

Enciclopedia de la varilla 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

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

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

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

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Rods Introduction

1. Overview of Molybdenum Rods

Molybdenum rods are high-performance metal materials made from high-purity molybdenum powder through pressing, sintering, forging, and drawing processes. They possess excellent high-temperature performance, thermal conductivity, and chemical stability. These rods are widely used in advanced technological fields such as metallurgy, electronics, glass, aerospace, and nuclear energy, making them one of the key functional materials in modern industrial high-temperature environments.

2. Main Application Fields of Molybdenum Rods

- Heating elements and support rods for high-temperature electric furnaces
- Diffusion tubes and wafer carriers in the semiconductor industry
- Electrodes and targets for vacuum coating equipment
- High-temperature components in nuclear reactors and aircraft engines
- Electrode rods and heat-resistant fixtures in the glass industry
- Medical devices and X-ray targets
- High-temperature experimental materials and components in scientific research

3. Classification of Molybdenum Rods (by purity)

Category	Description	Typical Applications
High-Purity Moly Rods	Purity $\geq 99.95\%$, extremely low impurity levels	Electronics, semiconductors, research equipment
Industrial-Grade Rods	Purity around 99.90%, cost-effective	Electric heating, glass, metallurgical equipment
Doped Moly Rods	Doped with La, Ti, Zr, etc., for enhanced performance	High-temperature structural parts, TZM alloy applications

4. Typical Specifications of Molybdenum Rods from CTIA GROUP LTD

Item	Value Range
Density	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$
Hardness (HV30)	160 – 250 HV
Tensile Strength (Rm/MPa)	$\geq 590 \text{ MPa}$
Yield Strength (Rp0.2/MPa)	$\geq 490 \text{ MPa}$
Elongation after fracture (A/%)	10–25%
Diameter Range	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$, Customizable
Length Range	10 mm – 2000 mm, Customizable

5. 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 las varillas de molibdeno
- 1.2 Desarrollo histórico de las varillas de molibdeno
- 1.3 La importancia de las varillas de molibdeno en la industria moderna
- 1.4 Estado del mercado mundial y tendencias de desarrollo

Capítulo 2 Propiedades materiales de las varillas de molibdeno

- 2.1 Composición química y estructura atómica del molibdeno
- 2.2 Estructura cristalina y cambios de fase del molibdeno
- 2.3 Propiedades físicas de las varillas de molibdeno
 - 2.3.1 Densidad y punto de fusión de las varillas de molibdeno
 - 2.3.2 Conductividad térmica y coeficiente de expansión térmica de varillas de molibdeno
 - 2.3.3 Conductividad y resistividad de las varillas de molibdeno
- 2.4 Propiedades mecánicas de las varillas de molibdeno
 - 2.4.1 Resistencia y dureza de las varillas de molibdeno
 - 2.4.2 Ductilidad y tenacidad de las varillas de molibdeno
 - 2.4.3 Comportamiento de fluencia de varillas de molibdeno a altas temperaturas
- 2.5 Propiedades químicas de las varillas de molibdeno
 - 2.5.1 Resistencia a la oxidación de las varillas de molibdeno
 - 2.5.2 Resistencia a la corrosión de varillas de molibdeno (ácidos, álcalis, sales fundidas, etc.)
- 2.6 Comparación de molibdeno y aleaciones a base de molibdeno
- 2.7 Comparación de las propiedades de las varillas de molibdeno con otros materiales de alta temperatura
- 2.8 Varilla de molibdeno MSDS de CTIA GROUP LTD

Capítulo 3 Proceso de preparación y producción de varillas de molibdeno

- 3.1 Adquisición de materias primas de molibdeno
 - 3.1.1 Extracción y beneficio de mineral de molibdeno
 - 3.1.2 Purificación de concentrado de molibdeno
- 3.2 Proceso de metalurgia en polvo de varillas de molibdeno
 - 3.2.1 Preparación de polvo de molibdeno (método de reducción, método de atomización)
 - 3.2.2 Control del tamaño de partícula y la pureza del polvo
 - 3.2.3 Moldeo por compresión (prensado isostático en frío, moldeo)
- 3.3 Proceso de sinterización de varillas de molibdeno
 - 3.3.1 Sinterización al vacío
 - 3.3.2 Sinterización de protección de hidrógeno
 - 3.3.3 Equipos de sinterización a alta temperatura y optimización de parámetros
- 3.4 Tecnología de procesamiento térmico de varillas de molibdeno
 - 3.4.1 Proceso de forja
 - 3.4.2 Proceso de laminación
 - 3.4.3 Proceso de dibujo

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

- 3.5 Tecnología de tratamiento superficial de varillas de molibdeno
 - 3.5.1 Pulido mecánico
 - 3.5.2 Limpieza química
 - 3.5.3 Recubrimientos superficiales (recubrimientos antioxidantes, etc.)
- 3.6 Control de calidad y optimización de procesos de varillas de molibdeno
 - 3.6.1 Control de defectos en el proceso de producción
 - 3.6.2 Supervisión y optimización de los parámetros del proceso

Capítulo 4 Tipos y especificaciones de varillas de molibdeno

- 4.1 Clasificación por composición
 - 4.1.1 Varillas de molibdeno de alta pureza (pureza $\geq 99,95\%$)
 - 4.1.2 Varillas de molibdeno dopado (TZM, Mo-La, Mo-W, etc.)
- 4.2 Clasificación por estado de superficie
 - 4.2.1 Varillas de molibdeno negro
 - 4.2.2 Pulido de varillas de molibdeno
 - 4.2.3 Limpieza de varillas de molibdeno
- 4.3 Clasificación por tamaño y forma
 - 4.3.1 Varillas redondas de molibdeno
 - 4.3.2 Varillas de molibdeno cuadradas y otras de formas especiales
 - 4.3.3 Micro varillas de molibdeno y varillas grandes de molibdeno
- 4.4 Diseño personalizado de varilla de molibdeno
 - 4.4.1 Análisis de la demanda de los clientes
 - 4.4.2 Especificaciones especiales y personalización del rendimiento

Capítulo 5 Pruebas de rendimiento y evaluación de varillas de molibdeno

- 5.1 Prueba de propiedades mecánicas de varillas de molibdeno
 - 5.1.1 Ensayo de tracción de varillas de molibdeno
 - 5.1.2 Ensayo de compresión de varillas de molibdeno
 - 5.1.3 Ensayos de flexión y cizallamiento
- 5.2 Prueba de rendimiento a alta temperatura de varillas de molibdeno
 - 5.2.1 Ensayo de fluencia de varillas de molibdeno
 - 5.2.2 Ensayo de fatiga térmica de varillas de molibdeno
 - 5.2.3 Ensayo de resistencia a la oxidación de varillas de molibdeno
- 5.3 Análisis de la microestructura de las varillas de molibdeno
 - 5.3.1 Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM)
 - 5.3.2 Análisis de difracción de rayos X (DRX)
 - 5.3.3 Espectroscopía de energía (EDS)
- 5.4 Prueba de propiedades químicas de varillas de molibdeno
 - 5.4.1 Ensayo de resistencia a la corrosión de varillas de molibdeno
 - 5.4.2 Evaluación de la estabilidad química de las varillas de molibdeno
- 5.5 Análisis de fallas de varillas de molibdeno
 - 5.5.1 Análisis del mecanismo de fractura de varillas de molibdeno
 - 5.5.2 Análisis de fatiga y desgaste de varillas de molibdeno

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

5.5.3 Modelo de predicción de vida para varillas de molibdeno

Capítulo 6 Equipo de producción de varillas de molibdeno

6.1 Equipo de manejo de materias primas para varillas de molibdeno

6.1.1 Equipos de trituración y molienda

6.1.2 Equipos de purificación (hornos de tostado, hornos de reducción)

6.2 Equipo de pulvimetalurgia para varillas de molibdeno

6.2.1 Equipos de mezcla y prensado

6.2.2 Hornos de sinterización (hornos de vacío, hornos de atmósfera)

6.3 Equipo de procesamiento térmico para varillas de molibdeno

6.3.1 Equipo de forja

6.3.2 Trenes de laminación y máquinas de trefilado

6.4 Equipo de tratamiento de superficies para varillas de molibdeno

6.4.1 Máquinas pulidoras

6.4.2 Equipos de limpieza

6.5 Equipo de prueba para varillas de molibdeno

6.5.1 Equipos de ensayos no destructivos (ultrasonidos, rayos X)

6.5.2 Equipos de ensayo de calidad dimensional y superficial

6.6 Equipos de producción automáticos e inteligentes para varillas de molibdeno

6.6.1 Control automático de las líneas de producción

6.6.2 Monitorización inteligente y análisis de datos

Capítulo 7 Campos de aplicación de las varillas de molibdeno

7.1 Hornos de alta temperatura y equipos térmicos

7.1.1 Varillas de molibdeno como elementos calefactores

7.1.2 Piezas de soporte y fijación

7.2 Industria electrónica y de semiconductores

7.2.1 Materiales de los electrodos

7.2.2 Objetivos de pulverización catódica

7.2.3 Tubos de vacío y componentes de la fuente de iones

7.3 Aeroespacial

7.3.1 Piezas estructurales de alta temperatura

7.3.2 Componentes del sistema de propulsión

7.4 Industria del vidrio y la cerámica

7.4.1 Electrodos de fusión de vidrio

7.4.2 Soportes cerámicos de sinterización

7.5 Investigación médica y científica

7.5.1 Objetivos de tubo de rayos X

7.5.2 Equipos experimentales de laboratorio de alta temperatura

7.6 Aplicaciones emergentes

7.6.1 Impresión 3D y fabricación aditiva

7.6.2 Aplicaciones de la industria nuclear

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Capítulo 8 Normas y especificaciones nacionales y extranjeras para varillas de molibdeno

8.1 Normas internacionales para varillas de molibdeno

8.1.1 Normas ASTM (ASTM B387, etc.)

8.1.2 Normas ISO

8.2 Normas nacionales para varillas de molibdeno

8.2.1 GB/T Estándar (GB/T 3462, etc.)

8.2.2 Estándares de la industria y estándares de la empresa

8.3 Certificación y cumplimiento de varillas de molibdeno

8.3.1 Proceso de certificación de materiales

8.3.2 Cumplimiento ambiental y de seguridad

8.4 Comparación estándar y análisis de escenarios de aplicación de varillas de molibdeno

Capítulo 9 Procesamiento, uso y mantenimiento de varillas de molibdeno

9.1 Tecnología de procesamiento de varillas de molibdeno

9.1.1 Corte (corte por cable, corte por láser)

9.1.2 Mecanizado (torneado, fresado, taladrado)

9.1.3 Tecnología de soldadura y unión

9.2 Requisitos ambientales para el uso de varillas de molibdeno

9.2.1 Vacío y atmósferas inertes

9.2.2 Protección del medio ambiente por oxidación a alta temperatura

9.3 Instalación y fijación de varillas de molibdeno

9.3.1 Proceso de instalación y diseño del accesorio

9.3.2 Diseño coincidente de expansión térmica

9.4 Mantenimiento y limpieza de varillas de molibdeno

9.4.1 Métodos de limpieza de superficies

9.4.2 Inspección y mantenimiento periódicos

9.5 Especificaciones de operación de seguridad para varillas de molibdeno

9.5.1 Precauciones para el funcionamiento a alta temperatura

9.5.2 Especificaciones de seguridad para la manipulación de productos químicos

Capítulo 10 Reciclaje y desarrollo sostenible de varillas de molibdeno

10.1 Proceso de reciclaje de varillas de molibdeno

10.1.1 Recogida y clasificación de residuos

10.1.2 Tecnología de reciclaje y purificación

10.2 Impacto ambiental de las varillas de molibdeno y la producción verde

10.2.1 Consumo de energía y emisiones en el proceso de producción

10.2.2 Mejora del proceso de protección del medio ambiente

10.3 Economía circular y estrategia de desarrollo sostenible de las varillas de molibdeno

Capítulo 11 La última tecnología y la tendencia futura de las varillas de molibdeno

11.1 Progreso de la investigación y el desarrollo de aleaciones a base de molibdeno

11.1.1 Optimización de aleaciones TZM y Mo-La

11.1.2 Nuevas tecnologías de dopaje

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

- 11.2 Desarrollo de varillas de molibdeno nanoestructuradas
- 11.3 Tecnología inteligente de producción y pruebas
 - 11.3.1 Monitoreo en línea y análisis de Big Data
 - 11.3.2 Aplicación de la inteligencia artificial en la producción de varillas de molibdeno
- 11.4 El potencial de las varillas de molibdeno en el campo de las nuevas energías
 - 11.4.1 Energía de hidrógeno y aplicaciones de almacenamiento de energía
 - 11.4.2 Soporte de material superconductor de alta temperatura
- 11.5 Direcciones de investigación futuras y desafíos de las varillas de molibdeno

Apéndice

- A. Glosario de términos
- B. Referencias

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

Capítulo 1 Introducción

1.1 Definición y descripción general de las varillas de molibdeno

La varilla de molibdeno es un material similar a una varilla hecho de molibdeno de alta pureza o aleaciones a base de molibdeno (como TZM, Mo-La), generalmente producido por proceso de pulvimetalurgia o proceso de procesamiento térmico, con excelentes propiedades a alta temperatura, resistencia mecánica y estabilidad química. La pureza de las varillas de molibdeno generalmente alcanza más del 99.95%, el diámetro varía de unos pocos milímetros a decenas de milímetros, y la longitud se puede personalizar de acuerdo con las necesidades de la aplicación. El estado de la superficie de la varilla de molibdeno incluye negro (sin pulir, capa de óxido superficial retenida), pulido (pulido mecánico o químico) y lavado (eliminación de impurezas superficiales) para satisfacer las necesidades de diferentes escenarios de aplicación.

Como metal refractario, el molibdeno tiene un alto punto de fusión (2623 °C), un bajo coeficiente de expansión térmica (alrededor de $4,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) y una buena conductividad térmica (alrededor de 138 W/m·K) y conductividad, lo que lo hace excelente en altas temperaturas y entornos extremos. Las principales características de la varilla de molibdeno incluyen resistencia a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, resistencia a la fluencia y buenas propiedades de procesamiento, lo que la hace ampliamente utilizada en hornos de alta temperatura, semiconductores electrónicos, aeroespacial, fabricación de vidrio y otras industrias. Además, las varillas de molibdeno se pueden dopar con elementos como titanio, circonio, lantano, etc., para optimizar aún más su resistencia a altas temperaturas y a la oxidación.

Las varillas de molibdeno vienen en una variedad de formas, incluidas varillas redondas, varillas cuadradas y otras varillas de formas especiales, y su proceso de producción implica un proceso completo desde la purificación del mineral de molibdeno hasta la pulvimetalurgia, el procesamiento térmico y el tratamiento de superficies. El rendimiento y la calidad de las varillas de molibdeno se ven afectados por factores como la pureza de la materia prima, el proceso de sinterización y la precisión del procesamiento, por lo que los parámetros del proceso deben controlarse estrictamente durante el proceso de producción para garantizar la consistencia del producto. Las varillas de molibdeno se utilizan en aplicaciones con diferentes requisitos de tamaño, condición superficial y rendimiento, como alta pureza y acabado superficial en la industria de semiconductores, y resistencia a la oxidación y resistencia mecánica en hornos de alta temperatura.

1.2 Desarrollo histórico de las varillas de molibdeno

La historia del molibdeno se remonta a finales del siglo XVIII, cuando el químico sueco Carl Wilhelm Scheele aisló por primera vez el ácido de molibdeno del mineral de molibdeno en 1778, sentando las bases para el estudio de la química del molibdeno. En 1781, Peter Jacob Hjelm logró preparar el molibdeno metálico reduciendo el ácido de molibdeno, marcando el descubrimiento oficial del molibdeno como elemento metálico. A principios del siglo XIX, el molibdeno se utilizaba principalmente para la investigación de laboratorio debido a su rareza y dificultad de extracción, y no fue hasta principios del siglo XX, con el avance de la tecnología metalúrgica, que la producción industrial de molibdeno se hizo posible gradualmente.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Como un tipo de productos de molibdeno, el desarrollo de la varilla de molibdeno está estrechamente relacionado con la madurez de la tecnología de pulvimetalurgia. A principios del siglo XX, las varillas de molibdeno comenzaron a utilizarse en la fabricación de bombillas y tubos de vacío, y se convirtieron en un material alternativo al alambre de tungsteno debido a su alto punto de fusión y buena conductividad eléctrica. En la década de 1920, la producción industrial en Estados Unidos y Alemania promovió el uso de varillas de molibdeno en hornos de alta temperatura y en la industria del vidrio. Durante la Segunda Guerra Mundial, las varillas de molibdeno fueron valoradas por su potencial en el campo de las superaleaciones y la industria aeroespacial, especialmente en motores a reacción y sistemas de propulsión de cohetes.

A mediados y finales del siglo XX, con el auge de la industria de los semiconductores, el uso de varillas de molibdeno como objetivos de pulverización catódica y materiales de electrodos aumentó significativamente. El desarrollo de aleaciones TZM (titanio-circonio-molibdeno) y aleaciones Mo-La (molibdeno-lantano) mejoró aún más el rendimiento a altas temperaturas y la resistencia a la fluencia de las varillas de molibdeno, lo que permitió su uso en entornos más exigentes. Desde el siglo XXI, el proceso de producción de varillas de molibdeno se ha optimizado continuamente, y la introducción de automatización y tecnologías inteligentes ha mejorado la eficiencia de producción y la calidad del producto. Por ejemplo, la producción moderna de varillas de molibdeno utiliza la sinterización al vacío y la tecnología de laminación de precisión para producir varillas de alta pureza y precisión dimensional.

La industria del molibdeno de China ha crecido rápidamente en las últimas décadas, convirtiéndose en el mayor productor y consumidor de molibdeno del mundo. Gracias a los abundantes recursos de mineral de molibdeno y la tecnología de producción avanzada, las empresas chinas ocupan una posición importante en la investigación y desarrollo y la producción de varillas de molibdeno, lo que promueve la popularidad de las varillas de molibdeno en el mercado global.

1.3 La importancia de las varillas de molibdeno en la industria moderna

La varilla de molibdeno tiene una posición insustituible en la industria moderna y su importancia se deriva de sus propiedades materiales únicas y su amplia gama de aplicaciones. A continuación se describe el papel de la varilla de molibdeno en la industria moderna desde varios aspectos clave:

Aplicaciones de alta temperatura: El alto punto de fusión y la resistencia a la fluencia de las varillas de molibdeno las convierten en materiales ideales para hornos de alta temperatura (por ejemplo, hornos de vacío, hornos de hidrógeno) y se usan comúnmente en elementos calefactores, varillas de soporte y pantallas térmicas. Las varillas de molibdeno pueden funcionar de manera estable en entornos de hasta 1800 °C, lo que es significativamente mejor que los materiales metálicos tradicionales.

Industria electrónica y de semiconductores: Las varillas de molibdeno se utilizan ampliamente como objetivos de pulverización catódica en procesos de deposición de película delgada para la producción de circuitos integrados, células solares y pantallas planas. Su alta pureza y su microestructura homogénea garantizan la calidad de la película. Además, las varillas de molibdeno

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

también se utilizan como materiales de electrodos para tubos de vacío y fuentes de iones.

Aeroespacial: Las varillas de molibdeno se utilizan en la industria aeroespacial para fabricar piezas estructurales de alta temperatura, como toberas de motores a reacción y componentes del sistema de propulsión de cohetes. Su bajo coeficiente de expansión térmica y su alta resistencia garantizan la fiabilidad en condiciones extremas de temperatura y estrés.

Industria del vidrio y la cerámica: Las varillas de molibdeno se utilizan como electrodos en los hornos de fusión de vidrio porque son resistentes a la corrosión a alta temperatura y químicamente estables, y pueden soportar la erosión del vidrio fundido. Además, las varillas de molibdeno también se utilizan como componentes de soporte en el proceso de sinterización de cerámica.

Medicina e investigación: Las varillas de molibdeno se utilizan como objetivos en tubos de rayos X para generar rayos X de alta energía para diagnósticos médicos y análisis de materiales. En el campo de la investigación científica, las varillas de molibdeno son un componente clave de los equipos experimentales de alta temperatura, que apoyan la ciencia de los materiales y la investigación física.

La importancia de las varillas de molibdeno también se refleja en su sostenibilidad. El molibdeno es un metal reciclable, y las varillas de molibdeno de desecho se pueden reutilizar a través del proceso de purificación, lo que satisface las necesidades de la industria moderna para la fabricación ecológica. Las diversas aplicaciones de las varillas de molibdeno han impulsado el progreso tecnológico en varias industrias, como las nuevas energías (fotovoltaica, energía del hidrógeno) y la fabricación de alta gama.

1.4 Situación del mercado mundial y tendencias de desarrollo

El mercado mundial de varillas de molibdeno ha mostrado un crecimiento constante en los últimos años, principalmente debido al aumento de la demanda de las industrias electrónica, aeroespacial y energética. Según los informes de la industria, el tamaño del mercado mundial de molibdeno será de aproximadamente \$ 200 millones en 2024, de los cuales la varilla de molibdeno representa una proporción considerable como una forma de producto importante. China es el mayor productor mundial de molibdeno, con más del 40% de la producción mundial, seguido de países como Estados Unidos, Chile y Perú.

El estado actual del mercado

Producción y suministro: Las empresas chinas ocupan una posición dominante en la producción de varillas de molibdeno, confiando en ricos recursos de mineral de molibdeno y tecnología madura de pulvimetalurgia.

Impulsado por la demanda: El rápido desarrollo de las industrias de electrónica y semiconductores está impulsando la demanda de varillas de molibdeno de alta pureza, especialmente en tecnología 5G, chips de IA y energía fotovoltaica. La demanda de barras de aleación TZM y Mo-La en el sector aeroespacial también está aumentando.

Fluctuaciones de precios: Los precios de las varillas de molibdeno se ven muy afectados por la oferta de materias primas, la geopolítica y la demanda del mercado. En los últimos años, los precios

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

del molibdeno se han estabilizado en general, pero los costos de producción han aumentado debido al aumento de los costos de la energía y las regulaciones ambientales más estrictas.

Tendencias

Varillas de aleación de alto rendimiento: La investigación y el desarrollo de varillas de molibdeno dopadas como TZM y Mo-La es el foco del futuro, con el objetivo de mejorar la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la oxidación para satisfacer las necesidades de las industrias aeroespacial y nuclear.

Producción verde: Con la mejora de los requisitos de protección del medio ambiente, los fabricantes de varillas de molibdeno están adoptando procesos de baja energía y bajas emisiones, como la tecnología de purificación verde y los sistemas de reciclaje de residuos.

Fabricación inteligente: Las líneas de producción automatizadas y las tecnologías de inspección inteligentes, como la inspección por rayos X en línea, están cambiando la forma en que se producen las varillas de molibdeno, mejorando la eficiencia y la consistencia.

Aplicaciones emergentes: Se espera que el potencial emergente de las varillas de molibdeno en nuevos campos energéticos, como los electrolizadores de hidrógeno y los materiales superconductores de alta temperatura, así como la fabricación aditiva (impresión 3D), impulse un mayor crecimiento del mercado.

Dinámica del mercado regional: China continúa liderando el mercado mundial de varillas de molibdeno, mientras que la demanda en India y el sudeste asiático está creciendo rápidamente, lo que lo convierte en un nuevo punto de acceso al mercado.

Desafiar

Riesgo de suministro de materias primas: La concentración regional de recursos de mineral de molibdeno puede provocar fluctuaciones en el suministro.

Barreras técnicas: La producción de varillas de molibdeno de alta pureza y barras de aleaciones especiales tiene requisitos técnicos extremadamente altos y es difícil para las pequeñas y medianas empresas ingresar al mercado.

Presión ambiental: Los problemas de consumo de energía y emisiones en el proceso de purificación y procesamiento de molibdeno deben resolverse aún más.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal



Varillas de molibdeno pulido CTIA GROUP LTD

Capítulo 2 Propiedades materiales de las varillas de molibdeno

2.1 Composición química y estructura atómica del molibdeno

El molibdeno (símbolo del elemento Mo, número atómico 42) es un metal de transición perteneciente al quinto grupo de elementos del sexto período, con un peso atómico de 95,94 g/mol. La composición química del molibdeno es principalmente molibdeno elemental de alta pureza, y la pureza de la varilla de molibdeno industrial generalmente alcanza más del 99.95%, y el contenido de elementos de impurezas (como hierro, carbono, oxígeno, nitrógeno, etc.) está estrictamente controlado a nivel de ppm para garantizar su estabilidad de rendimiento. Las varillas de molibdeno se dopan con oligoelementos (por ejemplo, titanio, circonio, lantano) en algunas aplicaciones para formar aleaciones a base de molibdeno como TZM (titanio-circonio-molibdeno) o Mo-La (molibdeno-lantano) para mejorar la resistencia a altas temperaturas o la resistencia a la oxidación.

Desde la perspectiva de la estructura atómica, la configuración electrónica del molibdeno es $[\text{Kr}] 4d^5 5s^1$, que tiene una fuerte capacidad de enlace metálico. Su radio atómico es de aproximadamente 139 pm, su electronegatividad es de 2.16 (escala de Pauling) y muestra una actividad química moderada. La estabilidad química del molibdeno lo hace excelente en entornos corrosivos y de alta temperatura, pero requiere medidas de protección bajo ciertas condiciones, como los entornos de oxidación a alta temperatura. Las propiedades químicas del molibdeno se ven afectadas por su estructura atómica, y la distribución electrónica de los orbitales 4d y 5s le da un alto punto de fusión y resistencia mecánica mientras mantiene cierta ductilidad.

La pureza del molibdeno es fundamental para sus propiedades. Por ejemplo, un contenido de oxígeno demasiado alto (>50 ppm) puede provocar la fragilización de los límites de grano y reducir la tenacidad de las varillas de molibdeno. Por lo tanto, los procesos de fusión al vacío o reducción

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

de hidrógeno se utilizan a menudo en el proceso de producción para reducir las impurezas. Los estándares de la industria (por ejemplo, ASTM B387) tienen requisitos claros para la composición química de las varillas de molibdeno, como 0,01% de contenido de hierro y 0,005% de contenido de carbono $\leq 0,005\%$. Chinatungsten Online y otra información de la industria señalaron que la producción de varillas de molibdeno de alta pureza requiere un control estricto de las fuentes de materias primas y procesos de purificación para satisfacer aplicaciones de alta demanda, como los semiconductores y la aeroespacial.

2.2 Estructura cristalina y cambios de fase del molibdeno

La estructura cristalina del molibdeno es cúbica centrada en el cuerpo (BCC) con una constante de red de aproximadamente 0,3147 nm. Esta estructura le da al molibdeno un alto punto de fusión y buenas propiedades mecánicas, al tiempo que le permite mantener la estabilidad estructural a altas temperaturas. Los átomos de molibdeno en la estructura BCC están muy dispuestos y tienen menos defectos cristalinos (como dislocaciones, límites de grano), lo que contribuye a su capacidad para resistir la fluencia a altas temperaturas.

