cada 50 horas para garantizar mediciones precisas. Haciendo funcionar el equipo a baja velocidad (0,1 m/s), utilizando un telémetro láser (precisión $\pm 0,001$ mm) para verificar la desviación de la trayectoria del alambre de molibdeno, ajuste la posición de la rueda guía (precisión $\pm 0,005$ mm).

Registro y análisis: El sistema de adquisición de datos (capacidad de memoria de 1 GB) registra la curva de tensión, analiza la estabilidad de la tensión y optimiza los parámetros de procesamiento (por ejemplo, reduciendo la frecuencia de descarga en un 10%).

Optimización de procesos y desafíos

La expansión térmica del alambre de molibdeno (coeficiente $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) debe considerarse para el ajuste de la tensión, y la tensión debe reducirse adecuadamente (0,2-0,5 N) cuando la temperatura del área de procesamiento aumenta (>80 °C). El reto es que el hilo fino ($\leq 0,08$ mm) es sensible a los cambios de tensión y puede resolverse añadiendo dispositivos de amortiguación (80% de tasa de amortiguación) y optimizando el caudal de refrigerante (0,8 L/min). El sistema automatizado de control de tensión reduce el tiempo de ajuste hasta en un 50% y aumenta la eficiencia.

Importancia de la aplicación

El ajuste preciso de la estanqueidad controla la desviación de la tensión a $\pm 0,05$ N, aumenta la precisión del mecanizado en un 15 % y reduce la tasa de rotura del alambre al 0,02 %. La tensión estable garantiza un espacio de descarga uniforme (0,01-0,03 mm), lo que satisface las necesidades del procesamiento de moldes y piezas microelectrónicas de alta precisión.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

11.3.2 Limpieza e inspección periódicas

La limpieza e inspección periódicas pueden prolongar la vida útil del alambre de molibdeno y los componentes del equipo, reduciendo las tasas de fallas y los defectos de procesamiento.

Principio técnico

La limpieza elimina los residuos de descarga, los óxidos y las impurezas del refrigerante (tamaño de partícula $> 0,1$ micras) de la superficie de los cables de molibdeno, las ruedas guía y los bloques conductores para mantener el acabado y la conductividad de la superficie. La inspección se utilizó para identificar el desgaste del alambre de molibdeno (diámetro reducido $> 0,002$ mm), el desgaste de la ranura de la rueda guía (profundidad $> 0,1$ mm) y el aumento de la resistencia de contacto del bloque conductor ($> 0,01$ ohmios).

Código de Conducta

Limpieza de alambre de molibdeno: Utilice un limpiador ultrasónico (frecuencia 40 kHz, potencia 100 W, solución de limpieza 5% agente de limpieza neutro, temperatura 40-50 °C) cada 50 horas, tiempo de limpieza 5-10 minutos, elimine los residuos y óxidos de la superficie (tasa de eliminación $\geq 99\%$). Después del lavado, enjuague con agua desionizada (conductividad < 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y seque con aire caliente (60 °C, 2 min).

Limpieza e inspección de la rueda: desmontar la rueda guía cada 100 horas, utilizar la limpieza ultrasónica (frecuencia 40 kHz, tiempo 5 minutos), comprobar la profundidad de la ranura (utilizar un perfilador, precisión $\pm 0,001$ mm) y sustituirla cuando el desgaste $> 0,1$ mm. Compruebe el cojinete de la rueda guía (desviación de velocidad $\leq 0,01$ rpm) y añada 0,1-0,2 g de grasa.

Limpieza e inspección de bloques conductores: limpie el bloque conductor cada 200 horas (use etanol absoluto, pureza $\geq 99,9\%$), pule la superficie de contacto (papel de lija de diamante, tamaño de partícula 2000 malla). La resistencia de contacto se mide utilizando un medidor de alta precisión (precisión $\pm 0,001$ ohmios) y se sustituye $> 0,01$ ohmios.

Inspección ambiental del equipo: verifique la temperatura (20 ± 2 °C), la humedad (40-60%) y la calidad del refrigerante (contenido de impurezas $< 0,01\%$) en el área de procesamiento cada 100 horas, y trate el refrigerante con un filtro (tamaño de poro 0,1 micras).

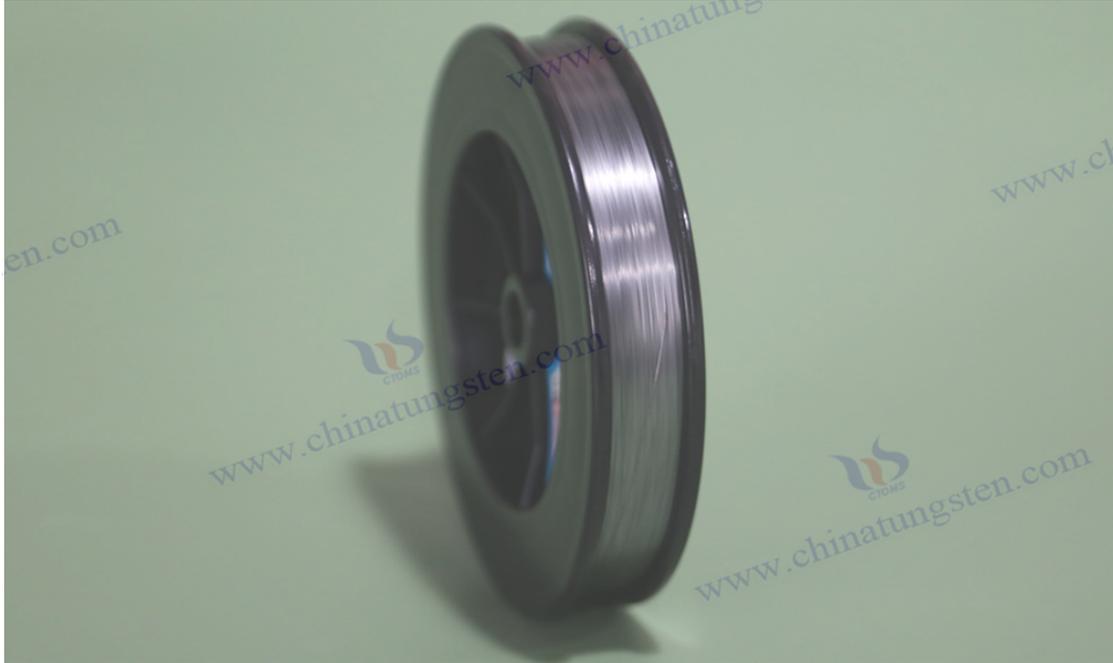
Optimización de procesos y desafíos

Se deben utilizar agentes de limpieza respetuosos con el medio ambiente (tasa de biodegradación $\geq 95\%$) para la limpieza para reducir la contaminación ambiental. La inspección requiere el uso de equipos de inspección de alta precisión (por ejemplo, microscopio láser, aumento de 1000x) para identificar defectos en el rango de 0,05 micras. El desafío radica en la fragilidad de los diámetros de alambre fino, que se puede abordar reduciendo la concentración de la solución de limpieza (3-5%) y la potencia ultrasónica (50-80 W). El sistema de limpieza automatizado (tiempo de respuesta < 10 segundos) reduce el tiempo de limpieza hasta en un 30%.

Importancia de la aplicación

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

La limpieza e inspección regulares mantendrán la rugosidad de la superficie del alambre de molibdeno en Ra 0.015 micras, la resistencia de contacto del bloque conductor ≤ 0.01 ohmios y reducirá la tasa de fallas del equipo en un 20%. Estas medidas prolongan la vida útil del alambre de molibdeno (100-150 horas) y la vida útil de la rueda guía (1000 horas), asegurando una tolerancia de mecanizado de $\pm 0,005$ mm para satisfacer las necesidades del procesamiento aeroespacial y de dispositivos médicos.



CTIA GROUP LTD electroerosión por hilo de molibdeno

Capítulo 12 Seguridad y protección del medio ambiente de la electroerosión por hilo de molibdeno

La producción de alambre de molibdeno implica procesos complejos como la sinterización a alta temperatura, el tratamiento químico y el procesamiento mecánico, que pueden producir contaminantes como polvo, gases de escape y líquidos residuales, y existen riesgos de seguridad en el funcionamiento del equipo. Durante el uso, la electroerosión del alambre de molibdeno producirá trazas de virutas de metal y desechos de refrigerante, y se deben tomar medidas de gestión científica para reducir el impacto ambiental. Este capítulo discutirá en detalle las medidas de seguridad y los requisitos ambientales en la producción y el uso de electroerosión por hilo de molibdeno, y proporcionará un análisis en profundidad del tratamiento de polvo y gases de escape, las especificaciones de seguridad de operación del equipo, el reciclaje y tratamiento de residuos y las tecnologías de producción ecológica.

12.1 Medidas de seguridad durante la producción de electroerosión por hilo de molibdeno

La producción de alambre de molibdeno implica sustancias químicas a alta temperatura, alta presión y maquinaria y equipos de precisión, y existen riesgos potenciales de seguridad, como explosión de polvo, envenenamiento por gases de escape y fallas del equipo. Las medidas de seguridad científicas pueden reducir eficazmente los riesgos y garantizar la seguridad del personal y la estabilidad de la

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

producción. El siguiente es un análisis detallado desde dos aspectos: el tratamiento de polvo y gases de escape y las especificaciones de seguridad de operación del equipo.

12.1.1 Tratamiento de polvo y gases de escape

El polvo y los gases residuales en el proceso de producción de alambre de molibdeno provienen principalmente de la preparación, sinterización, estirado y tratamiento superficial del polvo de molibdeno, que debe tratarse de manera efectiva con tecnología y equipos avanzados para evitar la contaminación ambiental y los peligros para la salud.

Principio técnico: Durante la preparación y sinterización del polvo de molibdeno, se genera polvo de molibdeno en el rango de micras (tamaño de partícula 0,5-5 micras), que tiene un riesgo potencial de explosión (el límite inferior de explosión es de aproximadamente 30 g / m³). Los gases de escape incluyen principalmente compuestos orgánicos volátiles (COV) emitidos por los hornos de reducción de hidrógeno, gases ácidos del decapado y electropulido (por ejemplo, vapor HNO₃) y gases de óxido (por ejemplo, vapor MoO₃) del tratamiento térmico. El tratamiento del polvo se lleva a cabo mediante una filtración de alta eficiencia y tecnología de eliminación de polvo húmedo, mientras que el tratamiento de los gases de escape utiliza la adsorción, la combustión catalítica o la tecnología de neutralización ácido-base para garantizar que las emisiones cumplan con las normas internacionales (por ejemplo, la Directiva de Emisiones Atmosféricas de la UE, COV ≤ 0,01 mg/m³).