El molibdeno mantiene una sola fase BCC desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión (2623 °C) sin transición alótropa, lo que le da propiedades físicas y mecánicas estables en un amplio rango de temperaturas. Sin embargo, a altas temperaturas, los granos de molibdeno pueden crecer, lo que resulta en una disminución de las propiedades mecánicas, por lo que a menudo se utilizan elementos dopados como el lantano o el titanio para refinar los granos y mejorar la resistencia del límite del grano. La aleación Mo-La se forma mediante la adición de óxido de lantano (La_2O_3) para formar una fase dispersa, que inhibe eficazmente el crecimiento del grano y mejora el rendimiento a altas temperaturas.

En términos de cambio de fase, el molibdeno se sublima directamente de un estado sólido a un estado gaseoso (aproximadamente 4650 °C) a presión atmosférica sin pasar por un estado líquido, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones de alta temperatura en vacío o atmósferas inertes. La estabilidad de fase del molibdeno lo convierte en un material ideal para hornos de alta temperatura y equipos de vacío, pero debe tener cuidado con las reacciones de oxidación (generación de MoO_3) en atmósferas oxidantes. El análisis de difracción de rayos X (XRD) mostró que la orientación del cristal y la microestructura de la varilla de molibdeno se vieron afectadas por la tecnología de procesamiento (como el laminado y la forja), y la orientación preferida a lo largo de la dirección axial podría mejorar sus propiedades mecánicas.

Los estudios académicos han demostrado que la estructura cristalina de las varillas de molibdeno tiene un efecto significativo en su conductividad eléctrica y conductividad térmica. La disposición compacta de la estructura BCC da como resultado una alta conductividad térmica, mientras que la presencia de límites de grano e impurezas puede degradar el rendimiento. Por lo tanto, la producción de varillas de molibdeno de alto rendimiento requiere procesos optimizados de sinterización y procesamiento térmico para reducir los defectos de los cristales y las impurezas.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Rods Introduction

1. Overview of Molybdenum Rods

Molybdenum rods are high-performance metal materials made from high-purity molybdenum powder through pressing, sintering, forging, and drawing processes. They possess excellent high-temperature performance, thermal conductivity, and chemical stability. These rods are widely used in advanced technological fields such as metallurgy, electronics, glass, aerospace, and nuclear energy, making them one of the key functional materials in modern industrial high-temperature environments.

2. Main Application Fields of Molybdenum Rods

- Heating elements and support rods for high-temperature electric furnaces
- Diffusion tubes and wafer carriers in the semiconductor industry
- Electrodes and targets for vacuum coating equipment
- High-temperature components in nuclear reactors and aircraft engines
- Electrode rods and heat-resistant fixtures in the glass industry
- Medical devices and X-ray targets
- High-temperature experimental materials and components in scientific research

3. Classification of Molybdenum Rods (by purity)

Category	Description	Typical Applications
High-Purity Moly Rods	Purity $\geq 99.95\%$, extremely low impurity levels	Electronics, semiconductors, research equipment
Industrial-Grade Rods	Purity around 99.90%, cost-effective	Electric heating, glass, metallurgical equipment
Doped Moly Rods	Doped with La, Ti, Zr, etc., for enhanced performance	High-temperature structural parts, TZM alloy applications

4. Typical Specifications of Molybdenum Rods from CTIA GROUP LTD

Item	Value Range
Density	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$
Hardness (HV30)	160 – 250 HV
Tensile Strength (Rm/MPa)	$\geq 590 \text{ MPa}$
Yield Strength (Rp0.2/MPa)	$\geq 490 \text{ MPa}$
Elongation after fracture (A/%)	10–25%
Diameter Range	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$, Customizable
Length Range	10 mm – 2000 mm, Customizable

5. 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

2.3 Propiedades físicas de las varillas de molibdeno

Las propiedades físicas de las varillas de molibdeno son la base de su amplia gama de aplicaciones a altas temperaturas y entornos extremos. Lo siguiente se elabora a partir de tres aspectos: densidad y punto de fusión, conductividad térmica y coeficiente de expansión térmica, conductividad y resistividad.

2.3.1 Densidad y punto de fusión de las varillas de molibdeno

La densidad de las varillas de molibdeno es de $10,28 \text{ g/cm}^3$ (20°C), que es ligeramente inferior a la del tungsteno ($19,25 \text{ g/cm}^3$) pero superior a la de los metales más comunes (por ejemplo, hierro, níquel). Esta densidad le da una ventaja en aplicaciones que requieren alta resistencia pero que son sensibles al peso, como la aeroespacial. La densidad de las varillas de molibdeno se ve afectada por su pureza y tecnología de procesamiento, ya que la densidad de las varillas de molibdeno de alta pureza se acerca al valor teórico, mientras que la densidad de las aleaciones dopadas (por ejemplo, TZM) varía ligeramente (alrededor de $10,1\text{-}10,3 \text{ g/cm}^3$).

Con un punto de fusión de 2623°C , el molibdeno tiene uno de los puntos de fusión más altos de cualquier metal, solo superado por el tungsteno (3422°C) y el renio (3186°C). El alto punto de fusión permite que las varillas de molibdeno mantengan su integridad estructural a temperaturas extremadamente altas, como por encima de 1800°C en un horno de vacío, lo que las hace adecuadas para el tratamiento térmico a alta temperatura, la fusión de vidrio y la fabricación de semiconductores. El punto de fusión también afecta la dificultad de procesamiento de la varilla de molibdeno, y la forja y sinterización a alta temperatura deben llevarse a cabo a una temperatura cercana al punto de fusión, lo que tiene altos requisitos para el equipo.

2.3.2 Conductividad térmica y coeficiente de dilatación térmica de las varillas de molibdeno

La conductividad térmica de la varilla de molibdeno es de $138 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (20°C), que exhibe una excelente conductividad térmica y es adecuada como elemento calefactor o material de pantalla caliente para hornos de alta temperatura. En comparación con el tungsteno ($173 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), el molibdeno tiene una conductividad térmica ligeramente inferior, pero aún puede disipar eficazmente el calor a altas temperaturas y reducir la concentración de estrés térmico. La conductividad térmica disminuye ligeramente con el aumento de la temperatura, por ejemplo, unos $100 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ a 1000°C , lo que sigue siendo suficiente para la mayoría de las aplicaciones de alta temperatura.

Las varillas de molibdeno tienen un bajo coeficiente de expansión térmica de aproximadamente $4,8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ($20\text{-}1000^\circ\text{C}$), que es mucho más bajo que el acero (aproximadamente $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) y el cobre ($16,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$). El bajo coeficiente de expansión térmica hace que la varilla de molibdeno tenga una buena estabilidad dimensional en ciclos de alta temperatura, reduciendo el agrietamiento o la deformación causada por el estrés térmico. Esta propiedad es particularmente importante en el sellado de vidrio y la fabricación de semiconductores, donde el coeficiente de expansión térmica de las varillas de molibdeno coincide con el de ciertos materiales de vidrio y cerámica.

2.3.3 Conductividad y resistividad de las varillas de molibdeno

La conductividad de la varilla de molibdeno es de aproximadamente $1,9 \times 10^7 \text{ S/m}$ (20°C) y la

resistividad es de $5,2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, exhibe una buena conductividad eléctrica y es adecuada para su uso como electrodos o piezas conductoras. La resistividad aumenta con el aumento de la temperatura, por ejemplo, alrededor de $20 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ a $1000^{\circ}C$. Esta dependencia de la temperatura debe tenerse en cuenta al diseñar electrodos o elementos calefactores de alta temperatura para garantizar la estabilidad de la corriente y la potencia de salida.

La conductividad de la varilla de molibdeno se ve afectada por las impurezas y la microestructura, y la conductividad de la varilla de molibdeno de alta pureza es mejor que la de las aleaciones dopadas. Por ejemplo, las aleaciones TZM tienen una resistividad ligeramente mayor que las varillas de molibdeno puro debido a su contenido de titanio y circonio. Según los informes de la industria, la industria de los semiconductores tiene requisitos extremadamente altos para la conductividad de las varillas de molibdeno, que requieren altos procesos de purificación y tratamientos superficiales para reducir las fluctuaciones de resistividad.

2.4 Propiedades mecánicas de las varillas de molibdeno

Las propiedades mecánicas de la varilla de molibdeno son la clave de su fiabilidad en aplicaciones industriales, y se analiza lo siguiente desde tres aspectos: resistencia y dureza, ductilidad y tenacidad, y comportamiento de fluencia a alta temperatura.

2.4.1 Resistencia y dureza de las varillas de molibdeno

La resistencia a la tracción de las varillas de molibdeno es de aproximadamente 600-800 MPa y el límite elástico es de aproximadamente 400-600 MPa a temperatura ambiente, dependiendo de la pureza, la tecnología de procesamiento y el tamaño del grano. El trabajo en caliente (por ejemplo, forjado, laminado) puede mejorar significativamente la resistencia de las varillas de molibdeno, por ejemplo, la resistencia a la tracción de las varillas de molibdeno forjadas puede alcanzar más de 900 MPa. La dureza de las varillas de molibdeno (dureza Vickers) es de aproximadamente 200-250 HV, con un ligero aumento de la dureza después del pulido.

Las aleaciones dopadas (por ejemplo, TZM) se fortalecen significativamente mediante el fortalecimiento de la solución y el fortalecimiento de la precipitación, y la resistencia a la tracción de las varillas de molibdeno TZM puede alcanzar los 1100 MPa y la dureza es de aproximadamente 270-300 HV. Estas propiedades permiten que las varillas de molibdeno mantengan su integridad estructural a altas temperaturas y presiones, como en los componentes aeroespaciales de alta temperatura.

2.4.2 Ductilidad y tenacidad de las varillas de molibdeno

Las varillas de molibdeno puro son maleables a temperatura ambiente, con una elongación de aproximadamente 10-20%, pero son menos dúctiles y presentan cierto grado de fragilidad, especialmente a bajas temperaturas (por debajo de $-50^{\circ}C$). La ductilidad se puede mejorar mediante el trabajo térmico y el dopaje, por ejemplo, las aleaciones de Mo-La pueden aumentar la resistencia del límite del grano agregando óxido de lantano, con elongaciones de más del 25%.

La tenacidad de las varillas de molibdeno se ve afectada por el tamaño del grano y el contenido de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

impurezas. Los granos finos y la alta pureza reducen el deslizamiento del límite de grano y la propagación de grietas, y mejoran la tenacidad a la fractura (K_{Ic} aprox. $10\text{--}15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). A alta temperatura ($>1000 \text{ }^\circ\text{C}$), la ductilidad de la varilla de molibdeno mejora significativamente y muestra una buena capacidad de deformación plástica, que es adecuada para el procesamiento térmico y el moldeo de formas complejas.

2.4.3 Comportamiento de fluencia de las barras de molibdeno a altas temperaturas

La fluencia es un índice de rendimiento importante de la varilla de molibdeno bajo alta temperatura y estrés a largo plazo. La varilla de molibdeno puro comienza a fluir significativamente por encima de $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ y la tasa de fluencia se acelera con el aumento de la temperatura y la tensión. Por ejemplo, a $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ y 50 MPa de estrés, el molibdeno puro tiene una tasa de fluencia de aproximadamente $10^{-5}/\text{h}$. La tasa de fluencia de las aleaciones TZM y Mo-La se redujo significativamente mediante el fortalecimiento de la precipitación, y la tasa de fluencia de TZM pudo ser inferior a $10^{-6}/\text{h}$ a $1500 \text{ }^\circ\text{C}$.

El comportamiento de fluencia se ve afectado por la microestructura, y las varillas de molibdeno con un tamaño de grano más grande o más impurezas en los límites de grano tienen más probabilidades de fracturarse por fluencia. Los tratamientos térmicos, como el recocido, optimizan la microestructura y reducen las tendencias a la fluencia. Los estudios de la industria han demostrado que el uso a largo plazo de varillas de molibdeno en hornos de alta temperatura requiere una mayor resistencia a la fluencia a través del dopaje y los recubrimientos superficiales como los recubrimientos de siliciuro.

2.5 Propiedades químicas de las varillas de molibdeno

Las propiedades químicas de la varilla de molibdeno determinan su aplicabilidad en ambientes corrosivos, y se analiza lo siguiente desde dos aspectos: resistencia a la oxidación y resistencia a la corrosión.

2.5.1 Resistencia a la oxidación de las varillas de molibdeno

La varilla de molibdeno es estable a la oxidación a temperatura ambiente, pero es fácil formar óxido volátil MoO_3 en una atmósfera oxidante a alta temperatura ($>600 \text{ }^\circ\text{C}$), lo que resulta en pérdida de material y degradación del rendimiento. Por ejemplo, en aire a $800 \text{ }^\circ\text{C}$, la tasa de oxidación de las varillas de molibdeno es de aproximadamente $0,1\text{--}0,5 \text{ mg}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$. Con el fin de mejorar la resistencia antioxidante, a menudo se adoptan las siguientes medidas en la industria:

Recubrimiento de superficies: Los recubrimientos de siliciuro (MoSi_2) o alúmina forman una capa protectora que reduce significativamente la tasa de oxidación.

Modificación de dopaje: La aleación Mo-La se fortalece mediante la dispersión de óxido de lantano para mejorar la resistencia a la oxidación.

Uso de control ambiental: El uso de varillas de molibdeno en vacío o atmósfera inerte (por ejemplo, argón, nitrógeno) evita la oxidación.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

2.5.2 Resistencia a la corrosión de las varillas de molibdeno (ácidos, álcalis, sales fundidas, etc.)

La varilla de molibdeno tiene buena resistencia a la corrosión a una variedad de ácidos y álcalis a temperatura ambiente. Por ejemplo, las varillas de molibdeno prácticamente no están corroídas en ácido sulfúrico diluido, ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico, pero tienen una mayor tasa de corrosión en ácido nítrico concentrado y soluciones alcalinas de alta temperatura como NaOH. Las varillas de molibdeno tienen buena resistencia a la corrosión por las sales fundidas (como el cloruro de sodio, las sales fundidas de fluoruro) y son adecuadas para su uso como electrodos de fusión de vidrio.

En ambientes corrosivos de alta temperatura, el rendimiento de las varillas de molibdeno depende de la condición de la superficie y del medio ambiente. La varilla de molibdeno pulido tiene menos defectos superficiales y mejor resistencia a la corrosión que la varilla negra. Las aleaciones TZM superan al molibdeno puro en atmósferas corrosivas (por ejemplo, gases que contienen azufre) debido a su fortalecimiento del límite de grano que reduce la susceptibilidad a la corrosión. Los estudios académicos han demostrado que las varillas de molibdeno se benefician de su inercia química debido a su resistencia a la corrosión en la fusión de vidrio y la sinterización de cerámica, pero se debe evitar el contacto a largo plazo con medios oxidantes fuertes.

2.6 Comparación de molibdeno y aleaciones a base de molibdeno

Las varillas de molibdeno se pueden dividir en varillas de molibdeno puro y varillas de aleación a base de molibdeno (como TZM, Mo-La, Mo-W) según su composición. A continuación se muestra una comparación desde el punto de vista del rendimiento y la aplicación:

Varilla de molibdeno puro: pureza $\geq$, con excelente conductividad eléctrica y térmica, adecuada para las industrias de semiconductores y electrónica. Sin embargo, su resistencia a altas temperaturas y a la oxidación es pobre, lo que limita su aplicación en entornos extremos.

Varilla de aleación TZM (0.5% Ti, 0.08% Zr, 0.02% C): La resistencia a la tracción (alrededor de 1100 MPa) y la resistencia a la fluencia del TZM son significativamente mejores que las del molibdeno puro a través del fortalecimiento de la solución y el fortalecimiento por precipitación, lo que lo hace adecuado para componentes aeroespaciales y de hornos de alta temperatura. Sin embargo, su dificultad de procesamiento es alta y el costo es alto.

Varilla de aleación Mo-La (0,3-1% La₂O₃): Es adecuada para uso a largo plazo a alta temperatura debido a su ductilidad y ductilidad para mejorar la resistencia a la oxidación a alta temperatura y la resistencia del límite del grano a través del fortalecimiento de la dispersión.

Varillas de aleación Mo-W: El tungsteno dopado (5-30%) aumenta el punto de fusión y la resistencia, pero reduce ligeramente la conductividad, lo que lo hace adecuado para aplicaciones especiales a alta temperatura.

Las varillas de aleación TZM y Mo-La son superiores al molibdeno puro en rendimiento a alta temperatura, pero ligeramente inferiores en conductividad y procesabilidad. La elección debe

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

sopesarse de acuerdo con el escenario de aplicación, por ejemplo, la industria de semiconductores prefiere las varillas de molibdeno de alta pureza, mientras que la aeroespacial prefiere TZM.

2.7 Comparación de las propiedades de las varillas de molibdeno con otros materiales de alta temperatura

El rendimiento de las varillas de molibdeno en comparación con otros materiales de alta temperatura (por ejemplo, tungsteno, niobio, tantalio, cerámica) es el siguiente:

Molibdeno vs. tungsteno: El tungsteno tiene un punto de fusión más alto (3422 °C) que el molibdeno y una mayor densidad (19,25 g/cm³), lo que lo hace adecuado para entornos de temperatura más alta. Sin embargo, el tungsteno es más difícil y costoso de procesar que el molibdeno, y las varillas de molibdeno son más ventajosas en aplicaciones sensibles al peso.

Molibdeno vs. Niobio/Tántalo: El niobio y el tantalio tienen puntos de fusión ligeramente más bajos o más cercanos (2468 °C y 3017 °C) que el molibdeno, pero son más resistentes a la corrosión que el molibdeno, especialmente en ambientes ácidos fuertes. Las varillas de molibdeno tienen un bajo costo y son adecuadas para aplicaciones industriales a gran escala.

Molibdeno vs. cerámica: Las cerámicas (por ejemplo, alúmina, carburo de silicio) tienen mayor resistencia a la oxidación y estabilidad química, pero tienen poca tenacidad mecánica y son propensas a fracturas frágiles. La ductilidad y resistencia de las varillas de molibdeno a altas temperaturas son más adecuadas para entornos de carga dinámica.

Las propiedades combinadas de las varillas de molibdeno (alto punto de fusión, baja expansión térmica, costo moderado) les dan ventajas únicas en hornos de alta temperatura, semiconductores y aeroespacial, pero se debe seleccionar la combinación correcta de materiales para la aplicación específica.

2.8 Varilla de molibdeno MSDS de CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD, un proveedor líder de productos de molibdeno en China, brinda a los usuarios orientación sobre el uso y manejo seguro de varillas de molibdeno a través de su Hoja de datos de seguridad de materiales (MSDS) para varillas de molibdeno. La siguiente es una descripción general de los principales contenidos de las varillas de molibdeno CTIA GROUP LTD MSDS:

Parte I: Nombres químicos

Nombre químico : molibdeno

El nombre en inglés del producto químico es Molibdeno

Nº CAS:7439-98-7

Fórmula molecular: Mo

Peso molecular: 99.95

Parte II: Composición/Información de composición

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

Contenido: 99,95% molibdeno

Parte III: Panorama general de los peligros

Riesgos para la salud: Este producto no irrita los ojos ni la piel.

Peligro de explosión: Este producto no es inflamable ni irritante.

Parte IV: Medidas de primeros auxilios

Contacto piel con piel: Quítese la ropa contaminada y enjuague con abundante agua corriente.

Contacto con los ojos: Levante el párpado y enjuague con agua corriente o solución salina.

Tratamiento médico.

Inhalación: Retirar de la escena al aire libre. Si tiene dificultad para respirar, dele oxígeno.

Tratamiento médico.

Ingesta: Beba abundante agua tibia para inducir el vómito. Tratamiento médico.

Parte V: Medidas de protección contra incendios

Productos de combustión nocivos: Los productos de descomposición natural son desconocidos.

Método de extinción de incendios: Los bomberos deben usar máscaras antigás y trajes de extinción de incendios de cuerpo completo para extinguir el fuego en la dirección de barlovento. Agente

extintor de incendios: polvo de cuero seco, arena.

Parte VI: Manejo de Emergencia de Derrames

Tratamiento de emergencia: Aísle el área contaminada por fugas y restrinja el acceso. Corta la fuente de fuego. Se recomienda a los servicios de emergencia que usen máscaras contra el polvo (máscaras faciales completas) y ropa protectora. Evite el polvo, límpielo con cuidado, póngalo en una bolsa y transfíralo a un lugar seguro. Si hay una gran cantidad de fugas, cúbrala con un paño plástico o una lona. Recolectar y reciclar o transportar a un sitio de eliminación de desechos para su eliminación.

Parte VII: Manipulación, manipulación y almacenamiento

Precauciones para la operación: Los operadores deben estar especialmente capacitados y seguir estrictamente los procedimientos operativos. Se recomienda que los operadores usen máscaras antipolvo filtrantes autocebantes, gafas de seguridad química, overoles anti-penetración de veneno y guantes de goma. Manténgase alejado del fuego y las fuentes de calor, y está estrictamente prohibido fumar en el lugar de trabajo. Utilice sistemas y equipos de ventilación a prueba de explosiones. Evite la generación de polvo. Evite el contacto con oxidantes y halógenos. Al manipular, es necesario cargar y descargar ligeramente para evitar daños en el embalaje y los contenedores. Equipado con las variedades y cantidades correspondientes de equipos de extinción de incendios y equipos de tratamiento de emergencia de fugas. Los recipientes vacíos pueden dejar sustancias nocivas.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Precauciones de almacenamiento: Almacene en un almacén fresco y ventilado. Mantener alejado del fuego y de fuentes de calor. Debe almacenarse por separado de los oxidantes y halógenos, y no debe mezclarse. Equipado con la variedad y cantidad correspondiente de equipos de extinción de incendios. El área de almacenamiento debe estar equipada con materiales adecuados para contener el derrame.

Parte VIII: Control de la exposición/Protección personal

China MAC (mg/m³): 6

URSS MAC (mg/m³): 6

TLVTN: ACGIH 1mg/m³

TLVWN: ACGIH 3mg/m³

Método de monitoreo: espectrofotometría de tiocianuro de potasio-cloruro de titanio

Control de ingeniería: el proceso de producción está libre de polvo y totalmente ventilado.

Protección respiratoria: Cuando la concentración de polvo en el aire supera la norma, se debe usar una mascarilla antipolvo filtrante autocebante. En el caso de una evacuación de emergencia, se deben usar aparatos de respiración de aire.

Protección ocular: Use anteojos de seguridad química.

Protección corporal: Use overoles anti-penetración de veneno.

Protección de las manos: Use guantes de goma.

Parte IX: Propiedades fisicoquímicas

Ingrediente principal: Puro

Apariencia y propiedades: sólido, blanco metálico brillante; En blanco, acabado negro

Punto de fusión (°C): 2620

Punto de ebullición (°C): 5560

Densidad relativa (agua = 1): 9,4~10,2 (20 °C)

Densidad de vapor (aire = 1): Sin datos

Presión de vapor de saturación (kPa): no hay datos disponibles

Calor de combustión (kJ/mol): sin datos

Temperatura crítica (°C): No hay datos disponibles

Presión crítica (MPa): No hay datos disponibles

Logaritmo del coeficiente de reparto del agua: sin datos

Punto de inflamación (°C): No hay datos disponibles

Temperatura de ignición (°C): Sin datos

% de límite de explosión (V/V): Sin datos

Límite inferior de explosión % (V/V): Sin datos

Solubilidad: soluble en ácido nítrico, ácido fluorhídrico

Usos principales: utilizado en la producción de moldes, alambres de molibdeno, piezas electrónicas, etc

Parte X: Estabilidad y reactividad

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

Sustancias prohibidas: ácidos fuertes y álcalis.

Parte XI:

Toxicidad aguda: no se dispone de datos

LC50: Sin datos

Parte XII: Datos ecológicos

No hay información disponible en esta sección

Parte XIII: Eliminación

Método de eliminación de residuos: Consulte las leyes y reglamentos nacionales y locales pertinentes antes de eliminarlos. Recicla si es posible.

Parte XIV: Información de envío

Número de mercancías peligrosas: sin información

Categoría de embalaje: Z01

Precauciones para el transporte: El embalaje debe estar completo durante el envío y la carga debe ser segura. Durante el transporte, es necesario asegurarse de que el contenedor no tenga fugas, colapse, caiga o se dañe. Está terminantemente prohibido mezclar con oxidantes, halógenos, productos químicos comestibles, etc. Durante el transporte, debe protegerse de la exposición al sol, la lluvia y las altas temperaturas. Los vehículos deben limpiarse a fondo después del transporte.

Parte XV: Información Regulatoria

Información reglamentaria: Reglamento sobre la Gestión de la Seguridad de los Productos Químicos Peligrosos (promulgado por el Consejo de Estado el 17 de febrero de 1987), Normas detalladas para la aplicación del Reglamento sobre la Gestión de la Seguridad de los Productos Químicos Peligrosos (Hua Lao Fa [1992] N° 677), Reglamento sobre el Uso Seguro de los Productos Químicos en el Trabajo ([1996] Lao Bu Fa N° 423) y otras leyes y reglamentos, que han adoptado las disposiciones correspondientes sobre la seguridad del uso, la producción, el almacenamiento, el transporte, la carga y la descarga de productos químicos peligrosos; La norma higiénica para el tungsteno en el aire de taller (GB 16229-1996) estipula la concentración máxima permitida y el método de detección de esta sustancia en el aire de taller.

Parte XVI: Información del proveedor

Proveedor: CTIA GROUP LTD

Tel: 0592-5129696/5129595

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal



Varillas de molibdeno CTIA GROUP LTD

Capítulo 3 Proceso de preparación y producción de varillas de molibdeno

La preparación y producción de varillas de molibdeno es un proceso técnico complejo que implica múltiples pasos, desde la extracción del mineral de molibdeno hasta la forma final de la barra. A continuación se describe en detalle el flujo del proceso de adquisición de materia prima de molibdeno, pulvimetalurgia, sinterización, procesamiento térmico, tratamiento de superficies y control de calidad, centrándose en ampliar los detalles técnicos, la gama de parámetros, los factores que influyen y los últimos avances tecnológicos para reflejar completamente la base científica y de ingeniería de la producción de varillas de molibdeno.

3.1 Adquisición de materias primas de molibdeno

El punto de partida para la producción de varillas de molibdeno es la adquisición de materia prima de molibdeno de alta pureza, generalmente con molibdenita (MoS_2) como fuente principal. La adquisición de materias primas incluye la extracción de minerales, el beneficio y la purificación de concentrados, que es compleja y tiene un impacto significativo en la calidad del producto final.

3.1.1 Extracción y beneficio de mineral de molibdeno

La extracción de mineral de molibdeno es el primer paso de la cadena de producción, y la molibdenita es la principal materia prima industrial debido a su alto contenido de molibdeno (alrededor del 60%) y sus buenas propiedades de beneficio. La distribución de los recursos de mineral de molibdeno en el mundo está concentrada, y las regiones con ricas reservas incluyen Asia, América del Norte y América del Sur. Las leyes del mineral suelen oscilar entre el 0,05 y el 0,5% de Mo, y los minerales asociados (por ejemplo, cobre, plomo, tungsteno) aumentan la dificultad de beneficio.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Método de minería:

Minería a cielo abierto: adecuada para yacimientos poco profundos, utilizando grandes excavadoras y vehículos de transporte, procesando decenas de miles de toneladas de mineral por día. El proceso incluye voladura, carga y transporte, que tiene la ventaja de ser de bajo costo, pero tiene un gran impacto ambiental y requiere tratamiento de relaves.

Minería subterránea: adecuada para yacimientos minerales profundos, utilizando excavación de carreteras, perforación de rocas y equipos de voladura e elevación. La minería subterránea es más costosa, pero adecuada para yacimientos de alta ley. Durante el proceso minero, es necesario monitorear la estabilidad geológica y prevenir deslizamientos de tierra.

Minería mixta: Algunas minas utilizan una combinación de tajo abierto y subterránea para optimizar el plan minero de acuerdo con la profundidad y economía del cuerpo mineral.

Proceso de beneficio:

La flotabilidad natural del molibdeno lo hace adecuado para procesos de flotación, como trituración, molienda, flotación, deshidratación y secado:

Trituración: El mineral en bruto se procesa mediante trituración gruesa (trituradora de mandíbula, tamaño de partícula < 150 mm), trituración secundaria (trituradora de cono, < 50 mm) y trituración fina (trituradora de impacto, < 10 mm) para liberar partículas de molibdenita.

Molienda: Se utiliza un molino de bolas húmedo o un molino de varillas para moler el mineral al 80% a través de una malla de 200 (aproximadamente 74 μ m) para garantizar la disociación del monómero de molibdenita. Los medios de molienda (por ejemplo, bolas de acero) deben reemplazarse regularmente para evitar la contaminación.

Flotación:

Separación aproximada: El concentrado crudo que contiene 10-20% de Mo se obtiene por flotación primaria a pH 7-9 utilizando colectores (por ejemplo, queroseno, xantato, 0,1-0,5 kg/t de mineral) y agentes espumantes (por ejemplo, aceite de pineol, 0,05-0,2 kg/t).

Selección: El concentrado grueso se selecciona 3-5 veces, y se añaden inhibidores (como el sulfuro de sodio, 0,5-2 kg/t) a impurezas separadas como el cobre y el plomo, y finalmente se obtiene un concentrado de molibdeno que contiene un 40-50% de Mo.

Barrido: refluotación de relaves para recuperar el molibdeno residual con una tasa de recuperación integral del 85-95%.

Deshidratación y secado: El concentrado de molibdeno se procesa mediante un concentrador (concentrado al 60-70% de sólidos), un filtro prensa (<10% de humedad) y un secador rotativo (<5% de humedad) para preparar las materias primas para el posterior tostado.

Factores que influyen:

Propiedades del mineral: El tamaño de grano y los tipos minerales asociados de molibdenita afectan la eficiencia de la flotación. El mineral incrustado de grano fino requiere una molienda más fina para aumentar el consumo de energía.

Selección de agentes: La relación entre el colector y el inhibidor debe optimizarse de acuerdo con la composición del mineral, y el exceso de agentes puede reducir el grado de concentrado.

Control ambiental: Las aguas residuales de flotación contienen metales pesados y productos químicos, que deben neutralizarse, precipitarse y reciclarse, y el pH se controla entre 6,5 y 7,5 para

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

reducir la descarga.

Avances tecnológicos:

Beneficio inteligente: La separación de rayos X (XRT) y la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) se utilizan para preseparar el mineral con el fin de aumentar el grado de molienda y reducir el consumo de energía en un 10-15%.

Agentes verdes: desarrollar colectores no tóxicos o de baja toxicidad (como el ácido alquilfosfónico) para reducir la contaminación ambiental.

Control automatizado: La celda de flotación está equipada con un analizador de grado en línea y un sistema de dosificación automático que ajusta los parámetros del proceso en tiempo real para aumentar la recuperación en un 1-2%.

3.1.2 Purificación del concentrado de molibdeno

La purificación de concentrado de molibdeno es el proceso de convertir un concentrado que contiene entre un 40 y un 50% de Mo en óxido de molibdeno (MoO_3) de alta pureza o polvo de molibdeno metálico, que implica tres etapas: tostado, purificación química y reducción.

Tostado:

En hornos rotatorios, hornos multicámara u hornos de lecho fluidizado, la molibdenita reacciona con el oxígeno a 550-650 °C para formar MoO_3 y liberar SO_2 .

Parámetros del proceso:

Temperatura: 550–650 °C, demasiado alta (>700 °C) conduce a la pérdida de volatilización de MoO_3 , una reacción demasiado baja es incompleta.

Concentración de oxígeno: rico en aire u oxígeno (contenido de O_2 20-30%), lo que garantiza una oxidación adecuada.

Tiempo de tostado: 2-4 horas, dependiendo del tipo de horno y del tamaño del concentrado.

Equipo: Los hornos rotatorios (de 1 a 3 m de diámetro, 20 a 50 m de longitud) son adecuados para la producción a gran escala, y los hornos de lecho fluidizado son más eficientes pero requieren un tamaño de partícula estricto (<0,1 mm).

Tratamiento de subproductos: El SO_2 se convierte en ácido sulfúrico mediante la columna de decapado, y el gas de cola debe desulfurarse (absorción de $\text{Ca}(\text{OH})_2$) para cumplir con las normas de emisión (concentración de SO_2 < 50 mg/m^3).

Producto: Después del tostado, se obtiene MoO_3 industrial, que contiene entre un 55 y un 60% de Mo, y las impurezas incluyen Cu (<0,5%), Pb (<0,1%) y Si (<1%).

Purificación química:

Para satisfacer la demanda de varillas de molibdeno de alta pureza, el MoO_3 debe purificarse aún más, y los métodos comunes incluyen:

Método de lixiviación de amoníaco:

El MoO_3 reacciona con el agua amoniacal (concentración 5-10%) para formar una solución de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

molibdato de amonio

Las impurezas insolubles (como SiO_2 , Fe_2O_3) se eliminan por filtración y la solución se evapora, cristaliza o precipita con ácido (pH 2-3) para obtener molibdato de amonio de alta pureza (pureza $\geq 99,9\%$).

Ventajas: tecnología madura, adecuada para la producción a gran escala; Desventajas: La volatilización del amoníaco debe recuperarse y eliminarse.

Método de lixiviación ácida:

Las impurezas como el Cu y el Pb se disuelven con ácido nítrico diluido (10-20%) o ácido clorhídrico, y el MoO_3 se conserva en estado sólido y se lava y seca para obtener un MoO_3 de alta pureza.

Es adecuado para concentrados con altas impurezas de metales pesados, pero el costo del tratamiento ácido residual es alto.

Método de intercambio iónico:

La solución de molibdato de amonio adsorbe MoO_4^{2-} a través de la resina de intercambio aniónico (tipo D301 o 717), y después de la elución, se obtiene MoO_3 de ultra alta pureza (pureza $\geq 99,99\%$), que es adecuado para la industria de semiconductores.

El proceso es complejo y la regeneración de la resina requiere un mantenimiento regular.

Extracción con disolventes:

El molibdeno se extrae de una solución ácida utilizando un extractante (como la trioctilamina) para separar impurezas como Cu y Fe para obtener una solución de molibdeno de alta pureza.

Es adecuado para concentrados complejos y la eficiencia de extracción es superior al 95%.

Restaurar:

El MoO_3 de alta pureza o molibdato de amonio se reduce a polvo metálico de molibdeno en una atmósfera de hidrógeno en dos etapas:

Reducción primaria (400–600 °C):

Tipo de horno: horno de empuje o tubo con un caudal de hidrógeno de 100-200 mL/min y un punto de rocío de < -50 °C.

Reducción secundaria (900–1100 °C):

La temperatura del horno se controla con precisión (error ± 10 °C), y la pureza del polvo de molibdeno es del 99,95 al 99,99 % y el tamaño de partícula es de 1 a 5 μm .

Factores que influyen:

Grado de la materia prima: El contenido de impurezas como Cu y as en el concentrado afecta la dificultad de purificación, y se requiere un tratamiento previo (como la separación magnética).

Atmósfera reductora: La pureza del hidrógeno ($> 99,999\%$) y el control del punto de rocío son cruciales, demasiado contenido de oxígeno conduce a la oxidación del polvo de molibdeno.

Estanqueidad del equipo: El horno de reducción debe ser muy hermético para evitar la infiltración de aire.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Rods Introduction

1. Overview of Molybdenum Rods

Molybdenum rods are high-performance metal materials made from high-purity molybdenum powder through pressing, sintering, forging, and drawing processes. They possess excellent high-temperature performance, thermal conductivity, and chemical stability. These rods are widely used in advanced technological fields such as metallurgy, electronics, glass, aerospace, and nuclear energy, making them one of the key functional materials in modern industrial high-temperature environments.

2. Main Application Fields of Molybdenum Rods

- Heating elements and support rods for high-temperature electric furnaces
- Diffusion tubes and wafer carriers in the semiconductor industry
- Electrodes and targets for vacuum coating equipment
- High-temperature components in nuclear reactors and aircraft engines
- Electrode rods and heat-resistant fixtures in the glass industry
- Medical devices and X-ray targets
- High-temperature experimental materials and components in scientific research

3. Classification of Molybdenum Rods (by purity)

Category	Description	Typical Applications
High-Purity Moly Rods	Purity $\geq 99.95\%$, extremely low impurity levels	Electronics, semiconductors, research equipment
Industrial-Grade Rods	Purity around 99.90%, cost-effective	Electric heating, glass, metallurgical equipment
Doped Moly Rods	Doped with La, Ti, Zr, etc., for enhanced performance	High-temperature structural parts, TZM alloy applications

4. Typical Specifications of Molybdenum Rods from CTIA GROUP LTD

Item	Value Range
Density	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$
Hardness (HV30)	160 – 250 HV
Tensile Strength (Rm/MPa)	$\geq 590 \text{ MPa}$
Yield Strength (Rp0.2/MPa)	$\geq 490 \text{ MPa}$
Elongation after fracture (A/%)	10–25%
Diameter Range	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$, Customizable
Length Range	10 mm – 2000 mm, Customizable

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com
Phone: +86 592 5129595; 592 5129696
Website: www.molybdenum.com.cn

Avances tecnológicos:

Purificación sin amoníaco: El MoO_3 se purifica directamente por medio ácido (como HCl-HNO_3) para reducir la descarga de aguas residuales de nitrógeno amoniacal, y la eficiencia de purificación alcanza el 98%.

Tostado por microondas: El calentamiento por microondas (potencia de 1 a 5 kW) aumenta la eficiencia del tostado, reduce el tiempo en un 20-30% y reduce el consumo de energía.

Metalurgia verde: Desarrollo de la tecnología de conversión catalítica de SO_2 para convertir los subproductos en ácido sulfúrico o azufre de alto valor añadido.

3.2 Proceso de pulvimetalurgia de varillas de molibdeno

La pulvimetalurgia es la tecnología central de la producción de varillas de molibdeno, que implica la preparación de polvo de molibdeno, el control del tamaño y la pureza de las partículas, y el moldeo por compresión, que determina la microestructura y las propiedades de la barra.

3.2.1 Preparación de polvo de molibdeno (método de reducción, método de atomización)

Método de reducción:

El método de reducción es el método más utilizado para la preparación de polvo de molibdeno en la industria, que reduce el MoO_3 o molibdato de amonio por hidrógeno en etapas. Proceso detallado:

Materia prima: MoO_3 de alta pureza (pureza $\geq 99,9\%$) o molibdato de amonio, cargado en bote de molibdeno o acero inoxidable (espesor 5-10 mm).

Reducción primaria: MoO_2 con un tamaño de partícula de 3-10 μm a 400-600 °C a 400-600 °C y un punto de rocío de < -50 °C en un horno de empuje o de tubo.

Reducción secundaria: 900–1100 °C, caudal de hidrógeno 200–400 mL/min, para generar polvo metálico de molibdeno, tamaño de partícula 1–5 μm , pureza $\geq 99,95\%$.

Equipamiento: El horno de reducción está equipado con control de temperatura multizona (error $\pm 5^\circ\text{C}$) y sistema de tratamiento de gases de escape (absorción de H_2O y MoO_3 residual).

Control de procesos:

Gradiente de temperatura: Evite la aglomeración o sinterización de polvo.

Capacidad del barco: 5-10 kg por barco, demasiado alto afecta la uniformidad de la restauración.

Reciclaje de hidrógeno: Recuperación de hidrógeno no reaccionado, reduciendo los costes entre un 10 y un 15%.

Nebulización:

El método de atomización prepara polvo ultrafino o nano-molibdeno rociando molibdeno fundido en un medio de alta presión para una solidificación rápida, que es adecuada para aplicaciones de alta gama. Procedimiento:

Fundición: El molibdeno de alta pureza ($> 99,99\%$) se funde utilizando un arco de plasma (potencia de 50 a 200 kW) o un horno de arco eléctrico a temperaturas de hasta 2700 a 3000 °C.

Atomización: La masa fundida se inyecta con nitrógeno a alta presión (5-10 MPa) o argón a través de una boquilla (tamaño de poro de 0,5-2 mm) a una velocidad de enfriamiento de 10^5 - 10^6 °C/s para formar un polvo esférico con un tamaño de partícula de 40-100 nm.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Recolección y clasificación: El polvo es recolectado por un ciclón y la distribución del tamaño de partícula ($D_{50} < 100$ nm) es controlada por un clasificador de aire.

Equipo: Equipo de atomización por plasma (como el tipo APS-100), equipado con un sistema de circulación de gas inerte para evitar la oxidación.

Ventajas: alta esfericidad del polvo ($>95\%$), buena fluidez, adecuado para la impresión 3D y objetivos de pulverización catódica.

Desventajas: El alto consumo de energía (aprox. 5-10 kWh/kg) y la gran inversión en equipos limitan las aplicaciones a gran escala.

Otros métodos:

Electrólisis: El polvo de nano-molibdeno se prepara mediante una solución electrolítica de molibdato con un tamaño de partícula de 20-50 nm pero de baja pureza ($<99,9\%$).

Método de plasma de microondas: Reducción de la fase gaseosa de MoO_3 con plasma de microondas (2,45 GHz) con un tamaño de partícula de 10-30 nm, adecuado para la investigación en laboratorio.

Factores que influyen:

Pureza de las materias primas: Las impurezas como el Fe y el C en el MoO_3 afectan a la calidad del polvo de molibdeno y deben purificarse previamente.

Temperatura de reducción: demasiado alta conducirá al crecimiento del grano, demasiado baja afectará la eficiencia de reducción.

Control de flujo de aire: En el método de atomización, la presión y el caudal del gas determinan la distribución del tamaño de partícula del polvo.

Avances tecnológicos:

Polvo de nanomolibdeno: Se desarrolló la tecnología de deposición química de vapor por plasma (P-CVD) para preparar polvo de molibdeno con un tamaño de partícula de < 50 nm para mejorar la actividad de sinterización.

Polvo de molibdeno con bajo contenido de oxígeno: El contenido de oxígeno se reduce al $<0,001\%$ mediante hidrógeno de ultra alta pureza ($>99,9999\%$) y reducción a baja temperatura ($800-900^\circ\text{C}$).

Atomización eficiente: La atomización asistida por ultrasonidos se utiliza para mejorar la uniformidad del polvo y reducir la desviación estándar de la distribución del tamaño de partícula en un 20%.

3.2.2 Control del tamaño de partícula y la pureza del polvo

El tamaño de partícula y la pureza del polvo de molibdeno afectan directamente la densidad y el rendimiento de sinterización de la pieza en bruto prensada. Los métodos de control incluyen:

Control del tamaño de partícula:

Tamizado: Los polvos con un tamaño de partícula de 1-10 μm se separan mediante un agitador (malla 100-400) o una máquina de tamizado ultrasónico.

Clasificación del flujo de aire: Por medio de un clasificador ciclónico o un clasificador de turbina, el D_{50} se controla a 1-5 μm y la desviación estándar de la distribución del tamaño de partícula es

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

de $< 0,5 \mu\text{m}$.

Molienda: Se utiliza un molino de molienda planetario (200-400 rpm) o un molino de chorro (presión de 0,5-1 MPa) para refinar el polvo, y el medio de molienda de bolas es de carburo cementado para evitar la contaminación.

Condiciones de reducción: reducción lenta a baja temperatura (900-950 °C, 4-6 horas) para obtener partículas finas, reducción rápida a alta temperatura (1050-1100 °C, 1-2 horas) para generar partículas más grandes.

Control de pureza:

Selección de materias primas: Se utiliza MoO_3 de ultra alta pureza ($\geq 99,99\%$) para reducir impurezas como Fe ($< 50 \text{ ppm}$) y C ($< 30 \text{ ppm}$).

Entorno reductor: punto de rocío de hidrógeno $< -60 \text{ °C}$, contenido de oxígeno en el horno $< 10 \text{ ppm}$ para evitar la oxidación del polvo.

Limpieza de equipos: Decapado regular (5% HNO_3) del bote de reducción y tuberías para eliminar las impurezas residuales.

Envasado y almacenamiento: El polvo de molibdeno se envasa al vacío en una atmósfera inerte (N_2 o Ar) para evitar la absorción de humedad y la oxidación.

Método de detección:

Análisis de tamaño de partícula: analizador láser de tamaño de partícula (rango de medición de 0,01 a 100 μm), detección de D10, D50, D90.

Análisis de pureza: Se utilizó la espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) para detectar impurezas con precisión de ppb.

Contenido de oxígeno: método de fusión de gas inerte, el contenido de oxígeno es $< 0.005\%$.

Factores que influyen:

Morfología del polvo: La fluidez del polvo esférico (método de atomización) es mejor que la del polvo irregular (método de reducción), lo que afecta la uniformidad de la compresión.

Aglomeración: Los polvos finos ($< 1 \mu\text{m}$) tienden a aglomerarse y se agrega un dispersante (por ejemplo, polietilenglicol, 0,1-0,5 % en peso).

Humedad ambiental: La alta humedad ($> 60\%$) hace que el polvo absorba la humedad y aumente el contenido de oxígeno.

Avances tecnológicos:

Monitoreo en línea: La tecnología de dispersión láser se utiliza para detectar la distribución del tamaño de partícula en tiempo real, ajustar los parámetros de reducción y mejorar la consistencia.

Polvo ultrafino: Desarrollo de aleación mecánica combinada con un método de reducción química para preparar polvo de molibdeno $\text{D}_{50} < 50 \text{ nm}$ para nanocompuestos.

Mejora de la pureza: a través de la reducción de múltiples etapas y la purificación por plasma, la pureza del polvo de molibdeno alcanza el 99,999%, lo que satisface las necesidades de los objetivos de semiconductores.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

3.2.3 Moldeo por compresión (prensado isostático en frío, moldeo)

El moldeo por compresión compacta el polvo de molibdeno en una pieza en bruto en forma de varilla, que proporciona la base para la sinterización posterior. Los métodos comunes incluyen el prensado isostático en frío y el moldeo:

Prensado isostático en frío (CIP):

Proceso: El polvo de molibdeno se carga en un molde de caucho o poliuretano (espesor de pared de 2 a 5 mm) y se coloca en un líquido a alta presión (agua o aceite, presión de 100 a 400 MPa) y se prensa uniformemente durante 1 a 5 minutos.

Equipamiento: Prensa isostática en frío para sacos húmedos o secos con una presión máxima de 600 MPa y un diámetro de matriz de 50-500 mm.

Propiedades de la palanquilla: 60-70% de densidad teórica, tamaño uniforme, adecuado para diámetros grandes (>50 mm) o varillas largas (>1 m).

Ventajas: Distribución uniforme de la presión, reducción de las grietas de laminación y de los gradientes de densidad.

Desventajas: alto costo del molde, largo ciclo de prensado.

Moldeada:

Proceso: El polvo de molibdeno se carga en una matriz de acero (dureza HRC 60-65) y se presiona en una o ambas direcciones mediante una prensa hidráulica (presión 50-200 MPa) a una velocidad de prensado de 0,5-2 mm/s.

Equipamiento: Prensa hidráulica de cuatro columnas (tonelaje 100-1000 t) con un lubricante (por ejemplo, estearato de zinc) para el molde.

Propiedades de la palanquilla: 50-60% de densidad teórica, adecuada para diámetros pequeños (<20 mm) o barras perfiladas.

Desventajas: El prensado unidireccional es fácil de producir gradientes de densidad y se requieren múltiples prensas volteadas.

Detalles del proceso:

Aglutinante: Se añade alcohol polivinílico (PVA, 0,5-2 % en peso) o cera de parafina para aumentar la resistencia de la palanquilla, y el aglutinante se volatiliza (400-600 °C) antes de la sinterización.

Diseño de moldes: Los moldes CIP deben ser altamente elásticos (elongación > 200%) y los moldes moldeados deben tener una alta resistencia al desgaste (recubrimiento WC-Co).

Desmoldeo: Se utilizan dispositivos de desmoldeo neumáticos o hidráulicos para evitar que la pieza en bruto se deforme.

Factores que influyen:

Fluidez del polvo: El polvo esférico (densidad aparente > 3 g/cm³) está mejor prensado que el polvo irregular.

Distribución de la presión: La uniformidad de la presión CIP se ve afectada por la forma del molde, y el diseño del punzón debe optimizarse para el moldeo.

Control ambiental: La humedad del taller de prensado es < del 50% para evitar que el polvo absorba humedad.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Avances tecnológicos:

Prensado termostático: el prensado a 100-200 °C aumenta la densidad de la palanquilla en un 5-10% y reduce la contracción de la sinterización.

Prensado automático: el robot de carga de polvo y el sistema de limpieza de moldes se utilizan para mejorar la eficiencia de producción en un 20%.

Moldes de alta precisión: la tecnología de impresión 3D fabrica moldes complejos para satisfacer las necesidades de varillas de molibdeno de formas especiales.

3.3 Proceso de sinterización de varillas de molibdeno

La sinterización es un paso clave en el curado de la pieza en bruto prensada en una pieza en bruto de barra de molibdeno de alta densidad, lo que promueve la unión de partículas a altas temperaturas, lo que afecta significativamente las propiedades mecánicas y la microestructura de la barra.

3.3.1 Sinterización al vacío

La sinterización al vacío se lleva a cabo en un entorno de alto vacío para reducir la oxidación y la contaminación por impurezas.

Proceso:

Temperatura: 5-10 °C/min a 1000 °C, calentar durante 1-2 horas, aglutinantes volátiles y gases de adsorción.

Sinterización a alta temperatura: 1800–2200 °C, mantenimiento durante 2–4 horas, densidad de palanquilla hasta el 90–95% de densidad teórica (9,2–9,7 g/cm³).

Enfriamiento: 10–20 °C/min a temperatura ambiente para evitar el agrietamiento por estrés térmico.

Vacío: 10⁻³–10⁻⁵ Pa, utilizando una combinación de bomba mecánica y bomba de difusión para evitar la volatilización de MoO₃.

Equipo:

Horno de inducción al vacío: 50–200 kW, cámara del horno de molibdeno o grafito, resistente a la temperatura > 2300 °C.

Sistema de control de temperatura: termopar (tipo W-Re) y termómetro infrarrojo, error ± 5°C.

Tratamiento de gases de escape: El condensador recupera el MoO₃ volátil y reduce la contaminación.

Mérito:

El contenido de oxígeno es bajo (<0,003%), lo que es adecuado para la producción de varillas de molibdeno de alta pureza.

El crecimiento del grano es controlable y la microestructura es uniforme. Defecto:

Alto consumo de energía (aprox. 2-3 kWh/kg).

El equipo es costoso de mantener y la bomba de vacío necesita reemplazar los sellos regularmente.

Factores que influyen:

Temperatura de sinterización: Demasiado alta (>2200 °C) conduce a un crecimiento excesivo de granos (>50 μm) y pérdida de resistencia.

Tiempo de retención: demasiado tiempo aumenta el consumo de energía, demasiado corto afecta la

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

densidad.

Densidad de palanquilla: La densidad inicial $< 50\%$ conduce a una contracción excesiva de la sinterización y a un fácil agrietamiento.

3.3.2 Sinterización de protección de hidrógeno

La sinterización protectora de hidrógeno se lleva a cabo en una atmósfera de hidrógeno de alta pureza, lo que evita la oxidación y promueve la reducción de MoO_2 . Flujo del proceso:

Temperatura: $5\text{--}15\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ a $800\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$ para eliminar el aglutinante.

Sinterización a alta temperatura: $1800\text{--}2100\text{ }^\circ\text{C}$, mantenimiento durante 2-5 horas, densidad 90-94% de densidad teórica.

Refrigeración: $10\text{--}30\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ con un caudal de hidrógeno de $50\text{--}100\text{ mL}/\text{min}$ para evitar la fragilización por hidrógeno.

Atmósfera: Punto de rocío de hidrógeno $< -40\text{ }^\circ\text{C}$, pureza $> 99,99\%$, contenido de oxígeno en el horno $< 5\text{ ppm}$.

Equipo:

Horno de sinterización de hidrógeno: horizontal o vertical, cámara del horno de molibdeno o acero inoxidable, equipado con una camisa refrigerada por agua.

Sistema de seguridad: Detector de fugas de hidrógeno y dispositivo de escape de emergencia para garantizar un funcionamiento seguro.

Tratamiento de gases de escape: Combustión de hidrógeno residual en los gases de escape, emisión de acuerdo con la norma (concentración de $\text{H}_2 < 0,1\%$).

Mérito:

La velocidad de sinterización es rápida, la eficiencia de producción es alta y es adecuada para la producción a gran escala.

El acabado de la superficie es mejor que la sinterización al vacío, lo que reduce la cantidad de trabajo de pulido posterior. Defecto:

Los riesgos para la seguridad del hidrógeno deben gestionarse estrictamente.

Las varillas de aleación como TZM son sensibles al hidrógeno y pueden introducir trazas de fragilización por hidrógeno.

Factores que influyen:

Flujo de hidrógeno: demasiado alto aumenta el costo, demasiado bajo afecta el efecto de reducción.

Estanqueidad del horno: Oxidación causada por fugas de aire, y el anillo de sellado debe revisarse regularmente.

Tamaño de la pieza en bruto: Las piezas en bruto grandes ($> 100\text{ mm}$) deben mantenerse calientes durante un tiempo prolongado.

3.3.3 Equipos de sinterización a alta temperatura y optimización de parámetros

Tipo de dispositivo:

Horno de inducción al vacío: adecuado para varillas de molibdeno de alta pureza, volumen del horno

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

0,1-1 m³, potencia 100-500 kW.

Horno de protección de hidrógeno: adecuado para la producción a gran escala, longitud del horno de 2 a 5 m, control de temperatura multizona.

Horno de resistencia: utilizado para la producción a pequeña y mediana escala, el costo es menor pero la uniformidad de la temperatura es ligeramente peor.

Requisitos del equipo:

Materiales resistentes a altas temperaturas: el horno está revestido con placa de molibdeno o fieltro de grafito, y la capa de aislamiento térmico es fibra de alúmina.

Precisión del control de temperatura: termopar y controlador PID, fluctuación de temperatura $\pm 3-5$ °C.

Monitorización de la atmósfera: analizador de oxígeno (rango de detección 0-100 ppm) y medidor de punto de rocío ($<-80^{\circ}\text{C}$).

Optimización de parámetros:

Perfil de temperatura: Calentamiento seccional (200 °C/h a 1000 °C, 50 °C/h a 2000 °C) para reducir el estrés térmico.

Tiempo de retención: 2-3 horas para palanquillas con un diámetro de <50 mm y 4-6 horas > 100 mm.

Velocidad de enfriamiento: El enfriamiento rápido (>20 °C/min) puede provocar microfisuras y debe optimizarse a 10-15 °C/min.