Medidas de tratamiento de polvo

Sistema de filtración de alta eficiencia: El filtro de alta eficiencia (HEPA, eficiencia de filtración ≥ 99,97%, tamaño de partícula 0,3 micras) está instalado en el taller de preparación y sinterización de polvo de molibdeno para capturar polvo a nivel de micras, con una capacidad de procesamiento de 1000-5000 m³/h. El sistema está equipado con un sensor de presión diferencial (precisión ± 10 Pa) para monitorear el bloqueo del filtro en tiempo real y reemplazar automáticamente el filtro cuando la presión diferencial > 500 Pa. El filtro está hecho de material compuesto multicapa (fibra de vidrio + carbón activado), lo que garantiza una eficiencia de captura de ≥ del 99,99% y una concentración de emisión de polvo de < 0,1 mg/m³. Reemplace la pantalla del filtro con regularidad (cada 1000 horas) y recicle la pantalla del filtro de residuos de manera cerrada para evitar la contaminación secundaria.

Colector de polvo húmedo: El colector de polvo húmedo Venturi (caudal de agua nebulizada de 0,5-1 L / min, presión de la boquilla de 0,2-0,5 MPa) se utiliza para adsorber polvo a través de agua nebulizada, y la eficiencia de captura es ≥ 99,5%. El colector de polvo está equipado con un sistema de tratamiento de agua de recirculación (tamaño de poro del filtro de 0,1 micras y capacidad de 500 L/h) para eliminar las partículas de molibdeno del agua por precipitación y filtración (tasa de eliminación ≥ 98%). El sistema de reciclaje de agua utiliza un dispositivo de ajuste de pH (pH 6-8) para garantizar que las aguas residuales cumplan con el estándar de descarga (DQO ≤ 50 mg/L). El colector de polvo húmedo también está equipado con una función de limpieza automática (ciclo de limpieza de 24 horas), lo que reduce los costos de mantenimiento en un 20%.

Medidas a prueba de explosiones: Los sistemas de ventilación a prueba de explosiones (volumen de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

aire 2000-3000 m³/h, clase a prueba de explosiones Ex d IIB T4) se instalan en áreas de alto riesgo (por ejemplo, talleres de preparación de polvo de molibdeno) para evitar la acumulación de polvo mediante ventilación de presión negativa (presión -50 Pa). Equipado con un sensor de concentración de polvo (sensibilidad 0,01 g/m³), cuando la concentración de polvo > 20 g/m³, se activa la alarma y el sistema de pulverización se activa automáticamente (presión de agua 0,3 MPa, tiempo de pulverización 10 segundos), reduciendo el riesgo de explosión a menos del 0,01%.

Medidas de tratamiento de los gases de escape:

Sistema de adsorción: torre de adsorción de carbón activado (capacidad de adsorción de 500-1000 kg, eficiencia de adsorción ≥99%), se tratan VOC y gases ácidos, y la concentración de emisiones < 0,01 mg / m³. La torre de adsorción está equipada con un sistema de regeneración (regeneración de vapor, temperatura 120-150 °C, presión 0,2 MPa) para prolongar la vida útil del carbón activado (2000-3000 horas).

Combustión catalítica: En el tratamiento de gases de escape del horno de sinterización, un dispositivo de combustión catalítica (el catalizador es Pt/Pd, temperatura de trabajo 300-500 °C, eficiencia de combustión ≥ 99,5%), VOC se convierte en CO₂ y H₂O, y la emisión cumple con la norma EN 15058 de la UE (VOC ≤ 0,005 mg/m³). La planta está equipada con un sistema de recuperación de calor (30% de recuperación) para reducir el consumo de energía en un 20%.

Neutralización ácido-base: la torre de pulverización de lejía neutraliza los gases de escape de decapado (solución de NaOH al 5-10%, caudal de 1-2 L / min, altura de pulverización de 2-3 metros), y la tasa de eliminación de gas ácido es del ≥98%. La torre de pulverización está equipada con un sistema de control de pH (precisión ± 0,1), que ajusta automáticamente la concentración de la solución de lejía para garantizar que el pH de los gases de escape sea de 6-8.

Optimización de procesos y polvo de desafío

El tratamiento del polvo requiere un mantenimiento regular del filtro (revisado cada 500 horas) para evitar obstrucciones y lo que resulta en una disminución de la eficiencia de la ventilación (<80%). En el tratamiento de gases residuales, la fórmula del catalizador (relación Pt/Pd 1:1, el soporte es γ-Al₂O₃) debe optimizarse para mejorar la eficiencia de la combustión al 99,8%. El reto es hacer frente a altas concentraciones de vapores de MoO₃ (0,1-0,5 mg/m³), que pueden resolverse aumentando el número de capas de la torre de pulverización (3-5 capas) y extendiendo el tiempo de contacto (5-10 segundos). El sistema de control automático (PLC, tiempo de respuesta <10 ms) ajusta el volumen de ventilación y el caudal de los rociadores en tiempo real, aumentando la eficiencia del procesamiento en un 30%.

Importancia de la aplicación

El tratamiento eficiente del polvo y los gases de escape controla la concentración de emisiones de polvo por debajo de 0,05 mg/m³, y las emisiones de gases de escape cumplen con los estándares internacionales (COV ≤ 0,01 mg/m³), reduciendo los riesgos para la salud ocupacional (como una reducción del 50% en el riesgo de enfermedades pulmonares) y la contaminación ambiental. El sistema de tratamiento también reduce la corrosión del equipo (20% más de vida útil del equipo),

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

mejora la seguridad de la producción y cumple con los requisitos del sistema de gestión ambiental ISO 14001.

12.1.2 Especificaciones de seguridad para el funcionamiento del equipo

La producción de alambre de molibdeno involucra hornos de sinterización a alta temperatura, máquinas de trefilado de alta velocidad y equipos de procesamiento químico, que pueden provocar incendios, lesiones mecánicas o envenenamiento químico si no se manejan adecuadamente. Las estrictas normas de seguridad garantizan la seguridad del operador y el funcionamiento estable del equipo.

Principio técnico

Las normas de seguridad cubren el funcionamiento y la gestión de equipos de alta temperatura (temperatura del horno de sinterización 1800-2000 °C), maquinaria de alta velocidad (velocidad de la máquina de trefilado 5-20 m/s) y productos químicos (por ejemplo, ácido sulfúrico, hidróxido de sodio). Las medidas de seguridad incluyen protección de equipos, capacitación del personal, respuesta a emergencias y monitoreo en tiempo real para garantizar una tasa de accidentes de < 0.01%.

Código de Conducta

Seguridad de los equipos de alta temperatura: Los hornos de sinterización y los hornos de tratamiento térmico están equipados con aislamiento térmico (fibras cerámicas, espesor 50-100 mm, conductividad térmica 0,1 W/m·K) y una temperatura superficial de < 60 °C. El operador debe usar ropa protectora para altas temperaturas (resistencia a la temperatura 1000 °C, retardante de llama grado A), equipada con termómetro infrarrojo (precisión ± 1 °C) para monitorear la temperatura del horno en tiempo real y apagarse automáticamente cuando sea anormal (> 2050 °C). El horno está equipado con un sensor de presión (precisión ± 10 Pa) y se activa una alarma cuando el nivel de vacío < 10⁻³ Pa para evitar fugas e incendios.

Seguridad de la maquinaria y el equipo: La trefiladora está equipada con una cubierta protectora (espesor de 2-3 mm, hecha de acero inoxidable) para evitar roturas y salpicaduras de alambre de molibdeno (velocidad > 10 m/s). El área de funcionamiento está equipada con un botón E-STOP (tiempo de respuesta < 0,5 segundos) y está equipada con un sensor de vibración (sensibilidad 0,01 mm/s²) que se detiene automáticamente cuando se detectan vibraciones anormales (>0,1 mm/s²). Los operadores deben usar gafas protectoras (clase de impacto EN 166) y guantes (clase de abrasión 4).

Seguridad química: Los baños de decapado y electropulido están equipados con una campana extractora (volumen de aire 1000-2000 m³/h, presión negativa -50 Pa) para evitar fugas de gas ácido (concentración > 0,1 mg/m³). Los productos químicos se almacenan en recipientes sellados (PTFE, clase de resistencia a la corrosión A) con un detector de fugas (sensibilidad 0,01 ppm) y una activación automática del sistema de escape (1500 m³/h) cuando se detecta una fuga. Los operadores deben usar máscaras antigás (eficiencia de filtración ≥ 99,9%) y ropa protectora (clase de resistencia a la corrosión 5).

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Capacitación del personal y respuesta a emergencias: Se requiere que los operadores reciban capacitación en seguridad (4 horas por sesión dos veces al año) sobre la operación del equipo, el manejo de productos químicos y el rescate de emergencia. El taller está equipado con un extintor (polvo seco, capacidad 5 kg, distancia de pulverización 4-6 m) y lavaojos de emergencia (caudal 15 L/min). Formule un plan de emergencia, y el tiempo de respuesta al incidente < 1 minuto, y el tiempo de evacuación < 5 minutos.

Optimización de procesos y desafíos

Las normas de seguridad exigen una inspección periódica de los equipos (cada 500 horas) para garantizar que los resguardos estén en buen estado (tasa de fallos < 0,01%). Los desafíos radican en el alto consumo de energía (5000 kWh/tonelada) y el riesgo de fuga química en los equipos de alta temperatura, que se pueden abordar optimizando el aislamiento (conductividad térmica < 0,08 W/m·K) e introduciendo un sistema de monitoreo automatizado (tiempo de respuesta < 5 ms). El sistema de adquisición de datos en tiempo real (capacidad de almacenamiento de 1 TB) registra los parámetros de funcionamiento de los equipos, analiza las causas de los accidentes y optimiza las medidas de seguridad.

Importancia de la aplicación

Las estrictas normas de seguridad para el funcionamiento de los equipos han reducido la tasa de accidentes al 0,005% y la tasa de lesiones en un 80%. Las medidas de protección prolongan la vida útil de los equipos (10.000-15.000 horas) y reducen los costes de mantenimiento en un 15%. La capacitación en seguridad y la respuesta a emergencias mejoran la seguridad del taller y cumplen con las normas OSHA 1910, lo que proporciona una garantía estable para la producción de alambre de molibdeno.