Control de atmósfera: el grado de vacío inicial de la sinterización al vacío $<10^{-2}$ Pa, $<10^{-4}$ Pa a alta temperatura; Caudal de sinterización de hidrógeno 100–300 mL/min.

Factores que influyen:

Uniformidad de la pieza en bruto: la densidad de prensado desigual conduce a diferencias de contracción por sinterización, lo que afecta la precisión dimensional.

Contaminación del horno: El MoO₃ o carburo residual contamina la pieza en bruto y el horno debe limpiarse regularmente.

Gestión de la energía: El consumo de energía de la sinterización a alta temperatura representa el 30-40% del coste de producción, y es necesario optimizar el tiempo de mantenimiento y el diseño del horno.

Avances tecnológicos:

Sinterización por microondas: El calentamiento por microondas (2,45 GHz, 10-50 kW) reduce el tiempo de sinterización en un 30-50% y el tamaño de grano en un 20%.

Sinterización por plasma de descarga (SPS): Sinterización rápida con corrientes pulsadas (1000-5000 A) con una densidad del 98%, adecuada para lotes pequeños de varillas de molibdeno de alto rendimiento.

Control inteligente de la temperatura: Los algoritmos de IA se utilizan para optimizar el perfil de temperatura, reducir el consumo de energía entre un 5 y un 10 % y mejorar la consistencia de la palanquilla.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

3.4 Tecnología de procesamiento térmico de varillas de molibdeno

El trabajo en caliente, que procesa la pieza en bruto sinterizada en la forma final de la barra de molibdeno, incluye forja, laminado y estirado, lo que afecta significativamente las propiedades mecánicas y la calidad de la superficie de la barra.

3.4.1 Proceso de forja

La forja refina el grano a través de la deformación plástica a alta temperatura para mejorar la resistencia de la varilla de molibdeno.

Proceso:

Calentamiento: 1200–1600 °C en un horno de resistencia o de inducción durante 30–60 minutos en una atmósfera de hidrógeno o vacío ($<10^{-2}$ Pa).

Forja: 20-30% de deformación en un solo disparo y 60-80% total en un solo martillo (fuerza de impacto 50-2000 kN) o máquina de forja hidráulica (presión 500-2000 t) utilizando un martillo neumático (fuerza de impacto 50-200 kN).

Recocido intermedio: 1000–1200 °C, mantener durante 1–2 horas, eliminar el endurecimiento por trabajo.

Refrigeración: Refrigeración con aire o atmósfera inerte a una velocidad de 10-20 °C/min.

Equipo:

Máquina de forja: martillo neumático para lotes pequeños, prensa hidráulica para barras de gran diámetro (>50 mm).

Hornos: de cámara o continuos, equipados con sistemas de protección de hidrógeno o vacío.

Detalles del proceso:

Tasa de deformación: 0,1–1 s^{-1} , demasiado rápido causará grietas, demasiado lento afectará la eficiencia.

Material del molde: superaleación (por ejemplo, Inconel 718) o aleación de molibdeno con lubricante MoS₂ en la superficie.

Control de grano: después de forjar, el tamaño de grano es de 10 a 30 μm y la resistencia a la tracción aumenta a 800 a 1000 MPa.

Factores que influyen:

Temperatura de calentamiento: demasiado alta (> 1700 °C) provocará el crecimiento del grano, demasiado baja (<1100 °C) aumentará la resistencia a la deformación.

Calidad de la palanquilla: Las grietas son causadas por la porosidad o inclusiones en la palanquilla sinterizada.

Condiciones de lubricación: Lo insuficiente provoca desgaste del molde y defectos en la superficie.

Avances tecnológicos:

Forja isotérmica: la forja a una temperatura constante de 1400-1500 °C aumenta la uniformidad de la deformación en un 15%.

Simulación numérica: El software de elementos finitos (por ejemplo, DEFORM) se utiliza para

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

optimizar los parámetros de forja y reducir el coste de prueba y error.

Forja automatizada: El manipulador opera la pieza en bruto para mejorar la eficiencia y la seguridad de la producción.

3.4.2 Proceso de laminación

El laminado produce varillas de molibdeno de diámetro medio por deformación continua con alto acabado superficial y precisión dimensional.

Proceso:

Calentamiento: 1000–1400°C, incubado durante 20–40 minutos, hidrógeno o vacío.

Laminación: 5-15% de deformación simple y 50-70% de deformación total utilizando un tren de laminación en caliente de dos o cuatro alturas.

Recocido: 800-1000 °C, incubado durante 1-2 horas para aliviar el estrés interno.

Refrigeración: Enfriamiento lento (5-10 °C/min) en atmósfera inerte.

Equipo:

Molinos: Los molinos de cuatro alturas (diámetros de 200 a 500 mm) son más precisos que los molinos de dos alturas y son adecuados para barras con un diámetro de 5 a 20 mm.

Rodillos: carburo de tungsteno (WC-Co) o acero de alta temperatura, pulido superficial ($R_a < 0,4 \mu\text{m}$).

Detalles del proceso:

Velocidad de laminación: 0,5–2 m/s, demasiado rápido puede provocar grietas en la superficie.

Lubricación: Emulsión de grafito o aceite lubricante a alta temperatura para reducir el coeficiente de fricción a 0,1-0,2.

Control dimensional: pinza láser en línea con una precisión de $\pm 0,01 \text{ mm}$.

Factores que influyen:

Gradiente de temperatura: La diferencia de temperatura entre la superficie de la pieza en bruto y el núcleo $> 100 \text{ °C}$, lo que da lugar a grietas.

Desgaste del rodillo: Necesita ser reparado regularmente para prolongar la vida útil.

Deformación: La cantidad de depresión simple $> 20\%$ aumenta el riesgo de microfisuras.

Avances tecnológicos:

Laminación de precisión: tren de laminación servocontrolado con una desviación dimensional de $< 0,005 \text{ mm}$, adecuado para objetivos semiconductores.

Recocido en línea: Recocido por inducción inmediatamente después del laminado, lo que reduce el tiempo de proceso en un 30%.

Lubricación verde: Desarrollar lubricantes a base de agua para reducir la contaminación ambiental.

3.4.3 Proceso de dibujo

El trefilado produce varillas de molibdeno de pequeño diámetro ($< 5 \text{ mm}$) con alta precisión y superficie lisa.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Proceso:

Pretratamiento: Decapado con barra laminada (10% HNO₃) para eliminar la capa de óxido y aplicar lubricante de grafito.

Trefilado: 800–1200 °C con molde de carburo (diámetro del agujero 0,5–5 mm), velocidad de estirado 0,1–1 m/s, deformación simple 10–20%.

Recocido intermedio: 800–1000 °C, mantener durante 30–60 minutos, restaurar la plasticidad.

Dibujo de varias pasadas: de 5 a 10 tirones para obtener el tamaño objetivo ($\pm 0,01$ mm).

Equipo:

Tirador: Tirador de cadena o hidráulico con una fuerza de tracción de 10 a 50 kN.

Molde: WC-Co o recubierto de diamante, precisión del orificio $\pm 0,001$ mm.

Detalles del proceso:

Lubricante: emulsión de grafito o MoS₂ con un espesor de recubrimiento de 0,1 a 0,5 mm.

Control de temperatura: calentamiento por inducción o calentamiento por resistencia, error $\pm 10^\circ\text{C}$.

Calidad de la superficie: Ra < 0,2 μm después del estirado, adecuado para materiales de electrodos.

Factores que influyen:

Desgaste del molde: Sustitución de troqueles cada 1000 m de embutición.

Defectos de la pieza en bruto: Las grietas o inclusiones de la superficie causan fracturas.

Velocidad de dibujo: Aumentar la concentración de estrés demasiado rápido.

Avances tecnológicos:

Embutición ultrafina: Desarrollo de moldes nano-diamante para la producción de varillas de molibdeno con un diámetro de < 1 mm.

Dibujo continuo: máquina de dibujo continuo multimodo, la eficiencia aumenta en un 50%.

Monitorización inteligente: sensor de diámetro y tensión en línea, ajuste de parámetros en tiempo real.

3.5 Tecnología de tratamiento superficial de varillas de molibdeno

Los tratamientos superficiales mejoran la resistencia a la corrosión, el acabado y el rendimiento a altas temperaturas de las varillas de molibdeno, incluido el pulido mecánico, la limpieza química y los recubrimientos antioxidantes.

3.5.1 Pulido mecánico

El pulido mecánico elimina los defectos de la superficie mediante esmerilado y pulido para lograr un alto acabado.

Proceso:

Esmerilado grueso: Las muelas abrasivas de carburo de silicio (malla 60-120) a 1000-2000 rpm se utilizan para eliminar las capas de óxido y los arañazos gruesos.

Esmerilado fino: banda abrasiva de diamante (tamaño de grano 400-800 malla), Ra 0,8-1,6 μm .

Pulido: Rueda de fieltro más pasta de pulido de alúmina (tamaño de partícula 0,5-1 μm), velocidad

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

de rotación 1500-3000 rpm, $Ra < 0,2 \mu m$.

Limpieza: Limpieza ultrasónica (frecuencia 40 kHz, agua desionizada) para eliminar los residuos de pulido.

Equipo:

Pulidora: pulidora plana o cilíndrica CNC, equipada con sistema de alimentación automática.

Detector: Medidor de rugosidad superficial (precisión $0,01 \mu m$), verifique el valor Ra .

Detalles del proceso:

Selección de abrasivos: el diamante es adecuado para varillas de molibdeno de alta dureza y el costo de la alúmina es bajo.

Refrigerante: Refrigerante a base de agua (pH 7-8) para evitar el sobrecalentamiento.

Tiempo de pulido: El pulido de varillas de 10 mm de diámetro es de unos 5-10 minutos/m.

Factores que influyen:

Tamaño de partícula abrasivo: demasiado grueso conduce a arañazos, demasiado fino y de baja eficiencia.

Control de presión: Las microfisuras se generan por una temperatura demasiado alta ($>0,5 MPa$).

Dureza de la barra: La aleación TZM es más difícil de pulir que el molibdeno puro.

Avances tecnológicos:

Electropulido: combinado con el pulido mecánico, $Ra < 0,1 \mu m$ y la eficiencia aumenta en un 20%.

Pulido láser: pulido sin contacto, adecuado para barras de formas complejas.

Pulido automático: Sistema de pulido robotizado, que reduce los costos de mano de obra en un 30%.

3.5.2 Limpieza química

La limpieza química elimina los óxidos, aceites e impurezas de la superficie para mejorar la resistencia a la corrosión y la conductividad.

Proceso:

Decapado: Mezcla de ácido nítrico-ácido sulfúrico ($HNO_3:H_2SO_4=1:3$, concentración 10-20%), remojada durante 5-15 minutos, temperatura $20-40^\circ C$, para eliminar la capa de óxido.

Lavado cáustico: solución de NaOH al 5-10%, $50-70^\circ C$, remojada durante 3-10 minutos para eliminar los contaminantes orgánicos.

Limpieza ultrasónica: agua desionizada más detergente neutro (0,1-0,5%) a 28-40 kHz durante un periodo de 5-10 minutos para eliminar las partículas.

Secado: Secado con aire caliente ($80-100^\circ C$) o secado al vacío para evitar la oxidación secundaria.

Equipo:

Baño de decapado: PP o PTFE con sistema de calentamiento y agitación.

Limpiador ultrasónico: potencia 500–2000 W, volumen del depósito 10–100 L.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Detalles del proceso:

Tratamiento de residuos: Neutralización ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, pH 6,5-7,5) de los residuos de decapado, precipitación de metales pesados y vertido.

Secuencia de limpieza: decapado-lavado-lavado alcalino-limpieza ultrasónica para garantizar que no queden residuos en la superficie.

Medidas de protección: Embalaje de nitrógeno inmediatamente después del lavado para evitar la absorción de humedad.

Factores que influyen:

Concentración de ácido: demasiado alta para corroer la matriz, demasiado baja para limpiarla a fondo.

Control de temperatura: demasiado alto aumentará la volatilización de los gases de escape, demasiado bajo reducirá la eficiencia.

Estado de la superficie: Las varillas negras tardan más en limpiarse que las varillas de pulido.

Avances tecnológicos:

Limpieza ecológica: Desarrollo de limpiadores a base de citrato, pH 4-6, para reducir la contaminación ambiental.

Limpieza con plasma: el plasma a baja temperatura (potencia 100-500 W) elimina los compuestos orgánicos, adecuado para varillas de molibdeno de alta pureza.

Limpieza automática: línea de limpieza continua multitanque, la eficiencia se incrementa en un 40%.

3.5.3 Recubrimientos superficiales (recubrimientos antioxidantes, etc.)

Los recubrimientos antioxidantes (por ejemplo, MoSi_2 , Al_2O_3) mejoran la vida útil de las varillas de molibdeno en entornos oxidantes de alta temperatura.

Método de proceso:

Deposición química de vapor (CVD):

Proceso: A 800-1200 °C, SiCl_4 y CH_4 reaccionan para formar un recubrimiento de MoSi_2 con un espesor de 10-50 μm .

Equipo: Horno CVD con vacío 10^{-1} – 10^{-2} Pa y caudal de gas 50–200 mL/min.

Ventajas: recubrimiento denso y fuerte adherencia (>50 MPa).

Pulverización con plasma:

Proceso: El arco de plasma (potencia de 20 a 50 kW) se rocía con polvo de Al_2O_3 o ZrO_2 con un espesor de 50 a 200 μm .

Equipo: sistema de pulverización atmosférica o de plasma a baja presión con velocidad de movimiento del cañón de 0,1 a 0,5 m/s.

Ventajas: Adecuado para barras de gran tamaño, proceso simple.

Método sol-gel:

Proceso: recubrimiento Sol con SiO_2 o Al_2O_3 y tratamiento térmico a 500-800 °C para formar un recubrimiento de 5-20 μm .

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Ventajas: bajo costo, adecuado para formas complejas.

Detalles del proceso:

Pretratamiento: decapado de barras y arenado (partículas de SiC, 0,1-0,5 mm) para mejorar la adherencia del recubrimiento.

Rendimiento del recubrimiento: temperatura de oxidación del recubrimiento MoSi₂ hasta 1700 °C, recubrimiento de Al₂O₃ excelente resistencia al desgaste.

Inspección: análisis SEM de la microestructura del recubrimiento, método de rayado para probar la adherencia.

Factores que influyen:

Espesor del recubrimiento: demasiado grueso (>100 µm) es fácil de despegar y demasiado delgado tiene un efecto antioxidante deficiente.

Temperatura del sustrato: El sobrecalentamiento del sustrato (>1300 °C) durante la CVD provoca el crecimiento del grano.

Control de atmósfera: La infiltración de oxígeno reduce la calidad del recubrimiento.

Avances tecnológicos:

Recubrimiento compuesto: recubrimiento de doble capa MoSi₂/Al₂O₃, aumento del 50% en la vida útil de oxidación.

Nano recubrimiento: recubrimiento de nano-SiC por deposición de PVD (1-5 µm de espesor) con resistencia a la abrasión y a la oxidación.

Recubrimiento autorreparable: Recubrimiento de MoSi₂ dopado con elementos de tierras raras (por ejemplo, CeO₂) para grietas autorreparables a altas temperaturas.

3.6 Control de calidad y optimización de procesos de varillas de molibdeno

El control de calidad garantiza un rendimiento constante y confiable de las varillas de molibdeno, lo que implica el control de defectos y la optimización de los parámetros del proceso.

3.6.1 Control de defectos en el proceso de producción

Los defectos comunes incluyen grietas, porosidad, inclusiones y oxidación de la superficie, y se controlan mediante:

Calidad de la materia prima:

Se utilizó MoO₃ de alta pureza (≥99,9%) y ICP-MS para detectar impurezas como Fe y C (<50 ppm). El contenido de oxígeno del polvo de molibdeno < 0.005% y la oxidación se evita mediante el almacenamiento de gas inerte.

Defectos de sinterización:

Temperatura de sinterización optimizada (1800-2000 °C) y porosidad reducida (porosidad <2%).

Un horno multizona con una diferencia de temperatura de < 10 °C garantiza una contracción uniforme de la pieza en bruto.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Defectos de procesamiento:

La deformación por forja y laminación < un 30% para evitar microfisuras.

Ensayos no destructivos (END):

Pruebas ultrasónicas: se encontraron > grietas internas de 0,1 mm a una frecuencia de 5-10 MHz.

Inspección por rayos X: Compruebe si hay inclusiones (>0,05 mm) a 100–200 kV.

Defectos superficiales:

El pulido elimina las capas de óxido (0,01-0,05 mm de grosor) y los arañazos.

El medidor de rugosidad superficial detecta $R_a < 1,6 \mu\text{m}$ de acuerdo con ASTM B387.

Tecnología de detección:

Análisis microscópico: análisis SEM y EBSD del tamaño de grano (10-50 μm) y la distribución de defectos.

Análisis químico: GD-MS detecta impurezas con precisión de ppb.

Ensayo mecánico: Máquina de ensayo de tracción (carga de 50 a 200 kN) para ensayar la resistencia a la tracción (>600 MPa).

Factores que influyen:

Estabilidad del proceso: Las fluctuaciones de temperatura y presión conducen a un aumento en las tasas de defectos.

Envejecimiento del equipo: La contaminación de la cámara del horno o el desgaste del molde aumentan las inclusiones.

Especificación de operación: los errores de operación manual deben reducirse mediante capacitación.

Avances tecnológicos:

NDT en línea: Imágenes de ultrasonido en tiempo real, aumento del 20% en la tasa de detección de defectos.

Reconocimiento de defectos con IA: La visión artificial analiza los defectos de la superficie con una tasa de precisión del >95%.

Mantenimiento preventivo: Reduzca el tiempo de inactividad hasta en un 30% mediante la predicción de fallos de equipos con sensores.

3.6.2 Monitorización y optimización de los parámetros del proceso

El monitoreo y la optimización en tiempo real de los parámetros del proceso mejoran la eficiencia de la producción y la calidad del producto. Los métodos incluyen:

Tecnología de vigilancia:

Temperatura: Termopar (tipo K o W-Re) y termómetro infrarrojo con una precisión de $\pm 3^\circ\text{C}$.

Atmósfera: analizador de oxígeno (0-100 ppm) y medidor de punto de rocío ($< -80^\circ\text{C}$).

Presión: piezómetro (10^{-5} – 10^5 Pa) y caudalímetro (0–500 mL/min).

Dimensiones: pinza láser (precisión $\pm 0,001$ mm) y sistema de pesaje en línea.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Adquisición de datos:

El Internet industrial de las cosas (IIoT) recopila datos como la temperatura, la presión y el flujo de aire a una frecuencia de muestreo de 1 Hz.

El sistema SCADA muestra el estado del proceso en tiempo real y el tiempo de respuesta para alarmas anormales < 1 s.

Optimización de parámetros:

Análisis de regresión: Establezca un modelo matemático de temperatura, presión y densidad de palanquilla, y optimice la temperatura de sinterización $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Aprendizaje automático: las redes neuronales predicen las tasas de defectos, ajustan las presiones de prensado y las velocidades de laminación, y reducen las tasas de defectos entre un 5 y un 10 %.

Simulación: CFD simula la distribución del flujo de gas en el horno para optimizar el caudal de hidrógeno y ahorrar entre un 10 y un 15% del gas.

Factores que influyen:

Precisión del sensor: La desviación de temperatura $> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ afecta la estabilidad del proceso.

Calidad de los datos: La interferencia de ruido reduce la precisión del modelo y requiere filtrado.

Compatibilidad de dispositivos: Los dispositivos más antiguos son difíciles de integrar en los sistemas IIoT.

Avances tecnológicos:

Gemelo digital: establezca un modelo digital de todo el proceso de producción de varillas de molibdeno, prediga el rendimiento en tiempo real y optimice la eficiencia entre un 10 y un 15 %.

5G+IIoT: Transmisión de datos de gran ancho de banda, latencia de monitoreo < 10 ms, adecuada para la colaboración entre varias plantas.

Fabricación ecológica: Optimizar los parámetros del proceso para reducir el consumo de energía y las emisiones, y reducir la huella de carbono en un 20%.



Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Capítulo 4 Tipos y especificaciones de varillas de molibdeno

Como producto metálico refractario de alto rendimiento, la varilla de molibdeno puede satisfacer las necesidades específicas de muchos campos, como la industria aeroespacial, electrónica y del vidrio, debido a su diversidad de tipos y especificaciones. Este capítulo clasifica las varillas de molibdeno en detalle desde cuatro aspectos: composición, estado de la superficie, tamaño y forma, y diseño personalizado, y analiza sus características, proceso de preparación, escenarios de aplicación y estándares relacionados.

4.1 Clasificación por composición

Las varillas de molibdeno se pueden dividir en dos categorías: varillas de molibdeno de alta pureza y varillas de molibdeno dopadas según su composición química. Las varillas de molibdeno de alta pureza ocupan una posición importante en la industria electrónica debido a su excelente conductividad eléctrica y térmica, mientras que las varillas de molibdeno dopadas mejoran significativamente el rendimiento a alta temperatura al agregar elementos de aleación, lo que las hace adecuadas para entornos más exigentes.

4.1.1 Varillas de molibdeno de alta pureza (pureza $\geq 99,95\%$)

La varilla de molibdeno de alta pureza se refiere a la barra con un contenido de molibdeno del 99,95% o más, que generalmente se produce mediante un proceso de pulvimetalurgia, y el contenido de elementos de impurezas (como Fe, C, O, N) está estrictamente controlado a nivel de ppm. Los límites típicos de impurezas incluyen: Hierro (Fe) $\leq 0,01\%$, Carbono (C) $\leq 0,005\%$, Oxígeno (O) $\leq 0,003\%$, Nitrógeno (N) $\leq 0,002\%$. El logro de una alta pureza se basa en la materia prima de óxido de molibdeno (MoO_3 , $\geq 99,99\%$) de alta pureza y en los procesos de reducción de vacío/hidrógeno para garantizar excelentes propiedades físicas y químicas de las barras.

Característica:

Propiedades físicas: La densidad de la varilla de molibdeno de alta pureza está cerca del valor teórico ($10,28 \text{ g/cm}^3$), el punto de fusión es de 2623°C , la conductividad térmica es de $138 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (20°C) y el coeficiente de expansión térmica es de $4,8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ($20\text{-}1000^\circ\text{C}$).

Propiedades eléctricas: resistividad $5,2 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ (20°C), alta conductividad, adecuado para electrodos y piezas conductoras.

Propiedades mecánicas: la resistencia a la tracción a temperatura ambiente es de aproximadamente $600\text{-}800 \text{ MPa}$, el alargamiento es del $10\text{-}20\%$ y la ductilidad mejora significativamente a alta temperatura ($>1000^\circ\text{C}$).

Estabilidad química: Es resistente a la corrosión ácida y alcalina a temperatura ambiente, pero es fácil generar MoO_3 volátil en una atmósfera oxidante a alta temperatura ($>600^\circ\text{C}$), que debe protegerse al vacío o en atmósfera inerte.

Proceso de preparación:

Materias primas: El polvo de molibdeno (pureza $\geq 99,95\%$, tamaño de partícula $1\text{-}5 \mu\text{m}$) se preparó mediante reducción de hidrógeno en varias etapas utilizando MoO_3 de ultra alta pureza.

Conformado y sinterización: prensado isostático en frío ($100\text{-}400 \text{ MPa}$), conformado al vacío (1800-

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

2200 °C) para obtener piezas en bruto de alta densidad (densidad > 90% del valor teórico).

Procesamiento: Forjado en caliente (1200-1600 °C) o laminado (1000-1400 °C) en barras, la superficie se puede pulir a $Ra < 0,2 \mu m$.

Control de calidad: las impurezas son detectadas por ICP-MS, los defectos internos son detectados por ultrasonidos y el medidor de rugosidad de la superficie garantiza el acabado.

Aplicar:

Electrónica y semiconductores: Como objetivos de pulverización catódica, películas delgadas para circuitos integrados, células solares y pantallas planas. La alta pureza garantiza la calidad de la película y el acabado de la superficie reduce las tasas de defectos.

Tubos de vacío y fuentes de iones: utilizados como materiales de electrodos, son superiores a otros metales debido a su alta conductividad y bajo trabajo de electrones (alrededor de 4,6 eV).

Equipo experimental de alta temperatura: utilizado como varilla de soporte o electrodo en un horno de alta temperatura en el laboratorio, con resistencia a altas temperaturas y estabilidad química para satisfacer las necesidades de la investigación científica.

Estándar:

Internacional: ASTM B387-18, que especifica la composición química, las propiedades mecánicas y las tolerancias dimensionales de las varillas de molibdeno de alta pureza.

Doméstico: GB/T 3462-2017, pureza $\geq 99.95\%$, contenido de impurezas en línea con los estándares de la industria electrónica.

Desafíos técnicos:

El control del contenido de oxígeno requiere hidrógeno de ultra alta pureza (punto de rocío $< -60^\circ C$) y un entorno de vacío ($< 10^{-4} Pa$).

La resistencia a la fluencia de la varilla de molibdeno de alta pureza es débil a alta temperatura, lo que limita su aplicación bajo una carga de alta temperatura a largo plazo.

4.1.2 Varillas de molibdeno dopado (TZM, Mo-La, Mo-W, etc.)

Las varillas de molibdeno dopado forman aleaciones a base de molibdeno mediante la adición de oligoelementos o aleaciones, que mejoran significativamente la resistencia a altas temperaturas, la resistencia a la fluencia y la resistencia a la oxidación. Los tipos comunes incluyen TZM (titanio-circonio-molibdeno), Mo-La (molibdeno-lantano), Mo-W (molibdeno-tungsteno), etc.

Varillas de molibdeno TZM:

Composición: 0,4–0,55% Ti, 0,06–0,12% Zr, 0,01–0,04% C, con un equilibrio de Mo.

Característica:

A través del fortalecimiento de la solución y la resistencia a la precipitación de carburo (TiC, ZrC), la resistencia a la tracción alcanza los 1100 MPa (20 °C), y la resistencia a la tracción a alta temperatura (1500 °C) es de aproximadamente 400 MPa, que es mucho mejor que el molibdeno puro.

La tasa de fluencia es baja, por ejemplo, alrededor de $10^{-6}/h$ a 1200°C a 50 MPa.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

La conductividad térmica es ligeramente inferior a la del molibdeno puro (unos 120 W/m·K), y el coeficiente de expansión térmica es similar ($5,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$).

La resistencia a la oxidación es ligeramente mejor que la del molibdeno puro, pero aún así debe usarse a $<600^{\circ}\text{C}$ o en una atmósfera protectora.

Preparación:

Polvo de molibdeno mezclado con polvo de Ti, Zr, C (molino planetario, 200-400 rpm), formación por prensa isostática en frío, sinterización protegida con hidrógeno ($1800-2100^{\circ}\text{C}$).

El trabajo en caliente (forja de 1400 a 1700°C , laminación de 1200 a 1500°C) es más difícil debido al aumento de la dureza (HV 270-300).

Aplicar:

Aeroespacial: Piezas estructurales de alta temperatura (por ejemplo, toberas de motores a reacción) debido a su alta resistencia y baja densidad ($10,16 \text{ g/cm}^3$).

Horno de alta temperatura: elemento calefactor y varilla de soporte, resistente a 1800°C para uso a largo plazo.

Fabricación de moldes: molde de extrusión en caliente, resistente al desgaste a alta temperatura.