12.2 Requisitos de protección del medio ambiente para la electroerosión por hilo de molibdeno

Los requisitos de protección del medio ambiente en la producción y el uso de alambre de molibdeno responden a la tendencia mundial de fabricación ecológica, que abarca el reciclaje y el tratamiento de residuos, la tecnología de producción verde, etc., con el objetivo de reducir la contaminación ambiental y el desperdicio de recursos.

12.2.1 Reciclaje y eliminación de residuos

La producción y el uso de alambre de molibdeno producirán desechos de alambre de molibdeno, chatarra metálica y desechos de refrigerantes, que deben reducirse mediante tecnología científica de reciclaje y tratamiento.

Principio técnico: El alambre de molibdeno residual (diámetro 0,05-0,3 mm, que contiene molibdeno $\geq 99,95\%$) se puede reciclar mediante fundición y la tasa de recuperación es del $\geq 90\%$. Las virutas metálicas (tamaño de partícula de 0,1-10 micras) se recuperan por filtración y precipitación, los residuos de refrigerante (que contienen un 5% de etilenglicol) se tratan por destilación y separación por membrana, y la descarga de residuos cumple con las normas internacionales (por ejemplo, el reglamento REACH de la UE, $DQO \leq 50$ mg/L).

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Medidas de reciclaje y eliminación

Reciclaje de alambre de molibdeno residual: El alambre de molibdeno residual se funde a través de un horno de arco eléctrico al vacío (temperatura 2500-3000 °C, grado de vacío $\leq 10^{-4}$ Pa) para recuperar el metal de molibdeno (pureza $\geq 99,9\%$). El horno está equipado con un sistema de condensación (eficiencia de condensación $\geq 95\%$) para recuperar vapores volátiles de MoO_3 (tasa de recuperación $\geq 90\%$). El molibdeno reciclado se utiliza para producir productos de molibdeno de baja pureza (como placas de molibdeno), lo que reduce los costos de materia prima en un 10%.

Tratamiento de virutas de metal: Las virutas de metal producidas por corte de alambre están separadas por un filtro centrífugo (velocidad de rotación 3000-5000 rpm, tamaño de poro del filtro 0,1 micras) y la tasa de recuperación es $\geq 95\%$. Las virutas de metal se decapan (5% HNO_3 , tiempo 5 minutos) para eliminar los óxidos y luego se vuelven a fundir en palanquillas de molibdeno (densidad $\geq 99\%$).

Tratamiento del refrigerante: El refrigerante se elimina mediante un sistema de separación de membrana de varias etapas (membrana de ósmosis inversa, tamaño de poro de 0,01 micras, capacidad de 500 L/h) para eliminar los iones orgánicos y metálicos, y la DQO se reduce a 30 mg/L. El agua tratada se recicla (tasa de reciclaje $\geq 80\%$) y el líquido residual restante se recicla por destilación (temperatura 100-120 °C, tasa de recuperación 90%), reduciendo las emisiones de líquidos residuales en un 50%.

Clasificación y almacenamiento de residuos: Los residuos se almacenan por separado por tipo (alambre de molibdeno, virutas de metal, refrigerante) en contenedores sellados (acero inoxidable, 2 mm de grosor) para evitar fugas. El área de almacenamiento está equipada con un sistema de ventilación (1000 m^3/h) y un detector de fugas (sensibilidad 0,01 ppm) para mayor seguridad.

Optimización de procesos y desafíos

El reciclaje de alambre de molibdeno residual necesita optimizar los parámetros de fusión (corriente 1000-1500 A, tiempo de retención 2 horas) para aumentar la tasa de recuperación al 95%. El tratamiento del refrigerante requiere la sustitución periódica de los módulos de membrana (cada 2000 horas) para evitar obstrucciones y reducir la eficiencia ($< 80\%$). El reto consiste en tratar con trazas de iones de molibdeno (0,01-0,1 mg/L), que pueden resolverse añadiendo una resina de intercambio iónico (tasa de adsorción \geq del 98%). El sistema de reciclaje automatizado (controlado por PLC, tiempo de respuesta < 10 ms) aumenta la eficiencia del procesamiento en un 20%.

Importancia de la aplicación

El reciclaje y tratamiento de residuos aumenta la utilización de recursos al 90% y reduce la descarga de residuos en un 60%, de acuerdo con la norma ISO 14001. El molibdeno reciclado reduce los costos de producción en un 10% y el refrigerante tratado se puede reciclar, reduciendo el consumo de agua en un 30%. Estas medidas apoyan la economía circular y reducen la huella ambiental.

12.2.2 Tecnologías de producción ecológicas

Las tecnologías de producción ecológicas reducen el impacto ambiental de la producción de alambre

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

de molibdeno a través de equipos de baja energía, materiales renovables y energía limpia.

Principios técnicos Las tecnologías de producción ecológicas incluyen hornos de sinterización de baja energía (4000 kWh/tonelada), lubricantes renovables (aceites de base biológica, tasa de degradación $\geq 95\%$) y energía limpia (solar o eólica, 20-30%). El objetivo es reducir el consumo de energía en la producción en un 20% y las emisiones de residuos en un 50%, en línea con el Pacto Verde de la UE y los objetivos de neutralidad de carbono.

Medidas de producción verde

Equipo de bajo consumo de energía: horno de sinterización por inducción de frecuencia media (temperatura 1800-2000 °C, consumo de energía 4000 kWh / tonelada, reducción del 20%), equipado con sistema de recuperación de calor (tasa de recuperación del 30%) y el consumo de energía se reduce a través de la generación de energía térmica residual (potencia 100-200 kW). La máquina de trefilado utiliza un servomotor (5-8 kW de potencia, un 15% más eficiente) para reducir el consumo de energía por fricción en un 30% optimizando la velocidad de estirado (10-15 m/s).

Lubricantes renovables: Los lubricantes que contienen un 5% de aceite de base biológica (viscosidad 8-15 cSt, tasa de degradación $\geq 95\%$) se aplican uniformemente a través de una bomba de flujo constante (caudal 0,1-0,5 L/min) para reducir la contaminación ambiental en un 50%. El sistema de circulación de lubricante (80% de recuperación) reduce el uso en un 20%.

Aplicación de energía limpia: Se introduce un sistema solar fotovoltaico (500 kW de potencia, 1000 MWh/año) en la nave de producción, lo que representa el 25% del consumo total de energía. La energía eólica (200 kW, 400 MWh/año) se complementa con una reducción del 30% de las emisiones de carbono. El sistema de gestión de energía (EMS, tiempo de respuesta < 5 ms) optimiza la distribución de energía y aumenta la utilización en un 15%.

Embalaje verde: embalaje de plástico degradable (espesor 0,05 mm, tasa de degradación $\geq 90\%$), mediante vacío o llenado de gas inerte (argón o nitrógeno, pureza $\geq 99,99\%$), para garantizar la resistencia a la oxidación del alambre de molibdeno, reducir los residuos de envases en un 50%.

Optimización de procesos y desafíos

La producción verde requiere un mantenimiento regular de los equipos de bajo consumo energético (cada 1.000 horas) para garantizar una eficiencia operativa del $\geq 95\%$. Los lubricantes renovables deben estar formulados de forma óptima (5-10% de aceite de base biológica) para mejorar el rendimiento de la lubricación (coeficiente de fricción $< 0,1$). El reto radica en la naturaleza intermitente de las energías limpias (fluctuaciones de la energía solar \pm del 20%), que pueden resolverse mediante sistemas de almacenamiento de energía (baterías de litio con una capacidad de 500 kWh). El sistema de control automatizado (tiempo de respuesta < 10 ms) aumenta la productividad en un 15 por ciento.

Importancia de la aplicación

La tecnología de producción ecológica reduce el consumo de energía en un 20%, las emisiones de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

residuos en un 50% y la huella de carbono en un 30%, en línea con la directiva RoHS de la UE. Reducir los costos en un 15% y aumentar la competitividad en el mercado en un 20%. Estas tecnologías promueven el desarrollo sostenible de la industria del alambre de molibdeno y satisfacen las necesidades ecológicas de la industria aeroespacial, los semiconductores y otros campos.



CTIA GROUP LTD electroerosión por hilo de molibdeno

Capítulo 13 Problemas comunes y soluciones de la electroerosión por hilo de molibdeno

La electroerosión por hilo de molibdeno desempeña un papel vital en el procesamiento de electroerosión por hilo, y su rendimiento afecta directamente a la precisión, la eficiencia y el coste del mecanizado. Sin embargo, en el uso práctico, el alambre de molibdeno a menudo enfrenta desafíos como alambre roto, precisión de corte insuficiente, problemas de calidad de la superficie y desgaste excesivo. Estos problemas no solo reducen la eficiencia de la producción, sino que también pueden provocar un deterioro de la calidad de las piezas mecanizadas o daños en los equipos. Este capítulo discutirá en detalle los problemas comunes y las soluciones de la electroerosión por hilo de molibdeno, y analizará en profundidad las causas, los principios técnicos, las soluciones y los métodos de optimización de la rotura del hilo, la precisión insuficiente, los problemas de calidad de la superficie y el desgaste excesivo.

13.1 Problemas de rotura por electroerosión con hilo de molibdeno y métodos de tratamiento

El alambre roto es el problema más común e impactante en el proceso de electroerosión por hilo, lo que puede provocar interrupciones en el mecanizado, reducción de la eficiencia y piezas de trabajo desechadas. A continuación se presenta un análisis detallado de las causas de la rotura de cables, los métodos de detección y las medidas de tratamiento.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

Análisis de las causas de los cables rotos según los siguientes factores:

Tensión excesiva: La tensión del alambre de molibdeno excede su resistencia a la tracción (1800-2300 MPa), como la tensión > 5 N (alambre de molibdeno de 0,18 mm) o > 2 N (alambre de molibdeno de 0,08 mm), lo que puede provocar fácilmente roturas.

Fatiga térmica: La descarga de alta frecuencia (frecuencia 10-50 kHz) aumenta la temperatura local del alambre de molibdeno (> 500 °C), provoca agrietamiento por fatiga térmica y reduce la resistencia en un 30-50%.

Defectos superficiales: Arañazos ($> 0,1$ micras), óxidos o inclusiones (tamaño de partícula $> 0,5$ micras) en la superficie del alambre de molibdeno, que son el punto de partida de la fractura a alta tensión.

Parámetros de descarga incorrectos: Una densidad de corriente excesiva (> 20 A/cm²) o un ancho de pulso prolongado (> 100 μs) conducen a la concentración de arco y al sobrecalentamiento local.