Cañas de molibdeno Mo-La:

Composición: $0,3-1,0\%$ La_2O_3 (óxido de lantano) con una cantidad residual de Mo.

Característica:

La dispersión de La_2O_3 fortalece el refinamiento del grano ($10-20 \mu\text{m}$) y aumenta la resistencia del límite del grano con un alargamiento del 25% (20°C).

La resistencia a la oxidación a alta temperatura es mejor que la del molibdeno puro, y la tasa de oxidación es de aproximadamente $0,05 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ a 800°C .

Excelente resistencia a la fluencia, tasa de fluencia inferior a $10^{-6}/\text{h}$ a 1500°C .

La conductividad térmica es de aproximadamente $130 \text{ W / m} \cdot \text{K}$, lo que es adecuado para piezas conductoras térmicas de alta temperatura.

Preparación:

El polvo de molibdeno se dopó con líquido en polvo de La_2O_3 (pH 7-8) y se secó por aspersión para preparar el polvo compuesto.

Sinterización al vacío ($1900-2200^{\circ}\text{C}$), trabajo en caliente (forja $1300-1600^{\circ}\text{C}$).

El pulido de superficies o los recubrimientos (por ejemplo, MoSi_2) mejoran aún más el rendimiento.

Aplicar:

Horno de alta temperatura: Elementos calefactores y pantallas calientes utilizados a altas temperaturas a largo plazo ($>1500^{\circ}\text{C}$).

Industria del vidrio: electrodos fundidos, resistentes a la corrosión a alta temperatura.

Investigación científica: dispositivo experimental de alta temperatura, teniendo en cuenta la tenacidad y la resistencia.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Varillas de molibdeno Mo-W:

Composición: 5–30% W (tungsteno) con un equilibrio de Mo.

Característica:

La adición de tungsteno aumenta el punto de fusión (cerca de 3422 °C) y la resistencia, y la resistencia a la tracción puede alcanzar los 1200 MPa (20 °C).

La conductividad térmica disminuye (alrededor de 100-120 W/m·K) y la resistividad aumenta ($6-8 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$).

Mejor resistencia a la corrosión que el molibdeno puro, adecuado para ambientes ácidos o de sales fundidas.

Preparación:

El polvo de molibdeno se alea mecánicamente con polvo de tungsteno, se prensa y se forma y luego se sinteriza al vacío (2000-2300 °C).

Forja a alta temperatura (1500-1800 °C) o trefilado (1000-1400 °C).

Aplicar:

Industria nuclear: componentes de reactores de alta temperatura debido a su alto punto de fusión y resistencia a la radiación.

Electrodos especiales: Electrodos resistentes a la corrosión para entornos químicos hostiles.

Comparar:

TZM: La mejor resistencia a altas temperaturas y resistencia a la fluencia, adecuada para la industria aeroespacial.

Mo-La: Excelente resistencia a la oxidación y ductilidad, adecuado para hornos de alta temperatura y la industria del vidrio.

Mo-W: Excelente punto de fusión y resistencia a la corrosión, adecuado para la industria nuclear y entornos especiales.

Estándar:

ASTM B387-18: Especifica la composición, las propiedades mecánicas y las tolerancias de TZM y Mo-La.

GB/T 4188-2015: Estándar de barra TZM, los límites de impurezas y elementos dopantes son claros.

Desafíos técnicos:

La uniformidad de la distribución de los elementos dopados debe controlarse con precisión para evitar la segregación.

Las barras de aleación son difíciles de procesar y requieren equipos de alta temperatura y procesos optimizados.

4.2 Clasificación por estado de superficie

El estado de la superficie de la varilla de molibdeno tiene un impacto importante en su rendimiento y aplicación, y se puede dividir en varilla de molibdeno negro, varilla de molibdeno pulido y varilla

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

de molibdeno limpia de acuerdo con la tecnología de procesamiento y los requisitos de uso.

4.2.1 Varillas de molibdeno negro

La varilla de molibdeno negro se refiere a una barra que no ha sido pulida ni tratada químicamente, y la superficie retiene la capa de óxido después del trabajo en caliente (forjado, laminado), que es de color negro o gris oscuro. La rugosidad de la superficie suele ser de Ra 3,2-6,4 μm .

Característica:

Superficie: Espesor de capa de óxido de molibdeno ($\text{MoO}_2/\text{MoO}_3$) de 0,01 a 0,05 mm, lo que reduce ligeramente la resistencia a la corrosión, pero no tiene un efecto significativo en entornos no oxidantes (por ejemplo, vacío).

Rendimiento: Las propiedades mecánicas son las mismas que las de las varillas pulidas, pero los defectos de la superficie, como las microfisuras, pueden afectar la vida útil a la fatiga.

Costo: Bajos costos de producción ya que no se requiere tratamiento superficial adicional.

Preparación:

La palanquilla sinterizada se forma por forja en caliente (1200-1600 $^{\circ}\text{C}$) o laminación (1000-1400 $^{\circ}\text{C}$) y se enfría directamente para formar varillas negras.

La capa superficial de óxido se forma reaccionando con trazas de oxígeno durante el procesamiento a alta temperatura, y el espesor se puede reducir controlando la atmósfera (hidrógeno o vacío).

Aplicar:

Horno de alta temperatura: Como varilla de soporte o elemento calefactor, la capa de óxido de la superficie no afecta el rendimiento bajo vacío o atmósfera inerte.

Desbaste: como producto semielaborado para su posterior pulido o mecanizado.

Áreas sensibles al costo: como la sinterización de cerámica, se prefieren las varillas de molibdeno negro para reducir costos.

Estándar:

ASTM B387-18: La superficie de la varilla de molibdeno negro permite una ligera oxidación con rugosidad $\text{Ra} \leq 6,4 \mu\text{m}$.

GB/T 3462-2017: Sin defectos graves como grietas e inclusión de escoria en la superficie.

Desafíos técnicos:

La capa superficial de óxido puede liberar gas MoO_3 en algunas aplicaciones y contaminar el medio ambiente.

Las superficies rugosas reducen la resistencia a la corrosión y es necesario evaluar el entorno de uso.

4.2.2 Pulido de varillas de molibdeno

Las varillas de molibdeno pulido mecánicamente o electrolíticamente y tienen un alto acabado superficial, generalmente Ra 0,1-0,8 μm , con un brillo metálico blanco plateado.

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Rods Introduction

1. Overview of Molybdenum Rods

Molybdenum rods are high-performance metal materials made from high-purity molybdenum powder through pressing, sintering, forging, and drawing processes. They possess excellent high-temperature performance, thermal conductivity, and chemical stability. These rods are widely used in advanced technological fields such as metallurgy, electronics, glass, aerospace, and nuclear energy, making them one of the key functional materials in modern industrial high-temperature environments.

2. Main Application Fields of Molybdenum Rods

- Heating elements and support rods for high-temperature electric furnaces
- Diffusion tubes and wafer carriers in the semiconductor industry
- Electrodes and targets for vacuum coating equipment
- High-temperature components in nuclear reactors and aircraft engines
- Electrode rods and heat-resistant fixtures in the glass industry
- Medical devices and X-ray targets
- High-temperature experimental materials and components in scientific research

3. Classification of Molybdenum Rods (by purity)

Category	Description	Typical Applications
High-Purity Moly Rods	Purity $\geq 99.95\%$, extremely low impurity levels	Electronics, semiconductors, research equipment
Industrial-Grade Rods	Purity around 99.90%, cost-effective	Electric heating, glass, metallurgical equipment
Doped Moly Rods	Doped with La, Ti, Zr, etc., for enhanced performance	High-temperature structural parts, TZM alloy applications

4. Typical Specifications of Molybdenum Rods from CTIA GROUP LTD

Item	Value Range
Density	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$
Hardness (HV30)	160 – 250 HV
Tensile Strength (Rm/MPa)	$\geq 590 \text{ MPa}$
Yield Strength (Rp0.2/MPa)	$\geq 490 \text{ MPa}$
Elongation after fracture (A/%)	10–25%
Diameter Range	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$, Customizable
Length Range	10 mm – 2000 mm, Customizable

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com
Phone: +86 592 5129595; 592 5129696
Website: www.molybdenum.com.cn

Característica:

Superficie: sin capa de óxido, muy pocos defectos microscópicos (arañazos, grietas), la resistencia a la corrosión es mejor que la varilla de molibdeno negro.

Rendimiento: Conductividad eléctrica y térmica ligeramente mejorada (debido a la reducción de defectos superficiales) para aplicaciones de alta precisión.

Estética: Las superficies lisas mejoran la apariencia para satisfacer las necesidades de las industrias electrónica y óptica.

Preparación:

Pulido mecánico: desbaste con muela abrasiva de carburo de silicio (malla 60-800) y pulido fino con pasta de pulido de diamante (0,5-1 μm) a 1000-3000 rpm.

Electropulido: Pulido en electrolito de ácido fosfórico-ácido sulfúrico (pH 2-3) con una densidad de corriente de 0,5-2 A/cm², pulido durante 5-10 minutos, Ra < 0,1 μm .

Limpieza: Limpieza ultrasónica (40 kHz, agua desionizada) para eliminar los residuos de pulido, secado con nitrógeno para evitar la oxidación.

Aplicar:

Semiconductores: Objetivos y electrodos de pulverización catódica que requieren un alto acabado y una baja tasa de defectos.

Equipos ópticos: Varillas de soporte o piezas reflectantes con superficies lisas que reducen la dispersión de la luz.

Médico: Los objetivos de tubo de rayos X con alta pureza y acabado garantizan la calidad de la imagen.

Estándar:

ASTM B387-18: Rugosidad de la varilla de molibdeno pulido Ra $\leq$ 0,8 μm sin arañazos visibles.

GB/T 3462-2017: El acabado superficial cumple con los requisitos de la industria electrónica.

Desafíos técnicos:

El proceso de pulido puede introducir trazas de contaminación abrasiva y requiere una limpieza estricta.

El alto acabado aumenta los costos de producción y requiere un compromiso entre las necesidades de la aplicación.

4.2.3 Limpieza de varillas de molibdeno

Las varillas de molibdeno de limpieza son varillas que se limpian químicamente para eliminar los óxidos, aceites e impurezas de la superficie, con una condición superficial entre varillas negras y varillas pulidas, y una rugosidad típicamente Ra de 1,6 a 3,2 μm .

Característica:

Superficie: sin capa de óxido y contaminantes orgánicos, blanquecino, la resistencia a la corrosión es mejor que la varilla de molibdeno negro.

Rendimiento: Cercano a las varillas de pulido, pero con defectos superficiales más microscópicos,

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

adecuado para aplicaciones de precisión media.

Costo: más bajo que las varillas pulidas, más alto que las varillas de molibdeno negro.

Preparación:

Decapado: Mezcla de ácido nítrico-ácido sulfúrico ($\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4=1:3$, 10-20%), remojada durante 5-15 minutos, 20-40°C, para eliminar la capa de óxido.

Lavado cáustico: solución de NaOH al 5-10%, 50-70 °C, remojar durante 3-10 minutos para eliminar el aceite.

Limpieza ultrasónica: agua desionizada más detergente neutro (0,1-0,5%), 40 kHz, 5-10 minutos.

Secado: Secado al vacío o con aire caliente (80-100 °C), el envasado con nitrógeno evita la oxidación secundaria.

Aplicar:

Industria del vidrio: fusión de electrodos, limpieza de superficies para reducir la contaminación por impurezas.

Horno de alta temperatura: varilla de soporte, resistencia a la corrosión para cumplir con los requisitos de atmósfera inerte.

Pretratamiento: como producto intermedio para el pulido de varillas, procesamiento posterior.

Estándar:

ASTM B387-18: Limpieza de la superficie de la varilla de molibdeno sin óxidos, rugosidad $Ra \leq 3,2 \mu\text{m}$.

GB/T 3462-2017: Sin productos químicos residuales en la superficie.

Desafíos técnicos:

El líquido residual del decapado debe neutralizarse (pH 6,5-7,5) para cumplir con los requisitos ambientales.

Una limpieza incompleta puede dejar trazas de contaminantes y afectar el rendimiento.

4.3 Clasificación por tamaño y forma

Las varillas de molibdeno están disponibles en tamaños y formas adaptadas a la aplicación, incluidas varillas redondas, cuadradas, perfiladas y micro a grandes.

4.3.1 Varillas redondas de molibdeno

Las varillas redondas de molibdeno son la forma más común de varillas de molibdeno, con un diámetro que varía de 0,5 mm a 100 mm y, por lo general, en longitudes de 100 mm a 3000 mm.

Característica:

Precisión dimensional: Tolerancia de diámetro $\pm 0,01-0,1 \text{ mm}$, tolerancia de longitud $\pm 1-5 \text{ mm}$ para aplicaciones de alta precisión.

Propiedades mecánicas: orientación constante del grano a lo largo de la dirección axial, resistencia a la tracción uniforme.

Procesabilidad: Fácil de torneear, perforar y soldar, adecuado para la fabricación de componentes

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

complejos.

Preparación:

Diámetro pequeño (<5 mm): Proceso de embutición (800–1200 °C) con una precisión de molde de $\pm 0,001$ mm.

Diámetro medio (5-20 mm): laminado en caliente (1000-1400 °C), medición de diámetro en línea para garantizar las tolerancias.

Gran diámetro (>20 mm): forja en caliente (1200–1600 °C), deformación multipasada.

Aplicar:

Electrónica: electrodos y objetivos de pulverización catódica, generalmente con diámetros de 5 a 20 mm.

Horno de alta temperatura: elementos calefactores y varillas de soporte de 20 a 50 mm de diámetro.

Aeroespacial: Piezas estructurales, 50-100 mm de diámetro, alta resistencia.

Estándar:

ASTM B387-18: Tolerancias de diámetro $\pm 0,05$ mm (<10 mm), $\pm 0,1$ mm (>10 mm).

GB/T 3462-2017: Desviación de redondez <0,02 mm.

Desafíos técnicos:

Las barras de diámetro pequeño son propensas a romperse y deben optimizarse para velocidades de estirado (0,1-1 m/s).

La forja de barras de gran diámetro requiere equipos de alta temperatura y es costosa.

4.3.2 Varillas de molibdeno cuadradas y otras de formas especiales

Las varillas de molibdeno cuadradas y las varillas de molibdeno de formas especiales (por ejemplo, rectangulares, hexagonales) se utilizan en estructuras o moldes especiales, generalmente con una longitud lateral o un tamaño de sección transversal de 5 a 50 mm y una longitud de 100 a 2000 mm.

Característica:

Precisión geométrica: tolerancia de longitud de borde $\pm 0,05$ -0,2 mm, rectitud de borde < 0,1 mm/m.

Rendimiento: Las propiedades mecánicas son similares a las de las barras redondas, pero la dificultad de procesamiento aumenta.

Aplicabilidad: Diseño de forma especial para cumplir con requisitos funcionales o de instalación complejos.

Preparación:

Conformado: El prensado isostático en frío utiliza moldes de formas especiales, y la pieza en bruto está cerca de la forma final después de la sinterización.

Mecanizado: forja en caliente (1200-1600 °C) o mecanizado (tornos CNC, velocidad de corte de 10-50 m/min).

Tratamiento de la superficie: pulido o limpio, rugosidad Ra 0,8–3,2 μ m.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Aplicar:

Fabricación de moldes: la varilla cuadrada de molibdeno se utiliza para la matriz de extrusión en caliente, que es resistente al desgaste a alta temperatura.

Horno de alta temperatura: Varilla de soporte de forma especial para optimizar la distribución del campo térmico.

Investigación: Formas personalizadas para satisfacer las necesidades de las configuraciones experimentales.

Estándar:

ASTM B387-18: Tolerancia de la sección transversal de la barra de perfil $\pm 0,1$ mm.

GB/T 3462-2017: No hay grietas en el borde y la calidad de la superficie es la misma que la de una barra redonda.

Desafíos técnicos:

El diseño de moldes de formas especiales es complejo y el costo de fabricación es alto.

El mecanizado es propenso a la concentración de tensiones y es necesario optimizar los datos de corte.

4.3.3 Micro varillas de molibdeno y varillas grandes de molibdeno

Varillas de micromolibdeno: diámetro <1 mm, longitud 10–500 mm.

Características: Alta precisión (tolerancia de diámetro $\pm 0,005$ mm), acabado superficial $Ra < 0,1$ μm , adecuado para microelectrónica e instrumentos de precisión.

Preparación: embutición ultrafina (600-1000 °C) con moldes de nanodiamante, recocido múltiple (800-1000 °C).

Aplicar:

Microelectrónica: electrodos y sondas de 0,1 a 0,5 mm de diámetro.

Médico: componentes de tubos de rayos X, se requiere alta pureza y precisión.

Desafío: Alta tasa de rotura por extracción, control preciso de la velocidad (0,05-0,5 m/s) y la lubricación (MoS_2).

Varillas de molibdeno grandes: diámetro > 50 mm, longitud 500–3000 mm.

Características: Alta resistencia (resistencia a la tracción > 800 MPa), densidad > 9,7 g/cm³, adecuado para aplicaciones pesadas.

Preparación: Forja de gran tonelaje (2000-5000 t, 1400-1700 °C), sinterización al vacío (> 2200 °C) para garantizar que no haya porosidad interna.

Aplicar:

Aeroespacial: Piezas estructurales de alta temperatura, como toberas de cohetes.

Industria del vidrio: electrodos grandes, resistentes a la corrosión a alta temperatura.

Desafío: El equipo de forja es exigente y el tamaño de grano (>50 μm) es difícil de controlar.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Estándar:

ASTM B387-18: Tolerancia $\pm 0,01$ mm para micro varillas y $0,2$ mm $\pm$ para varillas grandes.

GB/T 3462-2017: Los defectos internos se comprueban por ultrasonidos ($<0,1$ mm).

Avances tecnológicos:

Micro sticks: tracción asistida por láser, un 20% más de precisión.

Varillas grandes: forja isotérmica (1500°C), uniformidad del grano aumentada en un 15%.

4.4 Diseño personalizado de varilla de molibdeno

Las varillas de molibdeno personalizadas se diseñan de acuerdo con las necesidades específicas del cliente e implican la optimización de la composición, el tamaño, la condición de la superficie y el rendimiento. El análisis de la demanda del cliente es el punto de partida para la personalización, asegurando que el producto cumpla con el escenario de la aplicación.

4.4.1 Análisis de la demanda de los clientes

El análisis de la demanda del cliente es el paso central del diseño personalizado, que implica la comunicación técnica con los clientes, la evaluación del escenario de la aplicación y los requisitos de rendimiento. Este es el proceso detallado:

Recopilación de requisitos:

Escenario de aplicación: El cliente necesita conocer el entorno en el que se utilizará la varilla de molibdeno, como el horno de alta temperatura ($1500-1800^{\circ}\text{C}$, vacío/hidrógeno), la pulverización catódica de semiconductores (alta pureza, $R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m}$) o aeroespacial (resistencia a la tracción $> 1000\text{ MPa}$).

Requisitos de rendimiento: incluidas las propiedades mecánicas (resistencia, tenacidad), las propiedades térmicas (conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica), las propiedades eléctricas (resistividad) y las propiedades químicas (resistencia a la oxidación, resistencia a la corrosión).

Tamaño y forma: diámetro, longitud, forma de la sección transversal (por ejemplo, círculo, cuadrado) y requisitos de tolerancia. Por ejemplo, las varillas para microelectrónica tienen un diámetro $< 0,5$ mm y una tolerancia $\pm 0,005$ mm.

Estado de la superficie: negro, pulido o barra de limpieza, requisitos de rugosidad (por ejemplo, $R_a < 0,2\text{ }\mu\text{m}$).

Cantidad y tiempo de entrega: lote ($10-1000$ piezas) o producción de prueba de lote pequeño, tiempo de entrega ($2-12$ semanas).

Evaluación técnica:

Selección de materiales: Elija molibdeno de alta pureza o aleación dopada según sus necesidades. Por ejemplo, varillas de Mo-La para hornos de alta temperatura y varillas de molibdeno de alta pureza para semiconductores.

Viabilidad del proceso: Evalúe si el proceso de producción (por ejemplo, estirado, forjado, sinterización) cumple con los requisitos dimensionales y de rendimiento. Por ejemplo, las microvarillas deben estirarse ultrafinamente y las varillas grandes deben forjarse en un gran tonelaje.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Cumplimiento de estándares: Asegúrese de que los productos cumplan con ASTM B387, GB/T 3462 o estándares especificados por el cliente.

Análisis de costos: Sopesa el impacto en los costos de la alta pureza, las formas complejas o los tratamientos superficiales especiales para proporcionar una solución rentable.

Comunicación y Reconocimiento:

Propuesta técnica: Presentar la propuesta de diseño al cliente, incluyendo la composición, el tamaño, el tratamiento de la superficie y los parámetros de rendimiento.

Producción de prueba de muestras: producción de muestras en lotes pequeños, comentarios del cliente después de la prueba (como propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión).

Firma de contratos: Clarificar los plazos de entrega, los estándares de calidad y los procesos de aceptación.

Desafíos técnicos:

Los requisitos complejos, como las cañas ultraminiatura o extra grandes, requieren equipos personalizados, lo que aumenta los costos.

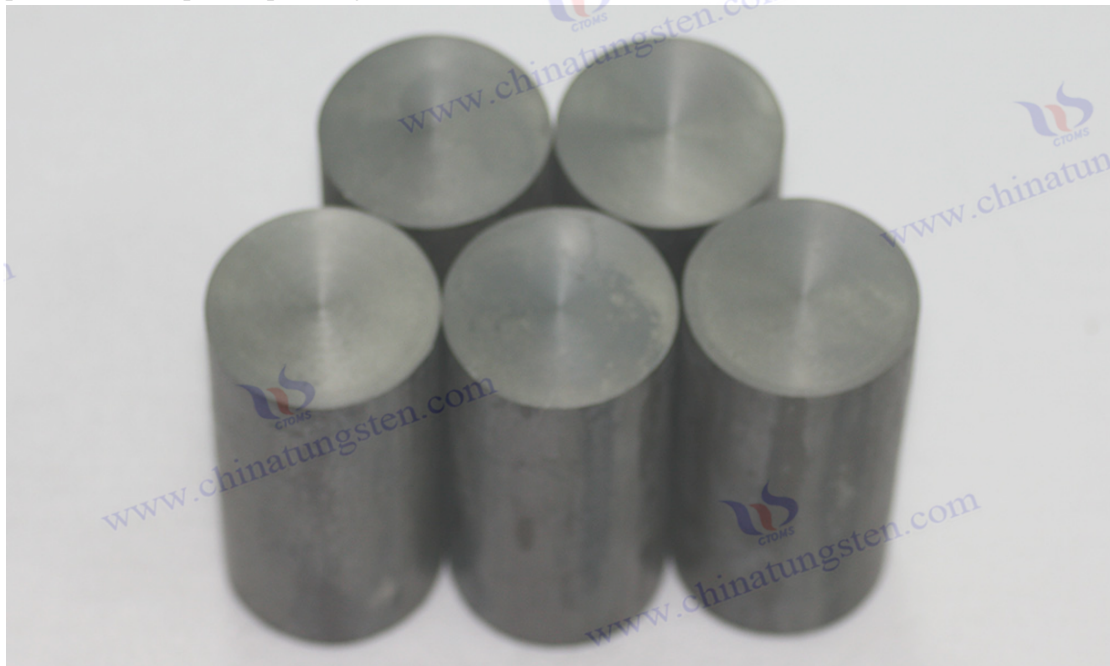
Los requisitos del cliente en cuanto al rendimiento (por ejemplo, resistencia a la oxidación) pueden superar las tecnologías existentes, lo que requiere el desarrollo de nuevos procesos (por ejemplo, nanorrecubrimientos).

Avances tecnológicos:

Diseño digital: el software CAD/CAE se utiliza para simular el rendimiento de las varillas de molibdeno, y el ciclo de diseño optimizado se acorta en un 30%.

Prototipado rápido: impresión 3D de polvo de molibdeno, reduciendo el ciclo de producción de prueba en un 50%.

Colaboración con el cliente: La plataforma en línea realiza un seguimiento del progreso de los pedidos en tiempo real para mejorar la eficiencia de la comunicación.



Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Capítulo 5 Pruebas de rendimiento y evaluación de varillas de molibdeno

Como material metálico refractario de alto rendimiento, las pruebas y evaluaciones de rendimiento de la varilla de molibdeno son un enlace clave para garantizar su aplicación confiable en campos de alta demanda como la industria aeroespacial, electrónica y del vidrio. En este capítulo se analizan en detalle los métodos de ensayo y las técnicas de evaluación de las varillas de molibdeno desde cinco aspectos: propiedades mecánicas, propiedades a alta temperatura, microestructura, propiedades químicas y análisis de fallos. A través de procesos de prueba sistemáticos y métodos de análisis avanzados, el comportamiento mecánico, la estabilidad a alta temperatura, las características de la microestructura y la estabilidad química de las varillas de molibdeno se pueden revelar por completo, proporcionando una base científica para la optimización de materiales, el control de calidad y la predicción de la vida útil. Estas pruebas no solo verifican el rendimiento de las varillas de molibdeno, sino que también brindan soporte técnico para satisfacer las necesidades específicas de la aplicación.

5.1 Ensayo de las propiedades mecánicas de las varillas de molibdeno

La prueba de propiedades mecánicas es el medio central para evaluar el rendimiento de las varillas de molibdeno en condiciones de tensión, cubriendo las pruebas de tracción, compresión, flexión y cizallamiento. Estas pruebas revelan la resistencia, tenacidad y capacidad de deformación de las varillas de molibdeno, y proporcionan datos de apoyo para sus aplicaciones en piezas estructurales, materiales de electrodos y otros campos. Por lo general, las pruebas se realizan en condiciones estandarizadas, combinadas con equipos de prueba avanzados y técnicas de análisis de datos para garantizar resultados precisos y repetibles.

5.1.1 Ensayo de tracción de varillas de molibdeno

La prueba de tracción es el método principal para evaluar la resistencia a la tracción, el límite elástico y la ductilidad de las varillas de molibdeno, y se usa ampliamente en el control de calidad y la verificación del rendimiento. Los ensayos de tracción miden el comportamiento de deformación de las varillas de molibdeno bajo fuerza mediante la aplicación de una fuerza de tracción axial hasta que se produce la fractura. Para las pruebas se suelen utilizar máquinas de ensayo universales, equipadas con galgas extensométricas y mordazas de alta precisión para garantizar que la muestra se fuerce uniformemente. Por lo general, las muestras se procesan de forma cilíndrica y la superficie se pule para eliminar los efectos de las microfisuras o los defectos de la superficie. El entorno de prueba puede ser a temperatura ambiente o a alta temperatura para simular las condiciones de uso del mundo real, como hornos de alta temperatura o componentes aeroespaciales.

Durante el proceso de tracción, el probador registra una curva de tensión-deformación que refleja la fase elástica, la fase de deformación plástica y el comportamiento de fractura del material. Las varillas de molibdeno de alta pureza exhiben una alta resistencia a temperatura ambiente pero tienen una tenacidad limitada, mientras que las varillas de molibdeno dopadas (como TZM) mejoran significativamente la resistencia y la resistencia a la fractura al agregar elementos de aleación. A altas temperaturas, la ductilidad de las varillas de molibdeno aumenta significativamente, pero la resistencia disminuye, por lo que debe probarse en vacío o en atmósfera inerte para evitar la

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

interferencia de la oxidación. Después de la fractura, la morfología de la fractura se puede observar a través de un microscopio óptico para determinar si se trata de una fractura dúctil (manifestada como un hoyuelo) o una fractura frágil (manifestada como un plano de clivaje), para analizar los defectos microscópicos o el estado de procesamiento del material.

Los factores que afectan las propiedades de tracción incluyen la composición del material, el tamaño de grano, la tecnología de procesamiento y el entorno de prueba. Por ejemplo, una estructura de grano fino puede aumentar la resistencia, mientras que un grano demasiado grande puede provocar una fractura frágil. Las tensiones residuales introducidas durante el mecanizado también pueden afectar a los resultados de la prueba y deben eliminarse mediante recocido. En los últimos años, los avances tecnológicos han mejorado significativamente la precisión de las pruebas de tracción. Por ejemplo, las pruebas de tracción in situ combinadas con la microscopía electrónica de barrido pueden observar el inicio y la propagación de las grietas en tiempo real. La tecnología de correlación de imágenes digitales proporciona un análisis de deformación más preciso al registrar la distribución de la deformación con una cámara de alta resolución. La aplicación de estas técnicas permite que los ensayos de tracción vayan más allá de las propiedades macroscópicas para revelar mecanismos microscópicos.

5.1.2 Ensayo de compresión de varillas de molibdeno

Las pruebas de compresión se utilizan para evaluar la resistencia a la compresión y la deformación plástica de las varillas de molibdeno bajo presión, especialmente para el diseño de piezas estructurales de alta temperatura, como boquillas aeroespaciales o varillas de soporte de hornos de alta temperatura. Las pruebas de compresión miden el comportamiento de deformación y el límite de falla de una muestra mediante la aplicación de presión en ambos extremos. El equipo de prueba suele ser una máquina de prueba hidráulica equipada con un sensor de desplazamiento de alta precisión que garantiza que se registren pequeñas deformaciones. La muestra se procesa en forma cilíndrica, con una cara final plana para evitar tensiones desiguales, y se aplica un lubricante (por ejemplo, grafito) a la superficie para reducir los efectos de fricción.

Durante las pruebas de compresión, las muestras pueden ceder o deformarse plásticamente, o deformarse en el barril, según el tipo de material y las condiciones de la prueba. La varilla de molibdeno de alta pureza tiene una alta resistencia a la compresión a temperatura ambiente, pero la plasticidad mejora a alta temperatura y es propensa a grandes deformaciones. Las varillas de molibdeno dopado (por ejemplo, Mo-La) se fortalecen por dispersión para mejorar su capacidad de compresión, especialmente a altas temperaturas. Una vez completada la prueba, la sección de compresión se puede analizar a través de un microscopio para observar la deformación del grano, la distribución de grietas y los defectos microscópicos, y juzgar el rendimiento de compresión del material.

Los factores que afectan el rendimiento de la compresión incluyen la fricción de la cara del extremo, la temperatura y la velocidad de carga. La alta fricción puede provocar una deformación desigual de la muestra y afectar a los resultados de la prueba, por lo que la elección del lubricante y la uniformidad de la aplicación son cruciales. Las pruebas de alta temperatura se realizan en vacío para evitar la interferencia de oxidación. Los avances tecnológicos en los últimos años incluyen el

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

desarrollo de accesorios de compresión de alta temperatura capaces de realizar pruebas a temperaturas más altas, así como la aplicación de pruebas de microcompresión para la evaluación del rendimiento de varillas de micromolibdeno. Además, el software de simulación de elementos finitos se usa ampliamente para predecir el comportamiento de la deformación por compresión, lo que ayuda a optimizar las condiciones de prueba y el diseño de la muestra.

5.1.3 Ensayos de flexión y cizallamiento

Las pruebas de flexión y cizallamiento evalúan la resistencia a la flexión y al cizallamiento de las varillas de molibdeno en condiciones de tensión complejas, y son adecuadas para aplicaciones como varillas de soporte de hornos de alta temperatura o materiales de moldes. Las pruebas de flexión generalmente utilizan un método de flexión de tres o cuatro puntos para medir la resistencia a la flexión y la deflexión de una muestra mediante la aplicación de una carga vertical. El equipo de prueba es una máquina especial de prueba de flexión, y la muestra se procesa en una sección transversal rectangular o circular, y la superficie se pule para reducir el impacto de los defectos. Durante la prueba, se registró la curva de fuerza-deflexión y se observó la ubicación de inicio de la grieta y la morfología de la fractura para evaluar el comportamiento a flexión del material.

La prueba de cizallamiento mide la resistencia al cizallamiento de la varilla de molibdeno mediante la aplicación de una carga lateral, generalmente utilizando un dispositivo de cizallamiento especial. La muestra debe ser transversal y el espacio de corte se controla con precisión para evitar tensiones adicionales. Las varillas de molibdeno dopadas, como TZM, generalmente exhiben una mayor resistencia al cizallamiento que las varillas de molibdeno de alta pureza debido al fortalecimiento del límite de grano. Los resultados de las pruebas están influenciados por la geometría de la muestra, la condición de la superficie y la velocidad de carga, y las condiciones de la prueba deben controlarse estrictamente para garantizar la consistencia.

Los factores que afectan el rendimiento de flexión y cizallamiento incluyen la relación de envergadura, los defectos de la superficie y la temperatura de la prueba. Si el tramo es demasiado pequeño, puede introducir un efecto de cizallamiento y reducir la resistencia a la flexión. Las altas temperaturas reducen significativamente la resistencia pero mejoran la tenacidad. Los avances tecnológicos incluyen el uso generalizado de la prueba de flexión de cuatro puntos, que es más uniforme y los resultados de la prueba más confiables; La tecnología de imágenes de rayos X in situ permite el monitoreo en tiempo real de la propagación de grietas, proporcionando un análisis de fallas más detallado. Además, la introducción de sistemas de prueba automatizados ha mejorado la eficiencia de la adquisición de datos y la precisión de las pruebas.

5.2 Prueba de rendimiento a alta temperatura de varillas de molibdeno

Las pruebas de rendimiento a alta temperatura son la clave para evaluar el rendimiento de las varillas de molibdeno a temperaturas extremas, que involucran fluencia, fatiga térmica y resistencia a la oxidación, lo que está directamente relacionado con su confiabilidad de aplicación en hornos de alta temperatura, aeroespacial y otros campos. Estas pruebas generalmente se realizan en vacío o atmósfera inerte para evitar la interferencia de oxidación.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Rods Introduction

1. Overview of Molybdenum Rods

Molybdenum rods are high-performance metal materials made from high-purity molybdenum powder through pressing, sintering, forging, and drawing processes. They possess excellent high-temperature performance, thermal conductivity, and chemical stability. These rods are widely used in advanced technological fields such as metallurgy, electronics, glass, aerospace, and nuclear energy, making them one of the key functional materials in modern industrial high-temperature environments.

2. Main Application Fields of Molybdenum Rods

- Heating elements and support rods for high-temperature electric furnaces
- Diffusion tubes and wafer carriers in the semiconductor industry
- Electrodes and targets for vacuum coating equipment
- High-temperature components in nuclear reactors and aircraft engines
- Electrode rods and heat-resistant fixtures in the glass industry
- Medical devices and X-ray targets
- High-temperature experimental materials and components in scientific research

3. Classification of Molybdenum Rods (by purity)

Category	Description	Typical Applications
High-Purity Moly Rods	Purity $\geq 99.95\%$, extremely low impurity levels	Electronics, semiconductors, research equipment
Industrial-Grade Rods	Purity around 99.90%, cost-effective	Electric heating, glass, metallurgical equipment
Doped Moly Rods	Doped with La, Ti, Zr, etc., for enhanced performance	High-temperature structural parts, TZM alloy applications

4. Typical Specifications of Molybdenum Rods from CTIA GROUP LTD

Item	Value Range
Density	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$
Hardness (HV30)	160 – 250 HV
Tensile Strength (Rm/MPa)	$\geq 590 \text{ MPa}$
Yield Strength (Rp0.2/MPa)	$\geq 490 \text{ MPa}$
Elongation after fracture (A/%)	10–25%
Diameter Range	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$, Customizable
Length Range	10 mm – 2000 mm, Customizable

5. 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

5.2.1 Ensayo de fluencia de varillas de molibdeno

La prueba de fluencia evalúa el comportamiento de deformación a largo plazo de las varillas de molibdeno bajo tensión constante a altas temperaturas, lo que refleja su estabilidad en entornos de alta temperatura. La prueba utiliza una máquina especial de prueba de fluencia equipada con un horno de vacío de alta temperatura para garantizar que el entorno de prueba esté libre de interferencias de oxígeno. La muestra se procesa en forma cilíndrica y la superficie se pule para reducir la concentración de tensión. Durante la prueba, la muestra se mantiene a temperatura y tensión constantes durante cientos o miles de horas, se registran los cambios de deformación con el tiempo y se genera una curva de fluencia, que se divide en fases primarias, de estado estacionario y de fluencia acelerada.

La tasa de fluencia de las varillas de molibdeno de alta pureza es mayor a altas temperaturas, mientras que las varillas de molibdeno dopadas (como TZM, Mo-La) reducen significativamente la tasa de fluencia y prolongan la vida útil al agregar elementos de aleación. Una vez completada la prueba, la fractura por fluencia se puede analizar por microscopía y se pueden observar fenómenos microscópicos como el deslizamiento del límite del grano y la formación de vacíos, revelando el mecanismo de fluencia. Los factores que afectan las propiedades de fluencia incluyen la temperatura, la tensión y la microestructura. Las altas temperaturas aceleran la difusión de los átomos, lo que conduce a un aumento de la fluencia; Los granos finos y los elementos dopados pueden inhibir eficazmente el deslizamiento del límite de grano.

Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de un sistema de pruebas de fluencia multieje que puede simular estados de tensión complejos y mejorar la precisión de la predicción; La tecnología de correlación de imágenes digitales a alta temperatura registra el campo de deformación con una cámara infrarroja, lo que proporciona datos de deformación más precisos. Además, el método de prueba de fluencia acelerada mejora significativamente la eficiencia de las pruebas al aumentar la temperatura y el estrés, acortar el tiempo de prueba e incorporar modelos matemáticos para predecir el comportamiento a largo plazo.

5.2.2 Ensayo de fatiga térmica de varillas de molibdeno

Las pruebas de fatiga térmica evalúan la resistencia al agrietamiento de las varillas de molibdeno bajo tensiones térmicas cíclicas y son adecuadas para elementos calefactores de hornos de alta temperatura o componentes aeroespaciales. La prueba simula el ciclo de temperatura en condiciones de funcionamiento del mundo real calentando y enfriando rápidamente la muestra. El equipo incluye una máquina de prueba de fatiga térmica con sistemas de calentamiento por inducción y enfriamiento por agua capaces de aumentar y bajar rápidamente la temperatura. La superficie de la muestra se pule para reducir las grietas iniciales y la prueba se realiza en vacío o atmósfera inerte para evitar la oxidación.

Durante la prueba, la muestra se sometió a varios ciclos de alta temperatura-baja temperatura, y se registraron el tiempo de inicio de la grieta y la tasa de propagación. Las varillas de molibdeno dopado suelen presentar una mayor vida útil a la fatiga térmica debido a su excelente resistencia al agrietamiento y a altas temperaturas. Una vez completada la prueba, la topografía de la grieta se

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

analiza mediante microscopía o pruebas ultrasónicas para caracterizar las franjas de fatiga y el daño oxidativo. Los factores que afectan el rendimiento de la fatiga térmica incluyen diferencias de temperatura, condiciones de superficie y frecuencia de ciclo. Una gran diferencia de temperatura aumentará el estrés térmico y acelerará la propagación de la grieta. La superficie pulida puede prolongar eficazmente la vida útil.

Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de imágenes térmicas in situ, que registra la distribución de la temperatura en tiempo real a través de cámaras infrarrojas para optimizar las condiciones de prueba; La aplicación de recubrimientos antioxidantes como el MoSi₂ aumenta significativamente la vida útil a la fatiga térmica. Además, la tecnología de simulación numérica predice la ubicación de inicio de la grieta mediante la simulación del campo de tensión térmica, lo que mejora la naturaleza científica de la prueba.

5.2.3 Ensayo de resistencia a la oxidación de varillas de molibdeno

Las pruebas de resistencia a la oxidación evalúan la estabilidad de las varillas de molibdeno en entornos oxidantes de alta temperatura, críticos para hornos de alta temperatura y aplicaciones aeroespaciales. La prueba utiliza un oxidante de alta temperatura en el que la muestra se coloca en una atmósfera de aire u oxígeno para medir los cambios de masa y la formación de óxido. La superficie de la muestra se pule para garantizar la consistencia, y el rango de temperatura de prueba cubre las condiciones en las que se puede usar la varilla de molibdeno. Las balanzas de precisión se utilizan para registrar la ganancia de masa y reflejar la tasa de oxidación.

Las varillas de molibdeno de alta pureza son propensas a los óxidos volátiles (MoO₃) a altas temperaturas, lo que provoca pérdida de masa, mientras que las varillas de molibdeno dopadas (por ejemplo, Mo-La) mejoran la resistencia a la oxidación al formar una capa protectora de óxido. Una vez completada la prueba, la morfología y composición de la capa de óxido se analizan mediante microscopía y espectroscopia de energía para evaluar su efecto protector. Los factores que afectan la resistencia a la oxidación incluyen la temperatura, la atmósfera y el recubrimiento de la superficie. Las altas temperaturas y concentraciones de oxígeno aceleran la oxidación, y los recubrimientos como el SiC pueden aumentar significativamente la temperatura de resistencia a la oxidación.

Los avances tecnológicos incluyen pruebas de oxidación dinámica, que simulan condiciones de oxidación cíclica en condiciones de funcionamiento del mundo real; La tecnología de nano-recubrimiento prepara una capa protectora densa a través de la deposición física de vapor, lo que prolonga significativamente la vida útil de la antioxidante. Además, el monitoreo de calidad en tiempo real del analizador termogravimétrico mejora la precisión de las pruebas y proporciona soporte de datos para el diseño de recubrimientos.

5.3 Análisis de la microestructura de varillas de molibdeno

El análisis de microestructura utiliza métodos avanzados de microscopía y espectroscopia para revelar el tamaño de grano, la distribución de fase y las características de defectos de las varillas de molibdeno, lo que proporciona una base para la optimización del rendimiento y el análisis de fallas.

5.3.1 Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM)

El análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) se utiliza para observar la morfología de la superficie, las características de fractura y la estructura del grano de las varillas de molibdeno, que es el método central del análisis de microestructuras. La prueba utiliza SEM de emisión de campo, equipado con detectores de electrones secundarios y electrones retrodispersados, capaces de obtener imágenes de alta resolución. La muestra debe pulirse hasta un estado de espejo, o la fractura debe dejarse abierta para el análisis de fallas. Antes de la prueba, la muestra se limpia por ultrasonidos y se rocía con una capa conductora como el oro o el carbono para mejorar las imágenes.

El análisis SEM puede revelar el tamaño de grano, las características del límite de grano, la porosidad, las inclusiones y la topografía de fractura. Las varillas de molibdeno de alta pureza generalmente exhiben granos más grandes, y las varillas de molibdeno dopado tienen estructuras de grano más finas debido a las fases precipitadas (por ejemplo, TiC, La₂O₃). El análisis de fracturas puede distinguir entre fracturas dúctiles y frágiles y guiar la optimización del material. Los factores que afectan los resultados de un análisis incluyen la calidad de la preparación de la muestra y el proceso de procesamiento. El pulido desigual puede dar lugar a artefactos, y el procesamiento térmico refina los granos y mejora el rendimiento.

Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de SEM ambiental, que permite la observación de la formación dinámica de óxidos en bajo vacío; El haz de iones focalizado (FIB) combinado con SEM permite la reconstrucción estructural tridimensional y proporciona información microscópica más completa. La introducción de la tecnología de inteligencia artificial ha mejorado la eficiencia del análisis al identificar automáticamente los límites y defectos del grano.

5.3.2 Análisis de difracción de rayos X (DRX)

El análisis de difracción de rayos X (XRD) se utiliza para determinar la estructura cristalina, la composición de fase y las tensiones residuales de las barras de molibdeno, y es un método importante para evaluar las propiedades microscópicas de los materiales. La prueba utiliza un difractómetro de rayos X para escanear la muestra con radiación Cu K α para generar un espectro de difracción. La superficie de la muestra debe pulirse hasta obtener un acabado alto para garantizar que la señal de difracción sea clara. Los resultados de las pruebas se compararon con la tarjeta estándar para determinar la estructura cúbica centrada en el cuerpo y la fase de dopaje (por ejemplo, TiC, ZrC) del molibdeno.

El análisis XRD puede revelar las tensiones residuales introducidas durante el proceso de mecanizado, que afectan las propiedades mecánicas de las varillas de molibdeno. La fase precipitada en la varilla de molibdeno dopada mejora la resistencia del límite del grano y mejora el rendimiento a alta temperatura. Los factores que influyen en los resultados del análisis incluyen la oxidación de la superficie y el estrés de procesamiento. La capa de óxido puede interferir con los picos de difracción y debe eliminarse mediante decapado; Las tensiones introducidas por el trabajo en frío pueden cambiar la posición del pico y requerir recocido.

Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la radiación de sincrotrón XRD para

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

proporcionar un análisis de fase de mayor resolución; La XRD in situ permite la monitorización en tiempo real de las transiciones de fase y los cambios de tensión a altas temperaturas. Además, la técnica de mapeo de tensiones bidimensional mejora la precisión del análisis de la distribución de tensiones residuales.

5.3.3 Espectroscopía de energía (EDS)

La espectroscopia (EDS) combinada con SEM se utilizó para determinar cuantitativamente la distribución elemental y el contenido de impurezas de las varillas de molibdeno, y para evaluar la pureza del material y la uniformidad del dopaje. La prueba detecta los rayos X característicos emitidos por la muestra, identifica los elementos y calcula su contenido. Las muestras se pulen y limpian para garantizar que la superficie esté libre de contaminación. El análisis EDS puede detectar la distribución de trazas de impurezas (p. ej., Fe, C, O) y elementos dopantes (p. ej., Ti, La) en las varillas de molibdeno.

El análisis EDS de varillas de molibdeno de alta pureza generalmente muestra un solo elemento de molibdeno, mientras que las varillas de molibdeno dopadas muestran una distribución uniforme de los elementos de aleación. Los resultados de la prueba se ven afectados por la condición de la superficie de la muestra y la profundidad de sondeo, y es necesario optimizar el voltaje de aceleración y el tiempo de sondeo. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de detectores EDS de alta resolución, que mejoran la sensibilidad de la detección elemental; En combinación con la difracción de retrodispersión de electrones (EBSD), es posible analizar tanto la distribución elemental como la orientación de los cristales, proporcionando más información para la optimización de la microestructura.

5.4 Ensayo de propiedades químicas de varillas de molibdeno

Las pruebas de rendimiento químico evalúan la durabilidad y la estabilidad química de las varillas de molibdeno en entornos corrosivos para su uso en electrodos de la industria del vidrio y componentes de hornos de alta temperatura.

5.4.1 Ensayo de resistencia a la corrosión de varillas de molibdeno

Las pruebas de resistencia a la corrosión evalúan la estabilidad de las varillas de molibdeno en ambientes ácidos, alcalinos o de sales fundidas. La prueba generalmente se realiza por inmersión o métodos electroquímicos, donde la muestra se coloca en un medio corrosivo específico y se observa la pérdida de masa o los cambios en la superficie. El equipo de prueba incluye un baño de agua termostático y un potencióstato, y la superficie de la muestra se pule para garantizar la consistencia. Los medios corrosivos comunes incluyen ácido nítrico, ácido clorhídrico, soluciones de hidróxido de sodio y sales fundidas a alta temperatura.

La varilla de molibdeno de alta pureza tiene buena resistencia a la corrosión por ácidos y álcalis a temperatura ambiente, pero puede producirse corrosión local en la sal fundida a alta temperatura. Las varillas de molibdeno dopado (por ejemplo, Mo-W) mejoran significativamente la resistencia a la corrosión al mejorar la estabilidad del límite del grano. Una vez finalizada la prueba, se observa la topografía de corrosión mediante microscopía y se analizan las características de picaduras o

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

corrosión uniforme. Los factores que afectan la resistencia a la corrosión incluyen la concentración del medio, la temperatura y el estado de la superficie. Las altas temperaturas pueden acelerar la corrosión y el pulido de la superficie reduce la aparición de la corrosión.

Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) para monitorear las tasas de corrosión en tiempo real; Desarrollo de equipos de prueba de corrosión a alta temperatura para simular las condiciones reales de trabajo; El uso de medios corrosivos verdes, como el ácido cítrico, reduce el impacto ambiental.

5.4.2 Evaluación de la estabilidad química de las varillas de molibdeno

La evaluación de la estabilidad química prueba la reactividad de las varillas de molibdeno en un entorno químico específico, a menudo en combinación con pruebas de resistencia a la oxidación y pruebas de resistencia a la corrosión. La prueba consiste en exponer una muestra a un entorno gaseoso, líquido o sólido a alta temperatura para observar cambios en sus reacciones químicas y propiedades. El equipo de prueba incluye un horno de alta temperatura y un reactor químico, y las muestras se prueban en una atmósfera controlada.

Las varillas de molibdeno exhiben una excelente estabilidad química en atmósferas inertes o reductoras, pero son propensas a la reactividad en ambientes oxidantes o corrosivos. Las varillas de molibdeno dopado mejoran la estabilidad al formar una capa protectora de óxido o aleación. Los resultados de las pruebas se evalúan a través de una combinación de variación de calidad, análisis de superficie y pruebas de composición. Los factores que afectan la estabilidad química incluyen la atmósfera ambiente, la temperatura y la composición del material. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de técnicas de análisis químico in situ, como la espectroscopia Raman para el monitoreo en tiempo real de los productos de reacción; El desarrollo de recubrimientos compuestos ha mejorado la estabilidad química.

5.5 Análisis de fallos de varillas de molibdeno

El análisis de fallas revela el mecanismo de falla mediante el estudio del comportamiento de fractura, fatiga y desgaste de las varillas de molibdeno, y proporciona una base para la optimización del material y la predicción de la vida útil.

5.5.1 Análisis del mecanismo de fractura de varillas de molibdeno

El análisis del mecanismo de fractura estudia el proceso de falla de la varilla de molibdeno bajo fuerza e identifica el tipo de fractura y la causa. La morfología de la fractura se observó mediante SEM, y los datos de las pruebas mecánicas se combinaron para determinar si se trataba de fractura dúctil, fractura frágil o fractura por fatiga. Las varillas de molibdeno de alta pureza a menudo muestran una fractura frágil a temperatura ambiente y se convierten en fractura dúctil a alta temperatura. Las varillas de molibdeno dopado reducen la fragilidad mediante el fortalecimiento del límite de grano. El análisis también incluye la ubicación del inicio de la grieta, la ruta de propagación y el papel de los defectos microscópicos.

Los factores que influyen en la fractura incluyen el tamaño de grano, el contenido de impurezas y

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

los defectos de procesamiento. Los granos más grandes y las trazas de oxígeno pueden desencadenar fracturas frágiles, y las dislocaciones introducidas por el trabajo en frío aumentan el riesgo de fractura. Los avances tecnológicos incluyen el análisis SEM in situ para la observación en tiempo real de la propagación de grietas; La aplicación del modelo de mecánica de fractura para predecir la tasa de crecimiento de grietas.

5.5.2 Análisis de fatiga y desgaste de varillas de molibdeno

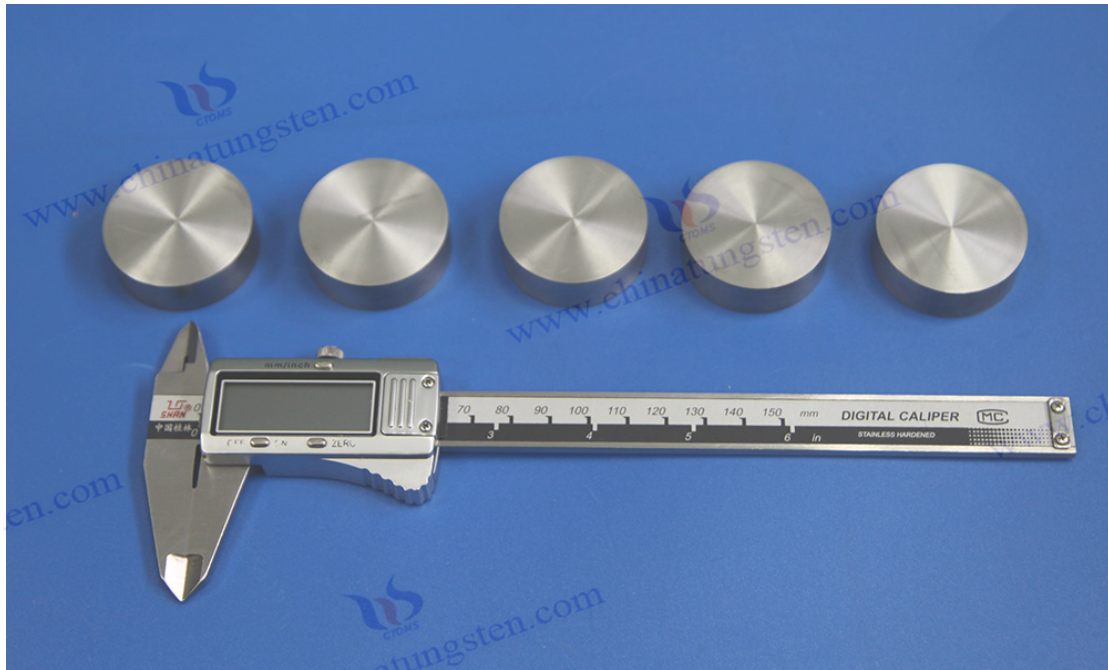
El análisis de fatiga y desgaste evalúa la durabilidad de las varillas de molibdeno bajo condiciones de carga cíclica y fricción para varillas de soporte de hornos de alta temperatura y materiales de moldes. Las pruebas de fatiga registran el inicio y la propagación de grietas mediante la aplicación de tensiones cíclicas; Las pruebas de abrasión utilizan un tribómetro para medir la pérdida de masa y la topografía de la superficie. Las varillas de molibdeno dopado exhiben una mejor resistencia a la fatiga y al desgaste debido a su mayor dureza y resistencia.

Los factores que influyen en la fatiga y el desgaste incluyen la condición de la superficie, el entorno y las condiciones de carga. Las superficies pulidas prolongan significativamente la vida útil a la fatiga y los lubricantes reducen el desgaste. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de nano-recubrimientos (por ejemplo, SiC) para mejorar la resistencia al desgaste; Tecnología de ensayos de fricción in situ para el seguimiento en tiempo real del proceso de desgaste.

5.5.3 Modelo de predicción de la vida útil de las varillas de molibdeno

El modelo de predicción de vida útil predice la vida útil de las varillas de molibdeno en condiciones de trabajo específicas mediante la integración de datos de pruebas mecánicas, de alta temperatura y químicas. Los modelos se basan en datos de fluencia, fatiga y corrosión, combinados con métodos matemáticos como el modelo de Arrhenius para la predicción. Los datos de prueba se obtuvieron mediante máquina de prueba y análisis microscópico, y el modelo tuvo en cuenta los efectos de la temperatura, el estrés y el medio ambiente.