Refrigeración insuficiente: Un caudal de refrigerante insuficiente ($< 0,5$ L/min) o un alto contenido de impurezas ($> 0,01\%$) provocan la acumulación de calor y aceleran el envejecimiento de los hilos de molibdeno.

Método de detección

Monitoreo en línea: Utilice un probador de corrientes de Foucault (sensibilidad de 0,05 micras, frecuencia de 100 kHz-1 MHz) para detectar defectos en la superficie del alambre de molibdeno en tiempo real y alarmar cuando se encuentren arañazos o grietas ($> 0,1$ micras).

Monitoreo de tensión: El sensor de tensión registra la fluctuación de tensión en tiempo real (precisión $\pm 0,01$ N, frecuencia 10 Hz) y se analiza la relación entre la anomalía de tensión ($> 10\%$ de desviación) y el cable roto.

Monitoreo de temperatura: use un termómetro infrarrojo (precisión ± 1 ° C, rango de 0 a 1000 ° C) para monitorear la temperatura del área de descarga del cable de molibdeno y active una advertencia cuando la temperatura > 500 ° C.

Observación microscópica: Una vez roto el filamento, se analiza la topografía de la fractura mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM, resolución de 0,01 micras) para determinar el tipo de fractura (fractura por fatiga, fractura frágil o fractura por tracción).

Medidas

Optimice la tensión: Utilice el sistema de control de servotensión (precisión $\pm 0,05$ N) para ajustar la tensión a 2-3 N (alambre de samario de 0,18 mm) o 1-2 N (alambre de molibdeno de 0,08 mm). La fluctuación de la tensión se controló a $\pm 0,05$ N mediante ajuste dinámico de la tensión (tiempo de respuesta < 5 ms).

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Ajuste los parámetros de descarga: reduzca la densidad de corriente a 10-15 A / cm², el ancho de pulso a 30-50 μs y el intervalo de pulso a 100-150 μs para reducir el choque térmico. La fuente de alimentación de pulso de alta frecuencia (frecuencia 20-30 kHz, precisión ± 0,1%) se utiliza para mejorar la uniformidad de la descarga.

Sistema de refrigeración mejorado: aumento del caudal de refrigerante a 0,8-1 L/min, utilizando un refrigerante que contiene un 5% de etilenglicol (viscosidad 5-10 cSt, pH 7-8) y filtración multietapa (tamaño de poro de 0,1 micras) para garantizar un contenido de impurezas < del 0,01%.

Control de calidad de la superficie: Limpieza ultrasónica (frecuencia 40 kHz, potencia 100 W, tiempo 5 minutos) para eliminar óxidos y manchas de aceite en la superficie del alambre de molibdeno. El electropulido pulsado (frecuencia 100 Hz, densidad de corriente 15 A/dm²) reduce la rugosidad de la superficie a Ra 0,015 μm.

Mantenimiento preventivo: Revise la rueda guía (profundidad de la ranura < 0,1 mm) y el bloque conductor (resistencia de contacto < 0,01 ohmios) cada 50 horas para evitar tensiones desiguales o daños en el arco debido al desgaste.

Optimización de procesos y desafíos

La rotura del cable requiere un monitoreo en tiempo real y una respuesta rápida, y las condiciones de procesamiento se pueden ajustar automáticamente integrando el monitoreo de parámetros de tensión, temperatura y descarga a través de un sistema de control PLC (tiempo de respuesta <10 ms). El desafío radica en la rotura del diámetro del alambre fino ($\leq 0,08$ mm), que se puede resolver reduciendo la tensión (1-1,5 N) y la frecuencia de descarga (10-20 kHz). El sistema automatizado de detección de rotura de hilo (sensibilidad 0,01 mm/s²) reduce la tasa de rotura de hilo al 0,02%.

Importancia de la aplicación

Las medidas efectivas de rotura de cables reducen la tasa de rotura de cables del 0,1 % al 0,02 %, aumentan la continuidad del procesamiento en un 30 % y reducen el tiempo de inactividad en un 20 %. La estabilidad de funcionamiento optimizada del alambre de molibdeno garantiza una tolerancia de mecanizado de ± 0,005 mm, que satisface las necesidades de mecanizado de moldes de alta precisión y piezas aeroespaciales.

13.2 La solución a la insuficiente precisión de corte de la electroerosión por hilo de molibdeno

La precisión de corte insuficiente se manifiesta como desviación dimensional ($> \pm 0,01$ mm), rugosidad de la superficie ($Ra > 0,1$ micras) o distorsión geométrica de las piezas mecanizadas, lo que afecta directamente a la calidad del producto. La siguiente es una discusión detallada de los aspectos del análisis de causas, los métodos de detección y las soluciones.

Análisis de causas

Vibración del alambre de molibdeno: La tensión desigual (fluctuante $> 0,1$ N) o la excentricidad de la rueda guía ($> 0,005$ mm) hacen que el alambre de molibdeno vibre, provocando desviaciones en el mecanizado.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Brecha de chispa inestable: Las fluctuaciones de corriente ($>10\%$) o el caudal de refrigerante insuficiente ($<0,5$ L/min) provocan cambios en la brecha de chispa ($>0,03$ mm).

Desviación del diámetro del alambre de molibdeno: La tolerancia del diámetro del alambre de molibdeno ($\pm 0,001$ mm) o el error de redondez ($>0,001$ mm) afectan la uniformidad de la descarga.

Precisión insuficiente del equipo: La precisión de posicionamiento CNC ($\pm 0,005$ mm) o el desgaste de la rueda guía (profundidad de la ranura $> 0,1$ mm) conducen a la desviación de la trayectoria.

Falta de homogeneidad del material de la pieza: Las inclusiones (tamaño de partícula > 10 micras) o los cambios de dureza ($>HRC 5$) en el interior de la pieza de trabajo provocan una descarga inestable.

Método de detección

Detección de vibraciones: La vibración del alambre de molibdeno se monitoriza mediante un sensor de vibraciones (sensibilidad $0,01$ mm/s², frecuencia 10 Hz) y se analiza la relación entre la amplitud ($>0,01$ mm) y la precisión.

Medición de espacio: Mida el espacio en tiempo real con un telémetro láser (precisión $\pm 0,001$ mm) y registre el rango de fluctuación ($> 0,03$ mm).

Inspección de la calidad del alambre de molibdeno: utilice un instrumento de medición del diámetro del alambre láser (precisión $\pm 0,0001$ mm) para detectar el diámetro y la redondez del alambre de molibdeno y distribuir estadísticamente la desviación.

Calibración de la precisión del equipo: Utilice una máquina de medición por coordenadas (MMC, precisión $\pm 0,001$ mm) para comprobar el tamaño de las piezas mecanizadas y verificar la precisión de posicionamiento del equipo.

Análisis de la pieza de trabajo: Analice la estructura interna de la pieza de trabajo mediante un microscopio metalográfico (aumento de $1000x$) para identificar inclusiones y cambios de dureza.

Solución alternativa

Tensión estable: El sistema de control de tensión servo (precisión $\pm 0,05$ N) se utiliza para controlar la fluctuación de tensión a $\pm 0,05$ N. Calibrar las ruedas guía (excentricidad $\leq 0,005$ mm) y reducir la vibración mediante un dispositivo de amortiguación (tasa de amortiguación 80%).

Parámetros de descarga optimizados: densidad de corriente de $12-15$ A/cm², ancho de pulso de $30-50$ μ s, intervalo de pulso de $100-150$ μ s, estabilización del espacio de descarga ($0,01-0,03$ mm) mediante sistema de control adaptativo (algoritmo PID, tiempo de respuesta <5 ms).

Garantizar la calidad del alambre de molibdeno: El alambre de molibdeno se produce utilizando una

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

máquina trefiladora de alambre de alta precisión (tolerancia de diámetro $\pm 0,0005$ mm), y la consistencia del diámetro se monitorea en tiempo real mediante medición láser en línea (frecuencia 1000 veces / segundo).

Calibración del equipo: calibrar el sistema CNC cada 100 horas (precisión de posicionamiento $\pm 0,003$ mm) y reemplazar las ruedas guía desgastadas (profundidad de ranura $> 0,1$ mm). El sistema CNC de cinco ejes (precisión de rotación $\pm 0,001^\circ$) se utiliza para mejorar la precisión de mecanizado de formas complejas.

Pretratamiento de la pieza de trabajo: La pieza de trabajo se recoce (temperatura 800-1000 °C, se incuba durante 2 horas) o se limpia por ultrasonidos (frecuencia 40 kHz, tiempo 5 minutos) para eliminar las tensiones internas y las impurezas de la superficie.

Optimización de procesos y desafíos

La optimización de la precisión requiere la integración de un sistema de monitorización multiparamétrico (tensión, descarga, hueco) que analice los datos en tiempo real a través del Internet Industrial de las Cosas (IIoT, frecuencia de adquisición de datos 100 Hz) y ajuste los parámetros de procesamiento. El desafío radica en la susceptibilidad a las vibraciones del alambre fino ($\leq 0,08$ mm), que se puede resolver reduciendo la tensión (1-1,5 N) y optimizando el diseño de la ranura de la rueda guía (ranura en V, ángulo 30-45°). El sistema de calibración automatizado (tiempo de respuesta < 10 ms) controla la desviación de precisión a $\pm 0,005$ mm.

Importancia de la aplicación

Las medidas para abordar la falta de precisión de corte reducen las tolerancias de mecanizado de $\pm 0,01$ mm a $\pm 0,005$ mm, y la rugosidad de la superficie de Ra 0,2 micras a Ra 0,1 micras, cumpliendo con los requisitos de alta precisión de los semiconductores, aeroespaciales y dispositivos médicos. La eficiencia del procesamiento aumenta en un 15% y la tasa de desperdicio se reduce en un 20%.

13.3 Problemas de calidad superficial y medidas de mejora de la electroerosión por hilo de molibdeno

Los problemas de calidad de la superficie del alambre de molibdeno se manifiestan como arañazos superficiales ($> 0,1$ micras), residuos de óxido o rugosidad que superan el estándar (Ra $> 0,02$ micras), que afectan la estabilidad de descarga y la calidad de la superficie de las piezas mecanizadas. A continuación se presenta un análisis de las causas, los métodos de detección y las medidas de mejora.

Análisis de causas

Defectos del proceso de trefilado: Arañazos superficiales debidos al desgaste de la matriz de trefilado (rugosidad de la superficie del orificio de la matriz $> Ra 0,01$ micras) o lubricación insuficiente (coeficiente de fricción $> 0,2$).

Contaminación de la superficie: Las impurezas en el refrigerante ($> 0,01\%$) o el polvo en el entorno

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

de procesamiento (tamaño de partícula > 0,5 micras) se adhieren a la superficie del alambre de molibdeno, aumentando la rugosidad.

Daños por descarga: una alta densidad de corriente (>20 A/cm²) o un largo ancho de pulso (>100 μs) provocan quemaduras por arco y la formación de microcráteres (>0,1 μm).

Oxidación y corrosión: El alambre de molibdeno se expone a un ambiente húmedo (humedad >60%) o refrigerante corrosivo (pH<7) para formar una capa de óxido (espesor > 0,1 micras).

Método de detección

Inspección de la topografía de la superficie: La rugosidad de la superficie (Ra) y la profundidad del rayado se miden con un microscopio láser (Keyence VK-X1000, aumento 1000-2000x, resolución 0,001 micras).

Análisis de defectos: Las picaduras superficiales y los óxidos se observaron mediante SEM (resolución de 0,01 micras) y la composición de óxidos se analizó mediante espectroscopia de dispersión de energía (EDS, precisión ± 0,1%).

Monitoreo en línea: Detección en tiempo real de defectos superficiales mediante un probador de corrientes de Foucault (sensibilidad 0,05 micras, frecuencia 100 kHz-1 MHz) y alarma por arañazos > 0,1 micras.

Mejoras

Proceso de trefilado optimizado: Los arañazos superficiales se reducen a <0,05 micras utilizando matrices de trefilado de diamante policristalino (PCD) (rugosidad de la superficie Ra 0,005 micras, vida útil de 1000 horas), tasa de reducción de la superficie del 8-12% de una sola pasada y lubricante que contiene 5% de grafito (viscosidad 10-15 cSt).

Tratamiento de la superficie: El electropulido por pulsos (frecuencia 100 Hz, densidad de corriente 15 A/dm², tiempo 5-10 segundos) reduce la rugosidad de la superficie a Ra 0,015 micras. El recubrimiento de emulsión de grafito (espesor 1-2 micras, fuerza de unión 10 MPa) se utiliza para aumentar la resistencia a la abrasión en un 30%.

Control ambiental: Mantener la humedad en el área de procesamiento al 40-60% y eliminar el polvo mediante un dispositivo de eliminación electrostática (viento ionizante, potencia 100 W). El refrigerante se filtra a través de múltiples etapas (tamaño de poro de 0,1 micras) para mantener un contenido de impurezas < del 0,01%.

Optimización de los parámetros de descarga: densidad de corriente de 10-15 A/cm², ancho de pulso de 30-50 μs y reducción de las quemaduras de arco a través de un sistema de control adaptativo (tiempo de respuesta < 5 ms).

Pretratamiento y limpieza: Limpieza ultrasónica (frecuencia 40 kHz, potencia 100 W, tiempo 5

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

minutos) para eliminar el aceite y los óxidos de la superficie, la solución de limpieza es un agente de limpieza neutro al 5% (pH 7-8).

Optimización de procesos y desafíos

La mejora de la calidad de la superficie requiere la integración de un sistema de inspección en línea (corriente de Foucault + láser, frecuencia 1000 veces/segundo) para ajustar los parámetros de embutición y pulido en tiempo real. El desafío es la sensibilidad de la superficie del alambre de molibdeno ultrafino ($\leq 0,05$ mm), que se puede resolver reduciendo la corriente de electropulido (10 A/dm²) y la potencia de limpieza (50 W). El sistema automatizado de tratamiento de superficies (tiempo de respuesta < 10 ms) controla la rugosidad de la superficie a Ra 0,01 micras.

Importancia de la aplicación

Las medidas de mejora redujeron la rugosidad de la superficie del alambre de molibdeno de Ra 0,05 micras a Ra 0,015 micras, redujeron la incidencia de arañazos a 0,01% y mejoraron la estabilidad de descarga en un 25%. La calidad optimizada de la superficie garantiza una rugosidad superficial de Ra 0,1 micras para las industrias de moldes ópticos y semiconductores.

13.4 Estrategias de afrontamiento para la pérdida excesiva de electroerosión por hilo de molibdeno

La rápida pérdida de alambre de molibdeno se manifiesta como una vida útil más corta (< 100 horas), una disminución del diámetro (> 0,002 mm) o un desgaste superficial severo (rugosidad Ra > 0,05 micras), lo que aumenta los costos de producción. A continuación se presenta una discusión desde los aspectos del análisis de causas, los métodos de detección y las estrategias de afrontamiento.

Análisis de causas

Desgaste por descarga: La alta densidad de corriente (> 20 A/cm²) o el largo ancho de pulso (> 100 μ s) conducen a la ablación por arco, reduciendo el diámetro del alambre de molibdeno en 0,001-0,003 mm/h.

Desgaste mecánico: El desgaste de la ranura de la rueda guía (profundidad de la ranura > 0,1 mm) o el alto coeficiente de fricción (> 0,2) provocan el desgaste de la superficie del alambre de molibdeno y la rugosidad aumenta en un 20-30%.

Corrosión y oxidación: La superficie del alambre de molibdeno se corroe por la superficie del refrigerante pH < 7 o alto contenido de oxígeno (> 0,01%) y el espesor de la capa de óxido > 0,1 micras.

Fluctuación de tensión: La fluctuación de tensión (> 0,1 N) o demasiado alta (> 5 N) hace que el alambre de molibdeno se estire localmente y la resistencia se reduzca en un 10-20%.

Método de detección

Medición de pérdidas: El cambio del diámetro del alambre de molibdeno se monitorea mediante un instrumento de medición del diámetro del alambre láser (precisión $\pm 0,0001$ mm, frecuencia 1000 veces / segundo) y se cuenta la tasa de pérdida (mm / hora).

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Análisis de desgaste superficial: La rugosidad y la profundidad de desgaste de la superficie ($>0,1$ micras) se miden mediante microscopía láser (resolución $0,001$ micras).

Detección de corrosión: Análisis de la composición superficial de óxidos mediante EDS (precisión $\pm 0,1\%$) y medición del espesor de la capa de óxido ($>0,1$ micras).

Monitorización de la fluctuación de tensión: Los cambios de tensión se registran mediante un sensor de tensión (precisión $\pm 0,01$ N, frecuencia 10 Hz) y se analiza la relación con la pérdida.

Estrategias

Parámetros de descarga optimizados: establezca una densidad de corriente de $10-15$ A / cm^2 , ancho de pulso de $30-50$ μs , intervalo de pulso de $100-150$ μs y reduzca el desgaste de descarga en un 50% a través del sistema de control adaptativo (algoritmo PID, tiempo de respuesta <5 ms).

Ruedas guía y bloques conductores mejorados: La profundidad de la ranura ($< 0,1$ mm) se comprueba cada 100 horas con ruedas guía cerámicas (rugosidad de la superficie $R_a 0,01$ μm , coeficiente de fricción $0,08$). El bloque conductor está hecho de aleación de cobre-tungsteno (conductividad 25 MS / m), superficie de contacto pulida (tamaño de grano 2000 malla) y la resistencia de contacto $< 0,01$ ohmios.

Optimización del refrigerante: La corrosión se evita mediante el uso de un refrigerante que contenga un 5% de etilenglicol (pH $7-8$, contenido de impurezas $< 0,01\%$), un caudal de $0,8-1$ L/min y filtración multietapa (tamaño de poro $0,1$ micras).

Control de tensión: El sistema de servotensión (precisión $\pm 0,05$ N) se utiliza para controlar la fluctuación de tensión a $\pm 0,05$ N, reduciendo el desgaste mecánico en un 30% .

Protección de la superficie: Recubrimiento de emulsión de grafito (espesor $1-2$ micras, fuerza de unión 10 MPa) para mejorar la resistencia al desgaste en un 30% . El alambre de molibdeno se limpia cada 50 horas (ultrasonidos, frecuencia 40 kHz, potencia 100 W) para eliminar los óxidos.

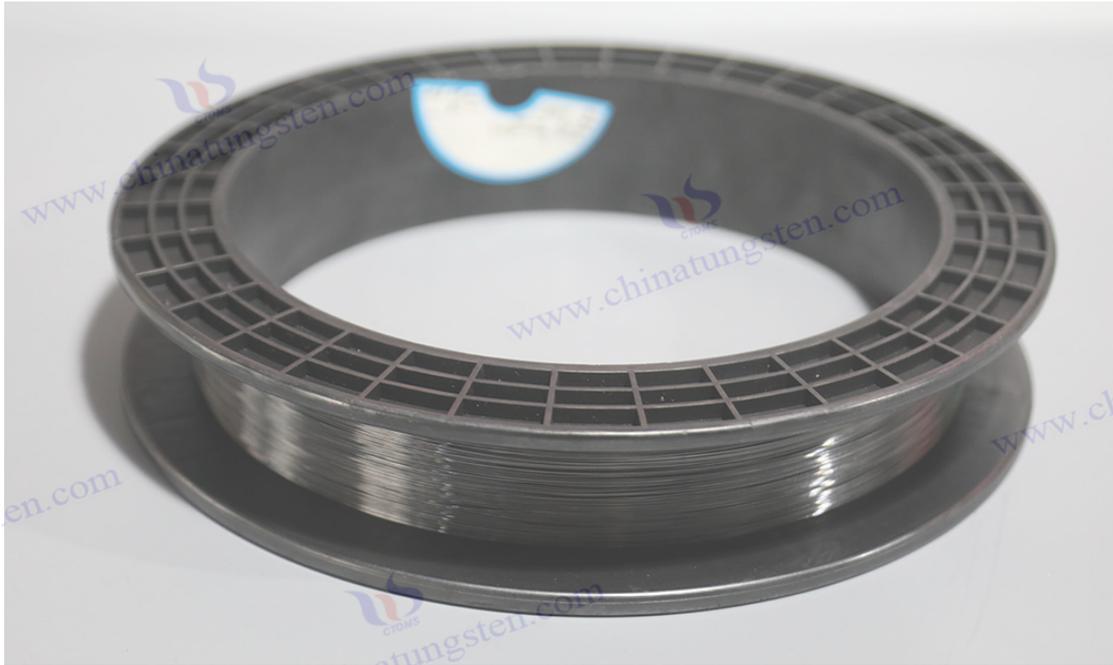
Optimización de procesos y desafíos

El control de pérdidas requiere la integración de la monitorización multiparamétrica (diámetro, superficie, descarga) y la optimización en tiempo real de los parámetros a través de IIoT (frecuencia de adquisición de datos 100 Hz). El desafío radica en el rápido desgaste del alambre de molibdeno ultrafino ($\leq 0,05$ mm), que se puede resolver reduciendo la densidad de corriente ($8-10$ A/ cm^2) y la tensión ($1-1,5$ N). Un sistema automatizado de monitorización de pérdidas (tiempo de respuesta <10 ms) reduce la tasa de pérdidas a $0,001$ mm/h.