La vida útil de las varillas de molibdeno de alta pureza está limitada por la oxidación y la fluencia, y las varillas de molibdeno dopadas prolongan significativamente la vida útil al fortalecer la microestructura. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de gemelos digitales para simular el rendimiento de las varillas de molibdeno en tiempo real; Los modelos de aprendizaje automático utilizan el análisis de big data para mejorar la precisión de las predicciones.



Varillas de aleación de tungsteno y molibdeno de CTIA GROUP LTD

Capítulo 6 Equipo de producción de varillas de molibdeno

La producción de varillas de molibdeno implica múltiples procesos complejos, desde el manejo de la materia prima hasta el producto final, cada uno de los cuales requiere equipos especializados para garantizar la calidad y el rendimiento del producto. Este capítulo examina en detalle el equipo utilizado en la producción de varillas de molibdeno, que abarca el manejo de materias primas, la pulvimetalurgia, el procesamiento térmico, el tratamiento de superficies, las pruebas y el equipo de producción automatizado e inteligente. Juntos, estos dispositivos forman una cadena de producción eficiente y sofisticada que satisface la demanda de varillas de molibdeno de alto rendimiento en la industria aeroespacial, electrónica, del vidrio y otros campos. Al optimizar el diseño de los equipos y el control de procesos, puede mejorar significativamente la productividad, la calidad y la consistencia del producto, al tiempo que reduce el consumo de energía y el impacto ambiental.

6.1 Equipo de manipulación de materias primas para varillas de molibdeno

La manipulación de materias primas es el primer paso en la producción de varillas de molibdeno, que implica la conversión del mineral de molibdeno o los compuestos de molibdeno en polvo de molibdeno de alta pureza, sentando las bases para los procesos posteriores de pulvimetalurgia. El equipo de procesamiento de materias primas incluye principalmente equipos de trituración y molienda y equipos de purificación, que deben garantizar que el tamaño de partícula de la materia prima sea uniforme, de alta pureza y bajo contenido de impurezas.

6.1.1 Equipos de trituración y molienda

Los equipos de trituración y molienda se utilizan para procesar mineral de molibdeno (por ejemplo, molibdenita) o compuestos de molibdeno (por ejemplo, óxido de molibdeno) en partículas finas para su posterior purificación y preparación de polvo. El equipo de trituración generalmente incluye

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

tritadoras de mandíbula y trituradoras de cono para triturar grandes piezas de materias primas en partículas pequeñas. La trituradora de mandíbula reduce el tamaño de la materia prima de decenas de centímetros a unos pocos milímetros mediante extrusión y cizallamiento, que es adecuado para procesar molibdenita con alta dureza. La trituradora de cono refina aún más las partículas y es adecuada para procesos de trituración secundaria y fina para garantizar un tamaño de partícula uniforme.

El equipo de molienda incluye principalmente molinos de bolas y molinos de chorro, que se utilizan para moler las partículas trituradas en polvos del tamaño de una micra. El molino de bolas muele las partículas hasta obtener un tamaño más fino a través de la colisión y la fricción entre las bolas de acero y las materias primas, lo que es adecuado para la producción a gran escala. El molino de chorro utiliza un flujo de aire de alta velocidad para impactar las materias primas y producir polvo ultrafino, que es especialmente adecuado para la preparación de polvo de molibdeno de alta pureza. Durante el proceso de molienda, la atmósfera (por ejemplo, nitrógeno) debe controlarse para evitar la oxidación, y el equipo está revestido con materiales resistentes al desgaste (por ejemplo, alúmina o carburo de tungsteno) para reducir la contaminación.

Los factores que afectan el rendimiento del equipo incluyen la dureza de la materia prima, el tamaño de partícula de alimentación y el tiempo de molienda. Las materias primas con mayor dureza pueden causar desgaste en el equipo, y el revestimiento debe reemplazarse regularmente; Los tiempos de molienda excesivamente largos pueden introducir impurezas y es necesario optimizar los parámetros del proceso. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de molinos de bolas vibratorios de alta eficiencia, que han mejorado significativamente la eficiencia de molienda; El sistema de control inteligente ajusta automáticamente los parámetros de molienda mediante el control del tamaño de partícula en tiempo real para garantizar una calidad de polvo estable.

6.1.2 Equipos de purificación (hornos de tostado, hornos de reducción)

El equipo de purificación se utiliza para convertir los compuestos de molibdeno triturados y molidos (como el óxido de molibdeno) en polvo de molibdeno de alta pureza, incluidos principalmente hornos de tostado y hornos de reducción. El tostador convierte los sulfuros de molibdenita en óxido de molibdeno mediante un tratamiento a alta temperatura y elimina las impurezas volátiles. Los tostadores suelen estar diseñados como hornos rotativos u hornos de lecho fluidizado y son capaces de procesar continuamente grandes cantidades de materias primas. La atmósfera dentro del horno está estrictamente controlada, generalmente en un ambiente de aire u oxígeno, para garantizar la oxidación completa de los sulfuros. El equipo está equipado con un sistema de tratamiento de gases de escape (por ejemplo, un depurador húmedo) para eliminar los óxidos de azufre y cumplir con los requisitos ambientales.

Los hornos de reducción se utilizan para reducir el óxido de molibdeno a polvo de molibdeno metálico, generalmente en una atmósfera de hidrógeno. El horno de reducción tubular es un equipo común, que reduce gradualmente el óxido de molibdeno a través de una zona de calentamiento de múltiples etapas para producir polvo de molibdeno de alta pureza. El cuerpo del horno está fabricado con materiales resistentes a altas temperaturas, como aleaciones de cuarzo o molibdeno, para

garantizar un funcionamiento estable a largo plazo. El flujo de hidrógeno y los gradientes de temperatura deben controlarse con precisión durante el proceso de reducción para evitar la aglomeración de partículas de polvo o residuos de impurezas. El equipo también está equipado con un sistema de recuperación de gases de escape para recuperar el hidrógeno no reaccionado y mejorar la utilización de los recursos.

Los factores que afectan los resultados de purificación incluyen la pureza de la materia prima, el control de la atmósfera y la estanqueidad del equipo. Las trazas de impurezas (como el hierro y el silicio) en las materias primas pueden afectar la calidad del polvo de molibdeno, que debe eliminarse mediante un tratamiento previo; El oxígeno o la humedad en la atmósfera pueden causar oxidación del polvo, y es necesario mantener un entorno de hidrógeno de alta pureza. Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de hornos de reducción al vacío, que han mejorado significativamente la pureza del polvo de molibdeno; El sistema de monitoreo en línea analiza la composición de la atmósfera a través de espectroscopia infrarroja para optimizar el proceso de reducción.

6.2 Equipos de pulvimetalurgia para varillas de molibdeno

La pulvimetalurgia es el proceso central de la producción de varillas de molibdeno, que proporciona la base para el procesamiento posterior mediante el prensado y la formación de polvo de molibdeno y su sinterización en piezas en bruto de alta densidad. Los equipos de pulvimetalurgia incluyen equipos de mezcla y prensado y hornos de sinterización, que deben garantizar la densidad, la uniformidad y las propiedades mecánicas de la palanquilla.

6.2.1 Equipos de mezcla y prensado

El equipo de mezcla y prensado se utiliza para mezclar homogéneamente polvo de molibdeno con elementos dopados (como Ti, La) y prensarlo hasta convertirlo en una varilla en blanco. El equipo de mezcla incluye principalmente molinos planetarios y mezcladores en V, que se utilizan para mezclar polvo de molibdeno y dopantes (como La_2O_3 , TiC). El molino planetario logra una mezcla uniforme a través de la rotación y la colisión a alta velocidad, lo que es adecuado para la preparación de varillas de molibdeno dopadas; El mezclador en V es adecuado para polvo de molibdeno de alta pureza volteándolo a baja velocidad para evitar la introducción de impurezas. Durante el proceso de mezcla, es necesario controlar la atmósfera (por ejemplo, nitrógeno) para evitar la oxidación del polvo, y la pared interna del equipo está hecha de acero inoxidable o materiales cerámicos para reducir la contaminación.

El equipo de prensado incluye prensas isostáticas en frío y prensas hidráulicas, que se utilizan para prensar el polvo mezclado en blanco. Las prensas isostáticas en frío aplican una presión uniforme a través de un medio líquido, como agua o aceite, para preparar piezas en bruto de alta densidad, especialmente para piezas en bruto de barra de molibdeno grandes o de forma compleja. La prensa hidráulica es prensada por un molde, que es adecuado para la producción de lotes pequeños, y el diseño del molde debe considerar la precisión geométrica de la pieza en bruto. La distribución de la presión debe controlarse durante el proceso de prensado para evitar grietas o una densidad desigual de la pieza en bruto.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Los factores que afectan los resultados de mezcla y prensado incluyen el tamaño de partícula del polvo, la uniformidad del dopaje y el proceso de prensado. Los polvos demasiado finos pueden provocar una fluidez deficiente y afectar a la calidad del prensado; La distribución desigual del dopante puede degradar el rendimiento de la palanquilla. El progreso tecnológico incluye la aplicación de la tecnología de dopaje en fase líquida, que mejora la uniformidad del dopaje; El sistema de prensado automatizado optimiza el proceso de moldeo mediante el control de la presión y la densidad con sensores.

6.2.2 Hornos de sinterización (hornos de vacío, hornos de atmósfera)

El horno de sinterización se utiliza para calentar la pieza en bruto prensada a alta temperatura, de modo que las partículas de polvo se combinen para formar una barra en bruto de molibdeno de alta densidad. El horno de sinterización al vacío es el equipo principal, que evita la oxidación a través de un entorno de vacío (baja presión) y garantiza la alta pureza y compacidad de la pieza en bruto. El cuerpo del horno adopta un elemento calefactor de molibdeno o grafito, que es resistente a altas temperaturas y tiene buena uniformidad térmica. El proceso de sinterización se lleva a cabo en etapas, primero con desaglomerado a baja temperatura para eliminar el aglutinante, y luego sinterización a alta temperatura para promover la unión de partículas, y finalmente formar un blanco con una densidad cercana al valor teórico.

Los hornos de sinterización en atmósfera suelen utilizar hidrógeno o gas inerte (como el argón) como atmósfera protectora, que es adecuada para la sinterización con varillas de molibdeno. El hidrógeno es reducible, lo que puede eliminar eficazmente las trazas de óxidos y mejorar la calidad de la pieza en bruto. El horno está equipado con un sistema de circulación atmosférica para garantizar una distribución uniforme de los gases y evitar la oxidación local. El horno de sinterización también debe estar equipado con un sistema de control de temperatura preciso para mantener un gradiente de temperatura uniforme y evitar que la pieza en bruto se deforme o agriete.

Los factores que afectan el efecto de sinterización incluyen la atmósfera de sinterización, el control de temperatura y la densidad de palanquilla. Las trazas de oxígeno en la atmósfera pueden provocar oxidación, y el punto de rocío debe controlarse estrictamente; Una densidad de palanquilla inicial demasiado baja prolongará el tiempo de sinterización. Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de un horno de sinterización por inducción de frecuencia intermedia que mejora la eficiencia del calentamiento; El sistema de monitoreo en línea controla la temperatura en tiempo real a través de un termómetro infrarrojo para optimizar la calidad de la sinterización.

6.3 Equipos de procesamiento térmico para varillas de molibdeno

El equipo de procesamiento térmico se utiliza para procesar piezas en bruto sinterizadas en la forma final de barra de molibdeno, lo que implica procesos de forjado, laminado y embutición para mejorar la densidad del material y las propiedades mecánicas.

6.3.1 Equipos de forja

El equipo de forja se utiliza para deformar plásticamente la pieza en bruto sinterizada a alta temperatura para preparar varillas de molibdeno de grano fino de alta densidad. Los equipos

comúnmente utilizados incluyen máquinas de forja hidráulicas y martillos neumáticos, que pueden aplicar una presión de alto tonelaje para garantizar que la pieza en bruto esté completamente deformada. La forja se lleva a cabo a altas temperaturas y requiere un horno de inducción para calentar la pieza en bruto a una temperatura adecuada para mejorar la ductilidad y reducir la resistencia a la deformación. Durante el proceso de forjado, es necesario controlar la velocidad y la dirección de deformación para evitar grietas o tensiones internas.

El equipo de forja generalmente está equipado con un sistema de enfriamiento por agua para proteger el troquel y la pieza de trabajo y prolongar la vida útil del equipo. El material del molde debe estar hecho de una aleación resistente a altas temperaturas (como la aleación de tungsteno) para soportar altas temperaturas y altas presiones. Los factores que afectan la calidad de la forja incluyen la temperatura de calentamiento, la cantidad de deformación y el diseño de la matriz. Las temperaturas demasiado bajas pueden causar agrietamiento, y las temperaturas demasiado altas pueden causar el crecimiento del grano. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de forja isotérmica para mejorar la uniformidad del grano a través de un control preciso de la temperatura; La máquina de forja servocontrolada mejora la precisión del mecanizado al ajustar la presión en tiempo real.

6.3.2 Trenes de laminación y máquinas de trefilado

Los trenes de laminación y las máquinas de trefilado se utilizan para procesar aún más la pieza en bruto forjada en varillas de molibdeno de tamaño preciso. El tren de laminación incluye un tren de laminación en caliente y un tren de laminación en frío, el tren de laminación en caliente procesa la pieza en bruto en una barra redonda o cuadrada a través de múltiples pasadas, que es adecuada para la producción de varillas de molibdeno de gran diámetro. Durante el proceso de laminación, es necesario equipar un dispositivo de calentamiento para mantener la palanquilla a una temperatura adecuada y evitar grietas en el trabajo en frío. Los trenes de laminación en frío se utilizan para el acabado, mejorando la precisión dimensional y el acabado superficial.

Las máquinas de trefilado se utilizan para producir varillas de pequeño diámetro o micro molibdeno, que se estiran para darles forma mediante troqueles de trefilado. El estirado se lleva a cabo a altas temperaturas y se utilizan lubricantes como el MoS₂ para reducir la fricción y el desgaste. Los troqueles de trefilado suelen estar hechos de material de diamante o carburo de tungsteno, lo que garantiza una alta precisión y durabilidad. Los factores que afectan los resultados de laminación y embutición incluyen la temperatura, la tasa de deformación y la condición de la matriz. Un control inadecuado de la temperatura puede provocar defectos en la superficie y el desgaste del molde puede afectar la precisión dimensional.

Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de líneas de producción de laminación continua, que han mejorado la eficiencia de la producción; La aplicación de un calibrador láser permite el monitoreo en tiempo real del tamaño de la barra para garantizar el control de la tolerancia. Además, el sistema de embutición automatizado optimiza la consistencia del mecanizado mediante el control de la velocidad de embutición a través de un servomotor.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD
Molybdenum Rods Introduction

1. Overview of Molybdenum Rods

Molybdenum rods are high-performance metal materials made from high-purity molybdenum powder through pressing, sintering, forging, and drawing processes. They possess excellent high-temperature performance, thermal conductivity, and chemical stability. These rods are widely used in advanced technological fields such as metallurgy, electronics, glass, aerospace, and nuclear energy, making them one of the key functional materials in modern industrial high-temperature environments.

2. Main Application Fields of Molybdenum Rods

- Heating elements and support rods for high-temperature electric furnaces
- Diffusion tubes and wafer carriers in the semiconductor industry
- Electrodes and targets for vacuum coating equipment
- High-temperature components in nuclear reactors and aircraft engines
- Electrode rods and heat-resistant fixtures in the glass industry
- Medical devices and X-ray targets
- High-temperature experimental materials and components in scientific research

3. Classification of Molybdenum Rods (by purity)

Category	Description	Typical Applications
High-Purity Moly Rods	Purity $\geq 99.95\%$, extremely low impurity levels	Electronics, semiconductors, research equipment
Industrial-Grade Rods	Purity around 99.90%, cost-effective	Electric heating, glass, metallurgical equipment
Doped Moly Rods	Doped with La, Ti, Zr, etc., for enhanced performance	High-temperature structural parts, TZM alloy applications

4. Typical Specifications of Molybdenum Rods from CTIA GROUP LTD

Item	Value Range
Density	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$
Hardness (HV30)	160 – 250 HV
Tensile Strength (Rm/MPa)	$\geq 590 \text{ MPa}$
Yield Strength (Rp0.2/MPa)	$\geq 490 \text{ MPa}$
Elongation after fracture (A/%)	10–25%
Diameter Range	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$, Customizable
Length Range	10 mm – 2000 mm, Customizable

5. 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

6.4 Equipos de tratamiento superficial para varillas de molibdeno

El equipo de tratamiento de superficies se utiliza para mejorar la calidad de la superficie de las varillas de molibdeno, mejorar su resistencia a la corrosión y estética, y cumplir con los estrictos requisitos de los campos electrónicos, aeroespaciales y otros.

6.4.1 Pulidoras

Las máquinas pulidoras se utilizan para procesar la superficie de las varillas de molibdeno hasta obtener un alto acabado, reducir los defectos de la superficie y mejorar el rendimiento. La pulidora mecánica muele la barra con una muela abrasiva o pasta de pulido, mejorando gradualmente la suavidad de la superficie. El equipo está equipado con muelas abrasivas de varias etapas, desde molienda gruesa hasta molienda fina, adecuadas para varillas de molibdeno con diferentes requisitos de superficie. La máquina pulidora electrolítica elimina los defectos de la superficie mediante una reacción electroquímica para obtener un efecto espejo, que es especialmente adecuado para el procesamiento de varillas de molibdeno de alta pureza.

Durante el proceso de pulido, es necesario controlar la velocidad de rotación y el tipo de agente pulidor para evitar la introducción de nuevas tensiones superficiales. Las pulidoras suelen estar equipadas con un sistema de refrigeración para evitar que la pieza de trabajo se sobrecaliente y provoque oxidación. Los factores que afectan los resultados del pulido incluyen el tamaño de partícula del pulido, la presión y la condición inicial de la superficie. Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de sistemas de pulido automatizados que controlan la trayectoria de pulido a través de robots para mejorar la consistencia; La aplicación de agentes pulidores a nanoescala mejora significativamente el acabado de la superficie.

6.4.2 Equipos de limpieza

El equipo de limpieza se utiliza para eliminar óxidos, aceites y residuos de pulido de la superficie de las varillas de molibdeno para garantizar una superficie limpia. El limpiador ultrasónico es la pieza principal del equipo, que utiliza vibración de alta frecuencia (decenas de kilohercios) para crear pequeñas burbujas en la solución de limpieza para eliminar los contaminantes de la superficie. El líquido de limpieza suele ser agua desionizada o un agente de limpieza neutro para evitar la corrosión de la varilla de molibdeno. La planta de decapado utiliza una solución de ácido diluido (como ácido nítrico o ácido sulfúrico) para eliminar la capa de óxido y debe estar equipada con un sistema de tratamiento de líquidos residuales para cumplir con los requisitos ambientales.

Durante el proceso de limpieza, el tiempo de limpieza y la temperatura del líquido deben controlarse para evitar la corrosión excesiva o los contaminantes residuales. Los factores que afectan los resultados de limpieza incluyen la composición del líquido de limpieza, el estado de la superficie y la estanqueidad del equipo. El progreso tecnológico incluye la aplicación de tecnología de limpieza verde, el uso de agentes de limpieza respetuosos con el medio ambiente para reducir la contaminación; El sistema CIP optimiza la eficiencia de la limpieza mediante el monitoreo del pH de los líquidos y las concentraciones de contaminantes en tiempo real.

6.5 Equipo de ensayo para varillas de molibdeno

El equipo de prueba se utiliza para evaluar la calidad de las varillas de molibdeno para garantizar que cumplan con los requisitos de propiedades mecánicas, precisión dimensional y calidad de la superficie, cubriendo las pruebas no destructivas y la inspección dimensional de la superficie.

6.5.1 Equipos de ensayos no destructivos (ultrasonidos, rayos X)

El equipo de prueba no destructiva se utiliza para detectar defectos internos y superficiales, como porosidad, inclusiones y grietas en varillas de molibdeno sin dañar la muestra. El equipo de prueba ultrasónica escanea las barras con ondas ultrasónicas de alta frecuencia (unos pocos megahercios) para detectar defectos internos. El dispositivo está equipado con un transductor y un sistema de análisis de señales que es capaz de identificar pequeños defectos y localizar su profundidad. El equipo de inspección por rayos X utiliza rayos X para penetrar en la barra y producir una imagen de la estructura interna, que es particularmente adecuada para inspeccionar la porosidad interna o las inclusiones de grandes varillas de molibdeno.

Durante el proceso de inspección, es necesario calibrar la sensibilidad del equipo para garantizar la precisión de la detección de defectos. Los factores que afectan los resultados de la inspección incluyen el tamaño de la barra, la condición de la superficie y la resolución del dispositivo. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de ultrasonido de matriz en fase, que ha mejorado la precisión de la localización de defectos; Los sistemas de tomografía computarizada de rayos X de alta resolución son capaces de reconstruir distribuciones tridimensionales de defectos, proporcionando un análisis más detallado.

6.5.2 Equipos de ensayo de calidad dimensional y superficial

El equipo de inspección de calidad dimensional y superficial se utiliza para medir el diámetro, la longitud y la rugosidad de la superficie de las varillas de molibdeno para garantizar el cumplimiento de los requisitos estándar. El calibrador láser escanea la barra con un rayo láser y mide el diámetro y la redondez en tiempo real, lo que lo hace adecuado para la inspección en línea. El medidor de rugosidad de la superficie escanea la superficie con una sonda para evaluar el acabado y los defectos, y es adecuado para la inspección de varillas de molibdeno pulido. Los microscopios ópticos se utilizan para observar la topografía microscópica de las superficies e identificar arañazos o marcas de corrosión.

Durante el proceso de inspección, es necesario asegurarse de que el equipo esté calibrado y que el entorno sea estable para evitar errores de medición. Los factores que afectan los resultados de la inspección incluyen la precisión del equipo, la condición de la superficie de la muestra y las técnicas de manipulación. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de sistemas de inspección automatizados, que controlan las sondas a través de robots para mejorar la eficiencia de la inspección; El desarrollo de un perfilador tridimensional permite un análisis exhaustivo de la topografía de la superficie.

6.6 Equipos de producción automáticos e inteligentes para varillas de molibdeno

Los equipos de producción automatizados e inteligentes mejoran la eficiencia, la consistencia y la

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

trazabilidad de la producción de varillas de molibdeno a través de sistemas de control integrados y tecnología de análisis de datos.

6.6.1 Control automático de las líneas de producción

El sistema de control automático realiza la gestión integrada de la línea de producción a través de PLC (controlador lógico programable) o DCS (sistema de control distribuido), que cubre el manejo de materias primas, pulvimetalurgia, procesamiento térmico y tratamiento de superficies. El sistema monitorea la temperatura, la presión, el tamaño y otros parámetros en tiempo real a través de sensores, y ajusta automáticamente el estado de funcionamiento del equipo. Por ejemplo, el sistema de control de temperatura del horno de sinterización puede ajustar el perfil de calentamiento de acuerdo con las características de la palanquilla para garantizar la calidad de la sinterización; El sistema de control automático del tren de laminación regula la velocidad de laminación mediante servomotores para optimizar la precisión dimensional de las barras.

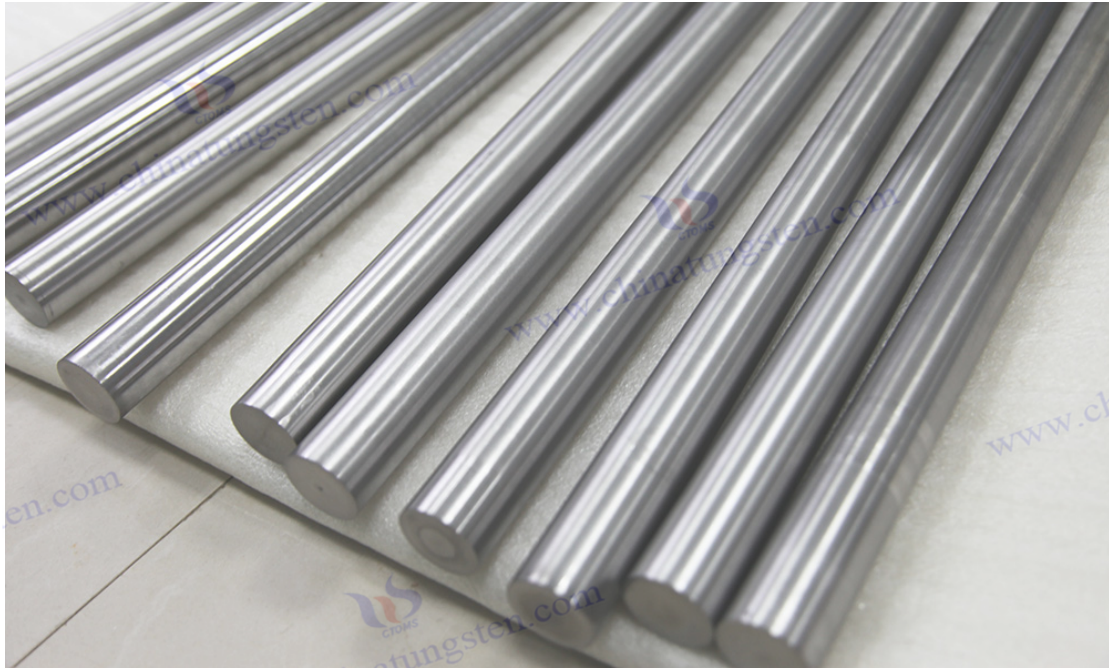
La ventaja de una línea de producción automatizada es que reduce la intervención manual y mejora la consistencia de la producción. Los factores que afectan a la eficacia de la automatización son la precisión de los sensores, los algoritmos de control y la compatibilidad de los dispositivos. El avance tecnológico incluye la aplicación del Internet industrial, que realiza la interconexión de equipos a través de la plataforma en la nube; El desarrollo de una línea de producción flexible permite el cambio rápido de la producción de varillas de molibdeno de diferentes especificaciones.

6.6.2 Monitorización inteligente y análisis de datos

El sistema inteligente de monitoreo y análisis de datos utiliza sensores, Internet de las cosas y tecnologías de inteligencia artificial para recopilar y analizar datos de producción en tiempo real para optimizar el proceso y el control de calidad. El sistema de monitoreo incluye termómetros infrarrojos, calibradores láser y espectrómetros en línea para la detección en tiempo real de la temperatura, el tamaño y la composición. El análisis de datos utiliza algoritmos de aprendizaje automático para identificar patrones anormales en la producción y predecir fallos de equipos o problemas de calidad. Por ejemplo, las fluctuaciones de temperatura durante el proceso de sinterización pueden ser analizadas por modelos de IA para ajustar los parámetros del proceso por adelantado.