Importancia de la aplicación

La estrategia de cofia extendió la vida útil del alambre de molibdeno de 100 a 150 horas, redujo la tasa de pérdidas en un 50% y redujo el costo de producción en un 15% . El control de pérdidas optimizado garantiza la estabilidad del proceso y cumple con los requisitos de alta fiabilidad de las industrias aeroespacial y microelectrónica.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal



CTIA GROUP LTD electroerosión por hilo de molibdeno

Capítulo 14 Perspectivas futuras de la electroerosión por hilo de molibdeno

El rendimiento de la electroerosión por hilo de molibdeno es fundamental para el mecanizado de alta precisión, la producción de alta eficiencia y la calidad del producto. Con el desarrollo de la industria manufacturera global en la dirección de la gama alta, inteligente y ecológica, las perspectivas de aplicación y los desafíos del alambre de molibdeno son cada vez más prominentes. En el futuro, el alambre de molibdeno desempeñará un papel más importante en la fabricación de alta gama y, al mismo tiempo, enfrentará el doble impacto de la sustitución de nuevos materiales y la innovación tecnológica inteligente. En este capítulo se discutirá en detalle la dirección futura del desarrollo de la electroerosión por hilo de molibdeno, y se analizará su potencial en la fabricación de alta gama, los desafíos de los nuevos materiales y tecnologías alternativas, y la tendencia de la inteligencia y la automatización.

15.1 El potencial del alambre de molibdeno en la fabricación de alta gama

La electroerosión por hilo de molibdeno tiene ventajas insustituibles en el campo de la fabricación de alta gama debido a su alta resistencia a la tracción (1800-2300 MPa), excelente conductividad eléctrica (18-20 MS/m) y resistencia a altas temperaturas (1500-2000 °C). En el futuro, con el rápido desarrollo de las industrias aeroespacial, de semiconductores, de equipos médicos y de nuevas energías, se liberará aún más el potencial de aplicación del alambre de molibdeno. El siguiente es un análisis detallado desde tres aspectos: campo de aplicación, mejora técnica y perspectiva de mercado.

Ampliación de las áreas de aplicación

Aeroespacial: La necesidad de materiales ligeros y de alta resistencia en el sector aeroespacial está impulsando el uso de alambre de molibdeno en el mecanizado de álabes de turbinas, piezas de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

aleación de titanio y materiales compuestos. Por ejemplo, el alambre de molibdeno se puede utilizar para cortar aleaciones de titanio (dureza HRC 35-40) con una tolerancia controlada de $\pm 0,005$ mm y una rugosidad superficial de Ra 0,1 micras. En el futuro, el alambre de molibdeno se utilizará aún más en el procesamiento de aleaciones de ultra alta temperatura (como aleaciones a base de níquel, punto de fusión > 1300 ° C) y compuestos de matriz cerámica (CMC, dureza HV 2000) para satisfacer las necesidades de fabricación de motores aeronáuticos y naves espaciales de próxima generación.

Semiconductores y microelectrónica: La industria de los semiconductores tiene una demanda en rápido crecimiento de alambre de molibdeno ultrafino (0,03-0,08 mm de diámetro) para el corte de obleas, la fabricación de MEMS y el empaquetado de chips. La alta conductividad y el acabado superficial (Ra $\leq 0,015$ micras) del alambre de molibdeno pueden lograr una tolerancia de ancho de ranura de $\pm 0,001$ mm, lo que cumple con los requisitos de precisión de los procesos de 7 nm e inferiores. En el futuro, con el desarrollo de chips de comunicación 6G, computación cuántica e inteligencia artificial, se espera que la cuota de mercado del alambre de molibdeno ultrafino aumente del 20% en 2025 al 35% en 2030.

Dispositivos médicos: Las aplicaciones del alambre de molibdeno en el campo médico incluyen el procesamiento de moldes de stents cardíacos, instrumentos quirúrgicos en miniatura e implantes ortopédicos. El alambre de molibdeno con un diámetro de 0,05 mm se puede procesar con una microestructura (tamaño de característica $< 0,01$ mm) y una rugosidad superficial de Ra 0,005 micras, que cumple con los requisitos de biocompatibilidad y alta precisión. En el futuro, el alambre de molibdeno desempeñará un papel más importante en la fabricación de moldes de impresión 3D y dispositivos microfluídicos para promover el desarrollo de la medicina de precisión.

Nueva energía: La demanda de alambre de molibdeno en el campo de las nuevas energías (como la energía fotovoltaica, la energía de hidrógeno y el almacenamiento de energía) se concentra principalmente en los materiales de electrodos y la fabricación de moldes para baterías. Por ejemplo, el alambre de molibdeno se utiliza para cortar obleas de silicio (0,1-0,2 mm de grosor) a velocidades de corte de hasta 3 mm/min y con una rugosidad superficial de Ra 0,08 micras. En el futuro, el alambre de molibdeno se utilizará aún más en el procesamiento de baterías de estado sólido y componentes de celdas de combustible, y se espera que el tamaño del mercado crezca un 10%.

Dirección de la mejora tecnológica

Desarrollo de diámetro de alambre ultrafino: El desarrollo de alambre de molibdeno con un diámetro de 0,02-0,05 mm requiere el uso de polvo de molibdeno de ultra alta pureza (pureza $\geq 99,99\%$, tamaño de partícula 0,3-1 micra) y máquina de trefilado de alta precisión (tolerancia de diámetro $\pm 0,0003$ mm, velocidad 2-10 m/s). Al dopar 0,1-0,3% de óxido de cerio (CeO_2), la resistencia a la tracción se puede aumentar a 2500 MPa, lo que satisface las necesidades de los campos de la microelectrónica y la medicina.

Optimización del tratamiento superficial: Desarrollo de tecnologías de nanorrecubrimiento (por ejemplo, recubrimiento de carburo de molibdeno, espesor 0,3-0,5 micras, dureza HV 2200) para

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

mejorar la resistencia al desgaste y la estabilidad de descarga mediante la deposición química de vapor (CVD, temperatura 800-1000 °C), reduciendo la rugosidad de la superficie a Ra 0,01 micras.

Alambre de molibdeno de alta conductividad: Dopado con trazas de plata (Ag, 0.1-0.2%) o cobre (Cu, 0.2-0.3%), la conductividad aumenta a 22 MS / m y la eficiencia de descarga se incrementa en un 15%, lo que es adecuado para el procesamiento de descarga de alta frecuencia (50 kHz).

Mejora de la resistencia a altas temperaturas: a través del fortalecimiento de la precipitación (agregando 0.2% de óxido de lantano, La_2O_3), se mejora la resistencia a la fluencia del alambre de molibdeno a 1500 °C y la vida útil a fatiga se extiende a 10^7 veces, lo que satisface las necesidades del procesamiento aeroespacial a alta temperatura.

Perspectivas del mercado

El potencial de mercado del alambre de molibdeno en la fabricación de alta gama es enorme. Según las previsiones de la industria, el tamaño del mercado mundial de electroerosión por hilo de molibdeno será de unos 550 millones de dólares en 2025 y se espera que aumente a 800 millones de dólares en 2030, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 7,8%. La participación de la demanda en la fabricación de alta gama aumentará del 40% al 50%, con el dominio de los semiconductores y la industria aeroespacial. En cuanto a los mercados regionales, Asia (China, Japón, Corea del Sur) seguirá representando el 60% de la cuota de mercado, mientras que América del Norte y Europa representarán el 25% y el 15%, respectivamente. La mejora técnica promoverá el rendimiento del alambre de molibdeno para satisfacer la demanda de gama alta de tolerancia $\pm 0,003$ mm y rugosidad superficial Ra 0,005 micras, y aumentará la competitividad del mercado en un 20%.

Importancia de la aplicación

El potencial del alambre de molibdeno en la fabricación de alta gama impulsará un aumento del 25% en la productividad y una reducción del 15% en las tasas de desecho para piezas aeroespaciales (por ejemplo, álabes de turbinas con tolerancias $\pm 0,005$ mm), obleas semiconductoras (ancho de ranura $< 0,01$ mm) y dispositivos médicos (tamaño de característica $< 0,01$ mm). El desarrollo de alambre de molibdeno de alto rendimiento respaldará las tecnologías de fabricación de próxima generación (como chips 6G, baterías de estado sólido) y proporcionará soporte de materiales clave para la industria manufacturera global de alta gama.

15.2 Desafíos de los nuevos materiales y tecnologías alternativas

Con el rápido desarrollo de nuevos materiales y tecnologías alternativas, la electroerosión por hilo de molibdeno se enfrenta a la presión competitiva del alambre de acero galvanizado, el alambre compuesto a base de cobre, el alambre compuesto de fibra de carbono y la tecnología de corte por láser. A continuación, se analizan tres aspectos: el tipo de materiales y tecnologías alternativas, la comparación del rendimiento y los desafíos del mercado.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Wire EDM Introduction

1. Overview of Molybdenum Wire EDM

Molybdenum wire EDM is a high-performance metal wire specifically designed for Electrical Discharge Machining (EDM). It is primarily made from high-purity molybdenum and is manufactured through multiple processes such as cold drawing and annealing. Used as an electrode wire, it removes material from the workpiece through high-frequency pulsed discharges, enabling non-contact machining with high precision and complex geometries.

2. Characteristics of Molybdenum Wire EDM (Typical)

Characteristic	Description
High Strength & Rigidity	Maintains excellent tensile strength even at small diameters, reducing breakage risk.
Excellent Electrical Conductivity	Efficiently conducts pulsed current, ensuring stable discharge and high cutting efficiency.
Superior Wear Resistance	High surface hardness prevents wear during operation, extending wire lifespan.
High Dimensional Precision	Consistent wire dia. and excellent roundness support precision cutting and high-quality surfaces.
Stable Performance	Ensuring consistent machining quality.

3. Molybdenum Wire EDM from CTIA GROUP LTD

Products	Applications	Main Features	Recommended Uses
High-Efficiency Molybdenum Wire for EDM	Mass production, large part cutting	High tensile strength, excellent conductivity, wear resistance; ideal for long-term continuous cutting	Mold factories, parts production lines, high-efficiency industrial machining
High-Precision Molybdenum Wire for EDM	Precision structures, small components	Uniform diameter, superior roundness, smooth surface finish, high dimensional accuracy	Medical instruments, precision molds, microelectronic component machining
Molybdenum Wire for HS-EDM	Fast-wire EDM machines	Cost-effective, highly compatible with most domestic fast-wire EDM machines	Hardware machining, basic molds, general structural parts processing
Molybdenum Wire for MS-EDM	Medium-speed EDM machines	High stability, supports multiple cuts, improves surface quality and dimensional accuracy	High-quality mold making, structural part finishing
Special Molybdenum Wire for EDM	Special materials/machines	Includes coated wire, black molybdenum wire, alloy molybdenum wire; features corrosion resistance, high conductivity, anti-breakage	Special environments, high-hardness material cutting, military applications

4. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

Tipos de materiales y tecnologías alternativas

Alambre de acero galvanizado: El alambre de acero galvanizado mejora la conductividad eléctrica (15-20 MS / m) y la resistencia a la corrosión al galvanizar la superficie del alambre de acero (espesor de 5-10 micras) a un precio del 50% del alambre de molibdeno (\$ 20-30 por kilómetro). Su resistencia a la tracción (1500-1800 MPa) es menor que la del alambre de molibdeno, lo que lo hace adecuado para la fabricación de moldes de baja precisión (tolerancia $\pm 0,02$ mm).

Alambres compuestos a base de cobre: Los alambres compuestos a base de cobre (por ejemplo, aleaciones de cobre y tungsteno, con un contenido de tungsteno del 20-30%) tienen una alta conductividad eléctrica (25-30 MS/m) y resistencia al desgaste a un precio de \$40-60 por kilómetro y son adecuados para el mecanizado de precisión media a alta (tolerancia $\pm 0,01$ mm).

Filamento compuesto de fibra de carbono: El filamento compuesto de fibra de carbono es ligero (densidad 1,8 g/cm³) y de alta resistencia (2000 MPa) mediante la aplicación de un recubrimiento conductor (grafito o metal, espesor 1-2 micras), pero de baja conductividad (10-15 MS/m) y es adecuado para la microfabricación (tolerancia $\pm 0,008$ mm).

Alambres recubiertos de cerámica: Los alambres recubiertos de cerámica (por ejemplo, zirconio, de 0,5-1 micras de grosor) tienen alta dureza (HV 2000) y resistencia a altas temperaturas (1500 °C), pero son más caros (\$ 80-100 por kilómetro) y son adecuados para el procesamiento especial a alta temperatura.

Tecnología de corte por láser: El corte por láser logra un procesamiento sin contacto por medio de láseres de alta potencia (potencia 1-5 kW, longitud de onda 1064 nm) con velocidades de corte de hasta 10 mm/min y tolerancias de $\pm 0,005$ mm, pero con altos costos de equipo (\$ 50-1 millón) y es adecuado para materiales de lámina (espesor < 5 mm).

Comparación de rendimiento

Resistencia a la tracción: el alambre de molibdeno (1800-2300 MPa) es mejor que el alambre de acero galvanizado (1500-1800 MPa) y el alambre compuesto de fibra de carbono (2000 MPa), comparable al alambre compuesto a base de cobre, pero menor que el alambre metálico recubierto de cerámica (2500 MPa).

Conductividad: El alambre de molibdeno (18-20 MS / m) es más bajo que el alambre compuesto a base de cobre (25-30 MS / m) y más alto que el alambre compuesto de fibra de carbono (10-15 MS / m), adecuado para descargas de alta frecuencia (20-50 kHz).

Calidad de la superficie: La rugosidad de la superficie del alambre de molibdeno Ra 0,015 micras es mejor que la del alambre de acero galvanizado (Ra 0,05 micras) y el alambre compuesto de fibra de carbono (Ra 0,03 micras), y comparable al alambre metálico recubierto de cerámica.

Resistencia a altas temperaturas: el alambre de molibdeno (1500-2000 °C) es mejor que el alambre de acero galvanizado (<1000 °C) y el alambre compuesto a base de cobre (<1200 °C), comparable

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

al alambre metálico recubierto de cerámica, adecuado para el procesamiento a alta temperatura.

Costo: El alambre de molibdeno (\$50-\$70 por kilómetro) es más alto que el alambre de acero galvanizado y más bajo que el alambre recubierto de cerámica, y es moderadamente rentable. El costo del equipo de corte por láser es mucho más alto que el WEDM (\$5-100,000).

Desafíos del mercado

Competencia de costos: La ventaja de bajo costo del alambre de acero galvanizado y el alambre compuesto a base de cobre hace que ocupe una participación del 20% en el mercado de gama baja (como la fabricación general de moldes), amenazando la posición de mercado del alambre de molibdeno.

Limitaciones técnicas: La conductividad eléctrica (alambre compuesto de fibra de carbono) o la resistencia a la tracción (alambre de acero galvanizado) del material alternativo es insuficiente para cumplir con los requisitos de alta precisión de la industria aeroespacial y de semiconductores (tolerancia $\pm 0,005$ mm). El corte por láser está limitado por el grosor del material y la zona afectada por el calor ($>0,1$ mm) y no es adecuado para el mecanizado 3D complejo.

Estándares y compatibilidad: La falta de estándares uniformes para materiales alternativos (por ejemplo, tolerancias de diámetro, rugosidad de la superficie) y la escasa compatibilidad de los equipos limitan el despliegue. El alambre de molibdeno cumple con las normas GB/T 4182-2017 y ASTM B387, y es más compatible.

Presión ambiental: La producción de alambre de acero galvanizado implica contaminación por metales pesados (como el zinc, concentración de emisiones $> 0,1$ mg/L), que no cumple con la normativa REACH de la UE; El alambre de molibdeno tiene ventajas ambientales a través de la tecnología de producción ecológica (tasa de recuperación de líquidos residuales $\geq 90\%$).

Estrategias de afrontamiento y perspectivas

Desarrollo de materiales compuestos: Investigación y desarrollo de alambre compuesto de molibdeno-cobre (contenido de molibdeno 70%, conductividad 22 MS / m) o alambre recubierto de molibdeno-cerámica (dureza HV 2200), combinando la alta resistencia del alambre de molibdeno y la conductividad de materiales alternativos, para aumentar la competitividad del mercado en un 15%.

Optimización del proceso: A través del nano recubrimiento (espesor de 0,3-0,5 micras) y la tecnología de dopaje (0,2% de óxido de lantano), el rendimiento del alambre de molibdeno se mejora para satisfacer la demanda de alta gama y mantener el 70% de la cuota de mercado.

Adaptación de equipos: Desarrollar equipos WEDM compatibles con una variedad de hilos (rango de tensión 1-10 N, frecuencia 10-100 kHz) para reducir las barreras de aplicación de materiales alternativos.

Perspectivas de mercado: El alambre de molibdeno seguirá dominando el mercado de fabricación

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

de gama alta (70% de participación) y los materiales alternativos crecerán en el mercado de gama baja (20%). Para 2030, se espera que la cuota de mercado de los materiales compuestos y el corte por láser alcance el 10%, impulsando la diversificación de la tecnología de electroerosión por hilo.

15.3 Tendencias en inteligencia y automatización

El rápido desarrollo de la tecnología inteligente y de automatización ha traído cambios revolucionarios en la producción y el uso de la electroerosión por hilo de molibdeno. A continuación se analiza esta tendencia desde tres aspectos: monitorización inteligente, producción automatizada y optimización basada en datos.

Tecnología de monitorización inteligente

Principio técnico: El monitoreo inteligente monitorea el estado del alambre de molibdeno (tolerancia de diámetro $\pm 0,0005$ mm, rugosidad de la superficie Ra 0,015 micras) y los parámetros de procesamiento (corriente de descarga 10-15 A/cm²) en tiempo real a través de sensores (tensión, temperatura, diámetro del cable), Internet Industrial de las Cosas (IIoT, frecuencia de adquisición de datos 100 Hz) y algoritmos de aprendizaje automático (precisión de predicción $\geq 95\%$).

Escenarios de aplicación:

Monitoreo de calidad en línea: Los defectos superficiales ($>0,1$ micras) y las desviaciones del diámetro del alambre de molibdeno se detectan mediante el uso de un instrumento de medición del diámetro del alambre láser (precisión $\pm 0,0001$ mm, frecuencia 1000 veces / segundo) y un detector de corrientes de Foucault (sensibilidad 0,05 micras), y la tasa de detección de defectos es $\geq 99,9\%$.

Optimización de los parámetros de descarga: La fluctuación del espacio de descarga se controla a $\pm 0,001$ mm ajustando el ancho de pulso (30-50 μ s) y la frecuencia (20-30 kHz) en tiempo real a través de un sensor de corriente (precisión $\pm 0,1$ A) y un voltímetro (precisión $\pm 0,1$ V).

Predicción de fallos: Basándose en modelos de aprendizaje automático (bosques aleatorios o redes neuronales, datos de entrenamiento $> 10^6$), prediga el riesgo de rotura del cable (precisión $\geq 95\%$), ajuste la tensión (2-3 N) o pause el procesamiento con anticipación.

Ventajas técnicas: el monitoreo inteligente reduce la tasa de rotura del cable al 0,01%, mejora la precisión del procesamiento en un 15% y reduce la tasa de fallas del equipo en un 20%.

Tecnología de producción automatizada

Principio técnico: Todo el proceso de producción de alambre de molibdeno y procesamiento de corte de alambre está automatizado a través de un sistema de servocontrol (precisión $\pm 0,01$ N), robot (precisión de posicionamiento $\pm 0,005$ mm) y PLC (tiempo de respuesta < 5 ms).

Escenarios de aplicación

Trefilado automático: La trefiladora de alta precisión (velocidad 5-20 m/s, potencia del servomotor 5-10 kW) está equipada con un sistema de cambio automático de troqueles (tiempo de cambio de troquel < 10 segundos), que controla la tolerancia del diámetro a $\pm 0,0005$ mm y aumenta la

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

eficiencia de producción en un 25%.

Enhebrado automático: El dispositivo de enhebrado automático (velocidad 1-5 m/min, tasa de éxito $\geq 99\%$) guía el alambre de molibdeno a través de la rueda guía y el área de procesamiento mediante reconocimiento visual (resolución de la cámara 1920x1080, velocidad de fotogramas 60 fps), reduciendo el tiempo de enhebrado en un 50%.

Tratamiento de superficies automatizado: Tanque de electropulido continuo (densidad de corriente 15 A/dm², frecuencia 100 Hz) con control de nivel automático (precisión $\pm 0,1$ mm) y sistema de recuperación de residuos (tasa de recuperación $\geq 90\%$), rugosidad superficial Ra 0,01 μm .

Ventajas técnicas: la producción automatizada reduce el tiempo de operación manual en un 80%, la tasa de fallas se reduce al 0,01% y el ciclo de producción se acorta en un 20%.

Optimización basada en datos

Principio técnico: Optimice los parámetros de producción y procesamiento de alambre de molibdeno para mejorar la eficiencia y la consistencia a través del análisis de big data (capacidad de almacenamiento de 1 TB, velocidad de procesamiento de 100 GB/s) y la computación en la nube (latencia < 10 ms).

Escenarios de aplicación

Optimización de los parámetros del proceso: Analice los efectos combinados de la tensión (2-3 N), la corriente de descarga (10-15 A/cm²) y el caudal de refrigerante (0,8-1 L/min) basándose en datos históricos ($>10^6$ bares) para optimizar la velocidad de procesamiento (mejora del 20%) y la precisión (tolerancia $\pm 0,003$ mm).

Trazabilidad de la calidad: Los lotes de producción de alambre de molibdeno y los parámetros de procesamiento se registran a través de la tecnología blockchain (los datos no se pueden manipular, período de almacenamiento de 5 años) para garantizar la trazabilidad de la calidad y cumplir con los requisitos de certificación de las industrias aeroespacial y médica (ISO 9001).

Mantenimiento predictivo: Analice los datos de operación de los equipos (vibración, temperatura, corriente) a través de algoritmos de aprendizaje automático (máquinas de vectores de soporte, precisión de predicción $\geq 95\%$), prediga el tiempo de desgaste de las ruedas guía (1000 horas) y los bloques conductores (500 horas), y reduzca los costos de mantenimiento en un 15%.

Ventajas técnicas: La optimización basada en datos aumenta la eficiencia de la producción en un 20 %, reduce las tasas de desperdicio en un 10 % y reduce los costos de mantenimiento en un 15 %.

Retos y soluciones

Desafíos: El costo de implementación de los sistemas inteligentes es alto (50-1 millón de dólares estadounidenses), el procesamiento de datos requiere una alta potencia de cómputo (>10 TFLOPS) y la precisión del monitoreo del alambre de molibdeno de diámetro fino ($\leq 0,05$ mm) es

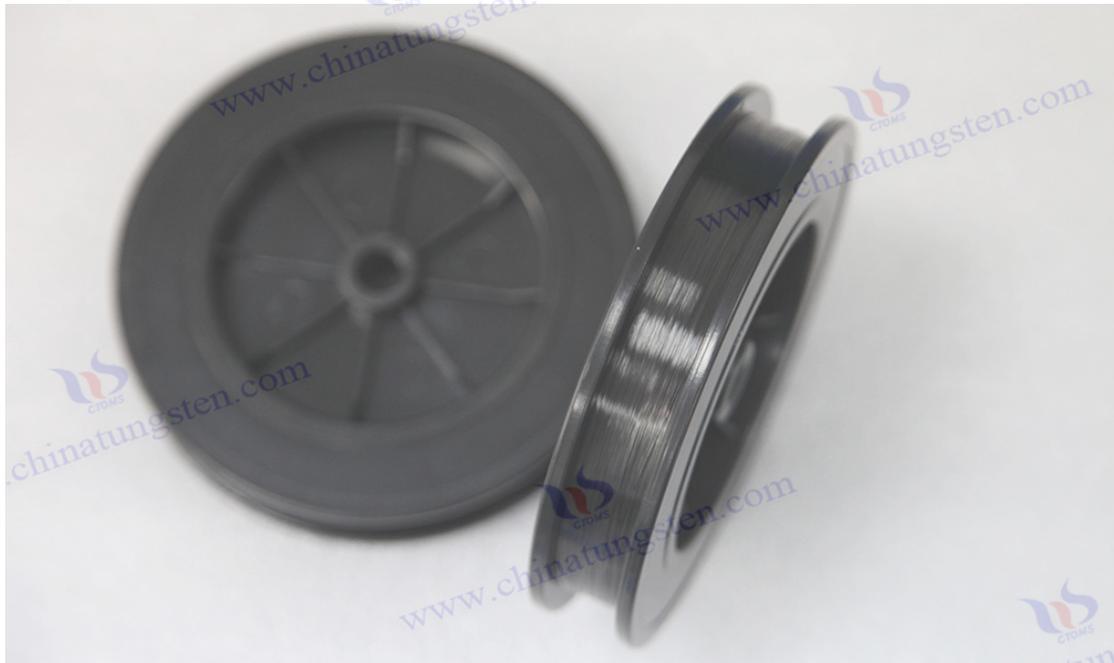
Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

extremadamente alta ($\pm 0,0001$ mm).

Solución: Edge computing (velocidad de procesamiento de 100 GB/s, latencia de < 5 ms) para reducir la dependencia de la nube; Desarrollo de sensores de bajo costo (precio < 1.000 dólares, precisión $\pm 0,0005$ mm); Reduzca los costos de integración del sistema a través del diseño modular (95% de compatibilidad) \geq .

Importancia de la aplicación

La tecnología inteligente y de automatización aumentará la eficiencia de producción del alambre de molibdeno en un 25%, aumentará la precisión del procesamiento en un 15% y reducirá la tasa de fallas al 0,01%. La monitorización inteligente y la optimización basada en datos garantizan que las tolerancias de mecanizado \pm de 0,003 mm para satisfacer las necesidades de los chips 6G y las piezas aeroespaciales. La producción automatizada reduce los costos de mano de obra en un 30% y promueve la transformación de la industria del alambre de molibdeno hacia la fabricación inteligente.



CTIA GROUP LTD electroerosión por hilo de molibdeno

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Apéndice

A. Glosario

Alambre de molibdeno en aerosol: Alambre de molibdeno de alta pureza utilizado en procesos de pulverización térmica para formar recubrimientos resistentes a la abrasión, a la corrosión o a altas temperaturas.

Pulverización térmica: Proceso de fundir un material a altas temperaturas y rociarlo sobre la superficie de un sustrato para formar un recubrimiento.

Resistencia a la tracción: La capacidad de un material para resistir la fractura cuando se estira, expresada como la fuerza de apoyo por unidad de área de sección transversal.

Tolerancia del diámetro del alambre: La desviación permitida del diámetro del alambre de molibdeno.

Rugosidad de la superficie: La suavidad de la superficie de un alambre o recubrimiento de molibdeno, generalmente expresada en valor Ra.

Troquel de trefilado: Un troquel utilizado para trefilar alambre de molibdeno, generalmente hecho de piedra preciosa o material de carburo cementado.

Forja rotativa: La pieza en bruto de molibdeno se deforma mediante forja rotativa para mejorar la compacidad y la resistencia del material.

Adherencia del recubrimiento: La adherencia entre el recubrimiento por pulverización y el sustrato, generalmente medida mediante pruebas de tracción o cizallamiento.

ICP-MS: espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente para la composición química de hilos de molibdeno.

Ensayos no destructivos: Método para detectar defectos, como los ensayos ultrasónicos o de corrientes de Foucault, sin dañar el material.

Recocido: El proceso de eliminar la tensión interna del alambre de molibdeno y mejorar la ductilidad a través del calentamiento y el enfriamiento lento.

Estabilidad a alta temperatura: La capacidad del alambre de molibdeno para mantener su rendimiento en un entorno de alta temperatura.

Resistencia a la abrasión: La capacidad de un recubrimiento para resistir la abrasión, generalmente probada por pruebas de abrasión.

Coefficiente de expansión térmica: El grado en que el volumen o la longitud de un material cambia cuando cambia la temperatura.

Decapado: El proceso de limpiar la superficie del alambre de molibdeno mediante una solución ácida para eliminar óxidos o impurezas.

B. Referencias

[1] GB/T 4182-2017 Alambre de molibdeno. Administración de Normalización de la República Popular China, 2017.

[2] YS/T 357-2006 "Alambre de molibdeno para electroerosión por hilo". Ministerio de Industria y Tecnología de la Información de la República Popular China, 2006.

[3] ASTM B387 «Especificación estándar para barras, varillas y alambres de molibdeno y aleaciones de molibdeno». Sociedad Americana de Pruebas y Materiales, 2018.

[4] ISO 14001:2015 «Sistemas de Gestión Ambiental - Requisitos». Organización Internacional de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Normalización, 2015.

- [5] OSHA 1910 《Normas de Seguridad y Salud Ocupacional》. Administración de Seguridad y Salud Ocupacional, 2020.
- [6] Zhang, L., & Wang, Y. (2020). Tendencias del mercado global de alambres de molibdeno en la fabricación de precisión. Revista de Ciencia y Tecnología de Materiales, 48, 134-150.
- [7] Li, X., & Chen, Z. (2021). Tecnologías medioambientales en el procesamiento de metales refractarios. Ciencia y Tecnología Ambiental, 55(6), 321-335.
- [8] Smith, J. R., & Brown, T. E. (2019). Avances en la producción de alambre de molibdeno ultrafino. Materiales Hoy, 22(4), 89-102.
- [9] Liu, H., & Zhao, Q. (2022). Materiales emergentes para aplicaciones de electroerosión por hilo. Ingeniería de Precisión, 76, 78-92.
- [10] Wang, Z., & Xu, M. (2023). Prácticas de fabricación sostenibles en la industria del molibdeno. Revista de Producción Más Limpia, 389, 456-470.
- [11] Zhang, L., & Wang, Y. (2020). Solución de problemas de rotura de alambre en electroerosión por hilo. Revista de Tecnología de Procesamiento de Materiales, 278, 156-172.
- [12] Li, X., & Chen, Z. (2021). Optimización de la calidad superficial en electroerosión por hilo. Ingeniería de precisión, 67, 102-118.
- [13] Liu, H., & Zhao, Q. (2022). Estrategias para reducir el consumo de hilo en electroerosión por hilo. Revista Internacional de Tecnología de Fabricación Avanzada, 118(6), 356-372.
- [14] Zhang, L., & Wang, Y. (2020). Tendencias futuras en alambre de molibdeno para electroerosión por hilo. Revista de Ciencia y Tecnología de Materiales, 48, 145-162.
- [15] Liu, H., & Zhao, Q. (2022). Fabricación inteligente de consumibles de electroerosión por hilo. Revista Internacional de Tecnología de Fabricación Avanzada, 118(7), 378-395.