Las ventajas de los sistemas inteligentes son el aumento de la eficiencia de la producción y la trazabilidad, así como la reducción de las tasas de rechazo. Los factores que afectan la eficacia del sistema incluyen la frecuencia de adquisición de datos, la precisión del algoritmo y la estabilidad de la red. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de gemelos digitales para simular el proceso de producción a través de modelos virtuales y optimizar el funcionamiento de los equipos; La introducción de la tecnología blockchain garantiza la fiabilidad y la seguridad de los datos de producción.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal



Varillas de aleación de tungsteno y molibdeno de CTIA GROUP LTD

Capítulo 7 Campos de aplicación de las varillas de molibdeno

Con su alto punto de fusión, excelentes propiedades mecánicas, buena conductividad y resistencia a la corrosión, la varilla de molibdeno ha demostrado una amplia gama de potencial de aplicación en una serie de campos de alta tecnología. Este capítulo analiza en detalle las aplicaciones de las varillas de molibdeno en hornos de alta temperatura y equipos térmicos, industrias electrónicas y de semiconductores, industrias aeroespaciales, de vidrio y cerámica, investigación médica y científica y campos emergentes, y analiza sus propiedades funcionales, requisitos de proceso y progreso tecnológico. El alto rendimiento de las varillas de molibdeno las convierte en un material ideal para que los componentes críticos cumplan con los exigentes requisitos de entornos extremos, mientras que la gama de aplicaciones continúa ampliándose a medida que avanza la tecnología, proporcionando soluciones innovadoras para la industria y la investigación.

7.1 Hornos de alta temperatura y equipos térmicos

Las varillas de molibdeno son ampliamente utilizadas en hornos de alta temperatura y equipos térmicos, especialmente en entornos que requieren alta temperatura, vacío o atmósferas inertes, y su alto punto de fusión y excelente estabilidad térmica las convierten en materiales indispensables. Las varillas de molibdeno se utilizan principalmente para elementos calefactores y piezas fijas de soporte para satisfacer las necesidades de procesamiento a alta temperatura y tratamiento térmico.

7.1.1 Varillas de molibdeno como elementos calefactores

Las varillas de molibdeno desempeñan un papel central como elementos calefactores en hornos de alta temperatura y se utilizan ampliamente en hornos de vacío, hornos de protección de hidrógeno y hornos de atmósfera inerte para procesos como la sinterización de materiales, el tratamiento térmico y el crecimiento de cristales. El alto punto de fusión y la buena conductividad eléctrica de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

la varilla de molibdeno le permiten soportar temperaturas extremadamente altas mientras mantiene una salida de calor estable. Los elementos calefactores generalmente se mecanizan en varillas alargadas o geometrías específicas para optimizar la distribución del campo térmico. Las varillas de molibdeno dopado (por ejemplo, Mo-La) se utilizan a menudo en entornos de hornos con funcionamiento a alta temperatura a largo plazo debido a su excelente resistencia a la fluencia y a la oxidación.

Durante el proceso de producción, las varillas de molibdeno se mecanizan con precisión para garantizar una superficie lisa para reducir las concentraciones de estrés térmico y funcionan en vacío o en atmósfera reductora para evitar la oxidación a alta temperatura. Los factores que afectan el rendimiento de los elementos calefactores incluyen la pureza del material, la condición de la superficie y el entorno operativo. Las trazas de impurezas pueden reducir la conductividad eléctrica, y la oxidación a alta temperatura puede causar la volatilización del material, que debe abordarse mediante recubrimiento (por ejemplo, MoSi₂) o control de la atmósfera.

Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de elementos calefactores compuestos que prolongan la vida útil mediante la aplicación de un recubrimiento antioxidante a la superficie de la varilla de molibdeno; La aplicación del sistema inteligente de control de temperatura ajusta la potencia de calefacción en tiempo real y optimiza la eficiencia energética. Además, las nuevas varillas de molibdeno dopado, como el Mo-La, mejoran la estabilidad a altas temperaturas al refinar la estructura del grano, lo que permite aplicaciones térmicas más exigentes.

7.1.2 Piezas de soporte y fijación

Las varillas de molibdeno también se utilizan en hornos de alta temperatura como componentes de soporte y fijación, como varillas de soporte, abrazaderas y pantallas térmicas, para sujetar la pieza de trabajo o protegerla contra la radiación térmica. Estos componentes deben soportar altas temperaturas y cargas mecánicas mientras mantienen la estabilidad geométrica. Las varillas de molibdeno dopado, como el TZM, son el material de elección debido a su alta resistencia y resistencia a la fluencia, lo que les permite mantener la integridad estructural durante largos períodos de tiempo a altas temperaturas. Las varillas de molibdeno de alta pureza son adecuadas para estructuras de soporte que requieren una rápida conducción de calor debido a su excelente conductividad térmica.

Los componentes de soporte deben fabricarse para garantizar la precisión dimensional y la calidad de la superficie para evitar deformaciones o grietas a altas temperaturas. El entorno operativo suele ser una atmósfera de vacío o inerte para evitar la oxidación. Los factores que afectan el rendimiento incluyen la composición del material, la tecnología de procesamiento y la frecuencia de los ciclos térmicos. Los elementos dopados pueden mejorar significativamente la resistencia a la fluencia, mientras que los ciclos térmicos pueden inducir fatiga térmica, por lo que es necesario optimizar el diseño.

Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de mecanizado de precisión, como el mecanizado CNC para garantizar formas complejas de los componentes de soporte; Las

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

tecnologías de recubrimiento de superficies, como los recubrimientos de SiC, mejoran la resistencia a la oxidación y la abrasión. Además, el diseño modular de los componentes de soporte permite un rápido desmontaje y montaje, lo que mejora la eficiencia del mantenimiento en el horno.

7.2 Industria electrónica y de semiconductores

Las varillas de molibdeno son ampliamente utilizadas en las industrias electrónica y de semiconductores debido a su alta conductividad, bajo coeficiente de expansión térmica y alta pureza, principalmente para materiales de electrodos, objetivos de pulverización catódica y componentes de tubos de vacío.

7.2.1 Materiales de los electrodos

Como material de electrodo, las varillas de molibdeno se utilizan ampliamente en la fabricación de dispositivos electrónicos, como equipos de grabado por plasma y dispositivos de electrovacío. Las varillas de molibdeno de alta pureza pueden funcionar de manera estable en entornos de alto voltaje y alta temperatura debido a su baja resistividad y excelente estabilidad química. Los electrodos generalmente se mecanizan en varillas alargadas o formas personalizadas, y la superficie debe pulirse hasta obtener un acabado alto para reducir la formación de arcos y la contaminación.

Durante el proceso de producción, las varillas de molibdeno deben someterse a un estricto control de pureza y el contenido de impurezas debe minimizarse para garantizar propiedades eléctricas estables. El entorno operativo suele ser al vacío o al gas inerte para evitar la oxidación y la contaminación de la superficie. Los factores que afectan el rendimiento de un electrodo incluyen la pureza del material, la calidad de la superficie y la temperatura de funcionamiento. Las trazas de oxígeno pueden causar corrosión del electrodo, que debe protegerse con una atmósfera de alta pureza.

Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de varillas de molibdeno de ultra alta pureza para reducir aún más las impurezas a través de un proceso de purificación de varias etapas; La aplicación de la tecnología de electropulido mejora el acabado de la superficie y reduce el riesgo de formación de arcos. Además, la optimización del diseño del electrodo mejora la uniformidad y la vida útil del electrodo al simular la distribución del campo eléctrico.

7.2.2 Objetivos de pulverización catódica

Las varillas de molibdeno se utilizan como objetivos de pulverización catódica para la producción de materiales de película delgada para circuitos integrados, células solares y pantallas planas. Debido a su alta densidad y microestructura uniforme, las varillas de molibdeno de alta pureza pueden proporcionar un flujo estable de átomos durante la pulverización catódica y garantizar la calidad de la película. Los objetivos generalmente se mecanizan en varillas redondas o rectangulares con una superficie pulida hasta un estado de espejo para reducir los defectos y la contaminación por partículas.

Las varillas de molibdeno utilizadas para producir el objetivo se someten a pulvimetalurgia y procesamiento térmico para garantizar que no haya porosidad ni inclusiones en su interior. Durante

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

la pulverización catódica, el objetivo se opera en un alto vacío para evitar la oxidación y la introducción de impurezas. Los factores que afectan el rendimiento del objetivo incluyen la pureza del material, el tamaño de grano y la condición de la superficie. Los granos finos mejoran la uniformidad de la pulverización catódica y las superficies de pulido reducen la inyección de partículas.

Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de objetivos de gran tamaño para satisfacer las necesidades de deposición de película delgada en grandes áreas; La tecnología de preparación del polvo de molibdeno de alta pureza mejora la calidad del objetivo. Además, los avances en la tecnología de reciclaje objetivo han reducido los costos de producción y el impacto ambiental a través de la purificación y el reprocesamiento químicos.

7.2.3 Tubos de vacío y componentes de la fuente de iones

Las varillas de molibdeno se utilizan como electrodos, soportes o emisores en tubos de vacío y fuentes de iones, y se utilizan en equipos como microscopios electrónicos y espectrómetros de masas. Las varillas de molibdeno de alta pureza son adecuadas como materiales emisores debido a su bajo trabajo de escape de electrones y alta conductividad. Las varillas de molibdeno dopado se utilizan para estructuras de soporte debido a su estabilidad a altas temperaturas. Las piezas deben mecanizarse en formas complejas y pulir superficies para reducir la dispersión de electrones.

Durante el proceso de producción, las varillas de molibdeno se mecanizan y limpian con precisión para garantizar que estén libres de contaminantes. El entorno operativo es de ultra alto vacío, lo que evita la oxidación o descarga del electrodo. Los factores que afectan el rendimiento incluyen el acabado de la superficie, la pureza del material y el voltaje de funcionamiento. Los defectos de la superficie pueden causar arcos eléctricos y deben eliminarse mediante electropulido.

Los avances tecnológicos incluyen la tecnología de procesamiento de varillas de micromolibdeno para satisfacer las necesidades de los dispositivos microelectrónicos; El nano-recubrimiento de la superficie mejora la resistencia al arco. Además, la tecnología de ensamblaje automatizado mejora la precisión y la consistencia de la fabricación de las piezas a través de la operación robótica.

7.3 Aeroespacial

Las varillas de molibdeno son las preferidas en la industria aeroespacial debido a su alta resistencia, alto punto de fusión y baja densidad, y se utilizan principalmente en piezas estructurales de alta temperatura y componentes del sistema de propulsión.

7.3.1 Piezas estructurales de alta temperatura

Las varillas de molibdeno se utilizan en la industria aeroespacial como piezas estructurales de alta temperatura, como álabes de turbinas de motores a reacción, pantallas térmicas y conectores. Las varillas de molibdeno dopado, como el TZM, son capaces de mantener la estabilidad estructural a temperaturas extremadamente altas debido a su excelente resistencia a altas temperaturas y a la fluencia. Las piezas estructurales están forjadas y mecanizadas con precisión para garantizar la precisión dimensional y las altas propiedades mecánicas.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Durante el proceso de producción, las varillas de molibdeno deben procesarse y usarse en vacío o atmósfera inerte para evitar la oxidación a alta temperatura. Los factores que afectan el rendimiento incluyen la composición del material, la tecnología de procesamiento y el entorno operativo. Los elementos dopados mejoran significativamente la resistencia a la fluencia, pero la oxidación a alta temperatura debe abordarse mediante la protección del recubrimiento.

El progreso tecnológico incluye la aplicación de la tecnología de forja isotérmica, que mejora la uniformidad del grano de las piezas estructurales; Los recubrimientos antioxidantes (por ejemplo, MoSi_2) prolongan la vida útil de los componentes. Además, la combinación de materiales compuestos y varillas de molibdeno mejora el rendimiento general a través de un diseño en capas.

7.3.2 Componentes del sistema de propulsión

Las varillas de molibdeno se utilizan en sistemas de propulsión para fabricar toberas, revestimientos de cámaras de combustión y componentes de cámaras de empuje, que están sujetos a cargas mecánicas y de gas a alta temperatura. Las varillas de molibdeno TZM y Mo-La son ideales debido a su alto punto de fusión y resistencia al choque térmico. Los componentes se mecanizan térmicamente y se mecanizan con precisión para garantizar formas complejas y alta precisión.

Durante el proceso de producción, las varillas de molibdeno se procesan a altas temperaturas y se aplica un recubrimiento antioxidante para prolongar su vida útil. Los factores que afectan el rendimiento incluyen el ciclo térmico, la corrosión por gas y el estrés mecánico. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de fabricación aditiva para aumentar la libertad de diseño a través de la impresión 3D de piezas de aleación de molibdeno; El desarrollo de la tecnología de recubrimiento de alta temperatura ha mejorado la resistencia a la corrosión.

7.4 Industria del vidrio y la cerámica

Las varillas de molibdeno se utilizan ampliamente en la industria del vidrio y la cerámica debido a su resistencia a la corrosión a alta temperatura y estabilidad química, y se utilizan principalmente para electrodos de fusión de vidrio y soportes de sinterización de cerámica.

7.4.1 Electrodos de fusión de vidrio

Las varillas de molibdeno se utilizan como electrodos de fusión de vidrio en hornos de fusión de vidrio y pueden funcionar de manera estable en vidrio fundido a alta temperatura. Las varillas de molibdeno de alta pureza son adecuadas como materiales de electrodo debido a su excelente conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión. Los electrodos deben mecanizarse en una forma específica y limpiar la superficie para eliminar los óxidos y evitar la contaminación del vidrio fundido.

Durante el proceso de producción, las varillas de molibdeno deben operarse en una atmósfera reductora para evitar la oxidación y la volatilización. Los factores que afectan el rendimiento incluyen la composición del vidrio, la temperatura de funcionamiento y la condición de la superficie del electrodo. El vidrio alcalino puede causar corrosión en los electrodos y es necesario optimizar la selección del material. Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de electrodos Mo-La, que

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

mejoran la resistencia a la corrosión; El sistema automatizado de montaje de electrodos aumenta la productividad.

7.4.2 Soportes cerámicos de sinterización

Las varillas de molibdeno se utilizan como varillas de soporte o accesorios en hornos de sinterización de cerámica para soportar el proceso de sinterización de cuerpos cerámicos a altas temperaturas. Las varillas de molibdeno dopado son estables a altas temperaturas debido a su alta resistencia y resistencia a la fluencia. Los soportes deben mecanizarse en formas complejas y pulir la superficie para reducir la adherencia a la cerámica.

Durante el proceso de producción, las varillas de molibdeno deben funcionar en vacío o en atmósfera de hidrógeno para evitar la oxidación. Los factores que afectan el rendimiento incluyen la temperatura de sinterización, la atmósfera y el diseño del soporte. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de recubrimientos cerámicos, que reducen la reacción de las varillas de molibdeno con la cerámica; El diseño de soporte modular mejora la eficiencia de carga en el horno.

7.5 Investigación médica y científica

Las varillas de molibdeno se utilizan en aplicaciones de investigación médica y científica debido a su alta pureza y excelente rendimiento, y se utilizan principalmente en objetivos de tubos de rayos X y equipos de laboratorio de alta temperatura.

7.5.1 Objetivos de tubo de rayos X

Las varillas de molibdeno se utilizan como objetivos o estructuras de soporte en tubos de rayos X debido a su alto punto de fusión y bajo coeficiente de expansión térmica, lo que les permite soportar las altas temperaturas generadas por el bombardeo de electrones. Las varillas de molibdeno de alta pureza se mecanizan con precisión en objetivos y la superficie se pule hasta un estado de espejo para reducir la dispersión. Las impurezas deben controlarse estrictamente durante el proceso de producción para garantizar la calidad de las imágenes.

En el entorno operativo, el objetivo se somete a un ciclo térmico rápido para evitar fallas por fatiga térmica. Los factores que influyen en el rendimiento incluyen la calidad de la superficie, la conductividad térmica y la potencia de funcionamiento. Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de objetivos compuestos a base de molibdeno, que han mejorado la vida útil a la fatiga térmica; La tecnología de procesamiento láser mejora la precisión geométrica del objetivo.

7.5.2 Equipos experimentales de laboratorio de alta temperatura

Las varillas de molibdeno se utilizan como elementos calefactores, varillas de soporte o electrodos en equipos de laboratorio de alta temperatura para pruebas de materiales y crecimiento de cristales. La varilla de molibdeno de alta pureza es adecuada para experimentos de alta precisión debido a su estabilidad química; Las varillas de molibdeno dopado se utilizan en escenarios donde se requiere una alta resistencia. Las piezas se mecanizan y limpian con precisión para garantizar que estén libres de contaminación.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

El entorno operativo suele ser una atmósfera de vacío o inerte para evitar la oxidación. Los factores que afectan el rendimiento incluyen el control de temperatura, el diseño de los componentes y la pureza del material. Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de varillas de molibdeno en miniatura para satisfacer las necesidades de pequeños dispositivos experimentales; La aplicación de un sistema inteligente de control de temperatura ha mejorado la precisión del experimento.

7.6 Aplicaciones emergentes

La aplicación de varillas de molibdeno en campos emergentes se está expandiendo, especialmente en la impresión 3D y la industria nuclear, mostrando un gran potencial.

7.6.1 Impresión 3D y fabricación aditiva

Las varillas de molibdeno se utilizan como materias primas o estructuras de soporte en la impresión 3D y la fabricación aditiva para la creación rápida de prototipos de piezas de alto rendimiento. El polvo de molibdeno se funde y se deposita por láser o haz de electrones para producir piezas de aleación de molibdeno con formas complejas, adecuadas para aplicaciones aeroespaciales y médicas. Las varillas de molibdeno también se pueden utilizar como material de soporte para soportar entornos de impresión de alta temperatura.

Durante el proceso de producción, es necesario controlar la calidad del polvo y la atmósfera de impresión para evitar oxidación y defectos. Los factores que afectan al rendimiento incluyen los parámetros de impresión, el tamaño de partícula de polvo y el proceso de posprocesamiento. Los avances tecnológicos incluyen la preparación de polvo de molibdeno de alta pureza, que mejora la calidad de la impresión; La aplicación de la tecnología de impresión multimaterial realiza el moldeo compuesto de molibdeno y otros metales.

7.6.2 Aplicaciones de la industria nuclear

Las barras de molibdeno se utilizan en la industria nuclear para componentes de alta temperatura de reactores y materiales de protección contra la radiación debido a su alto punto de fusión y resistencia a la radiación. Las barras de molibdeno Mo-W son adecuadas para entornos de reactores nucleares debido a su excelente resistencia a la corrosión y resistencia a altas temperaturas. Los componentes están mecanizados y recubiertos con precisión para garantizar un funcionamiento estable a largo plazo.

El entorno operativo implica altas temperaturas y una fuerte radiación, y las propiedades del material deben controlarse estrictamente. Los factores que afectan el rendimiento incluyen el daño por radiación, la temperatura y la composición del material. Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de aleaciones de molibdeno resistentes a la radiación, que han mejorado la vida útil de los componentes; La aplicación de la tecnología de fabricación aditiva optimiza la fabricación de piezas complejas.



Varillas de molibdeno CTIA GROUP LTD

Capítulo 8 Normas y especificaciones nacionales y extranjeras para varillas de molibdeno

Como material metálico refractario de alto rendimiento, la producción, prueba y aplicación de varillas de molibdeno deben seguir estrictos estándares y especificaciones para garantizar la consistencia de la calidad, la confiabilidad del rendimiento y la seguridad de uso. Este capítulo analiza en detalle las normas internacionales, las normas nacionales, los requisitos de certificación y cumplimiento de las varillas de molibdeno, así como la comparación y el análisis de escenarios de aplicación de normas nacionales y extranjeras. Estas normas brindan apoyo técnico para la aplicación de varillas de molibdeno en la industria aeroespacial, electrónica, del vidrio y otros campos, y al mismo tiempo promueven la estandarización del comercio mundial y los intercambios técnicos. Al comprender e implementar estos estándares, los fabricantes pueden optimizar sus procesos para satisfacer las necesidades de los clientes y garantizar la competitividad de sus productos en los mercados nacionales e internacionales.

8.1 Normas internacionales para varillas de molibdeno

Las normas internacionales proporcionan un marco técnico unificado para la producción, las pruebas y la aplicación de varillas de molibdeno, que se utilizan ampliamente en las cadenas de suministro mundiales y en la cooperación transfronteriza. Desarrolladas principalmente por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) y la Organización Internacional de Normalización (ISO), las normas internacionales cubren la composición química, las propiedades mecánicas, las tolerancias dimensionales y los métodos de prueba de las varillas de molibdeno, proporcionando un punto de referencia de calidad para el mercado global.

8.1.1 Normas ASTM (ASTM B387, etc.)

La norma ASTM es la especificación autorizada del mundo para la producción y prueba de varillas

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

de molibdeno, y es ampliamente utilizada en industrias de alta tecnología en América del Norte, Europa y Asia. Entre ellos, ASTM B387-18 es el estándar básico para varillas, barras y alambres de molibdeno y aleaciones de molibdeno, que especifica en detalle los requisitos técnicos para varillas de molibdeno de alta pureza y varillas de molibdeno dopado (como TZM y Mo-La). La norma requiere que el contenido de molibdeno de la varilla de molibdeno de alta pureza $\geq 99.95\%$, y las impurezas (como $\text{Fe} < 0.01\%$, $\text{C} < 0.005\%$, $\text{O} < 0.003\%$) deben controlarse estrictamente para garantizar la estabilidad del rendimiento en entornos corrosivos y de alta temperatura. En términos de propiedades mecánicas, la norma requiere que la resistencia a la tracción de la varilla de molibdeno de alta pureza sea de 600 a 800 MPa a temperatura ambiente, y la resistencia a la tracción de la varilla TZM es de 900 a 1100 MPa, y la prueba debe realizarse a $20 \pm 5^\circ\text{C}$ de acuerdo con ASTM E8 / E8M (prueba de tracción). La calidad de la superficie se divide en varilla negra ($\text{Ra} < 3.2 \mu\text{m}$), varilla de pulido ($\text{Ra} < 0.8 \mu\text{m}$) y varilla de limpieza para satisfacer las diferentes necesidades de la industria aeroespacial, electrónica y otros campos. Las tolerancias dimensionales requieren una desviación de diámetro de $\pm 0.05 \text{ mm}$ y una desviación de longitud de $\pm 1 \text{ mm}$ para garantizar un mecanizado y ensamblaje de precisión.

Las normas ASTM también incluyen especificaciones complementarias como ASTM E9-19 (prueba de compresión), ASTM E139-11 (prueba de fluencia) y ASTM G54-14 (prueba de resistencia a la oxidación) para proporcionar una guía sistemática para evaluar el rendimiento de las varillas de molibdeno. Los fabricantes deben verificar la conformidad del producto mediante análisis químicos (p. ej., ICP-MS, precisión de detección de 0.001%), observación microestructural (tamaño de grano de 10 a $50 \mu\text{m}$) y pruebas no destructivas (p. ej., ultrasónicos, 5 MHz). La fortaleza de la norma ASTM radica en su amplitud y aplicabilidad internacional, que es aplicable a las industrias aeroespacial, de semiconductores y de hornos de alta temperatura. Los factores que influyen en la implementación de la norma incluyen la precisión del equipo de prueba (por ejemplo, resolución de carga de la máquina de prueba universal de 0.01 kN), la especificación de la preparación de la muestra (por ejemplo, pulido de superficies $\text{Ra} < 0.8 \mu\text{m}$) y el control ambiental (por ejemplo, vacío $< 10^{-3} \text{ Pa}$). Los avances tecnológicos incluyen actualizaciones periódicas de las normas ASTM, nuevas especificaciones para aleaciones Mo-W y varillas de molibdeno en miniatura ($< 1 \text{ mm}$ de diámetro) y soporte para técnicas de prueba in situ como el análisis de grietas en tiempo real SEM.

8.1.2 Normas ISO

Las normas ISO proporcionan una especificación común para el comercio internacional y la aplicación de varillas de molibdeno, centrándose en la trazabilidad del material y la consistencia global. Aunque ISO aún no ha desarrollado un estándar específico para las varillas de molibdeno, sus estándares relacionados se utilizan ampliamente en las pruebas de rendimiento de las varillas de molibdeno. Por ejemplo, la norma ISO 6892-1:2019 especifica un método de ensayo de tracción para metales, que requiere una velocidad de ensayo de $0.5\text{--}5 \text{ mm/min}$, que es adecuado para evaluar la resistencia a la tracción y el alargamiento de las varillas de molibdeno; La norma ISO 6506-1:2014 regula el ensayo de dureza Brinell y es aplicable a la evaluación de la dureza de varillas de molibdeno (HB 200-300). Las normas ISO exigen que los fabricantes proporcionen informes de análisis de composición química para garantizar que los niveles de impurezas (por ejemplo, $\text{O} < 0.005\%$) cumplan con los requisitos y para garantizar la comparabilidad internacional de los

resultados a través de procedimientos de prueba estandarizados.

La implementación de las normas ISO es verificada por organismos de certificación de terceros (por ejemplo, SGS, TÜV) e implica análisis químicos, pruebas mecánicas y pruebas de calidad de superficies. La norma hace hincapié en los controles ambientales durante la producción, como el vacío o las atmósferas inertes (punto de rocío $<-40^{\circ}\text{C}$), para evitar la oxidación y la contaminación. Los factores que influyen en la implementación de las normas ISO incluyen la calificación de los laboratorios de prueba (por ejemplo, la certificación ISO/IEC 17025), la estandarización de los métodos de prueba y la armonización internacional. El progreso tecnológico incluye el reconocimiento mutuo de las normas ISO con ASTM y GB/T, lo que simplifica el proceso de certificación transfronteriza; La plataforma de certificación digital mejora la eficiencia a través de la presentación de datos y la auditoría en línea. Además, las normas ISO están incorporando gradualmente requisitos medioambientales, como la reducción de las emisiones de escape ($\text{SO}_2 < 10 \text{ ppm}$), para guiar a los fabricantes en la optimización de sus procesos.

8.2 Normas nacionales para varillas de molibdeno

Como el mayor productor mundial de productos de molibdeno, China ha desarrollado una serie de normas nacionales que abarcan la producción, las pruebas y la aplicación de varillas de molibdeno. Estas normas incluyen normas nacionales (GB/T) y normas de la industria para garantizar que se satisfagan las necesidades del mercado interno y se apoye la cooperación internacional.

8.2.1 GB/T estándar (GB/T 3462, etc.)

El estándar GB / T es la especificación central para la producción y aplicación de varillas de molibdeno en China, y GB / T 3462-2017 es el estándar principal para varillas de molibdeno y barras de molibdeno, que estipula los requisitos técnicos para varillas de molibdeno de alta pureza y varillas de molibdeno dopadas. La norma requiere que el contenido de molibdeno $\geq 99.95\%$ y las impurezas se controlen a $\text{Fe} < 0.01\%$, $\text{C} < 0.005\%$ y $\text{O} < 0.003\%$ para garantizar el rendimiento a alta temperatura. Las propiedades mecánicas se prueban para la resistencia a la tracción (600-800 MPa para varillas de molibdeno de alta pureza y 900-1100 MPa para varillas TZM), límite elástico y alargamiento (10-20% para varillas de molibdeno de alta pureza), que deben realizarse a temperatura ambiente o alta temperatura (800-1200 $^{\circ}\text{C}$) de acuerdo con GB/T 228.1-2021. El estado de la superficie se divide en varilla negra ($\text{Ra} < 3.2 \mu\text{m}$), varilla de pulido ($\text{Ra} < 0.8 \mu\text{m}$) y varilla de limpieza, y la tolerancia dimensional requiere una desviación del diámetro de $\pm 0.05 \text{ mm}$ y una desviación de la longitud de $\pm 1 \text{ mm}$, que es adecuada para el mecanizado de precisión.

La norma GB/T también incluye especificaciones de apoyo, como GB/T 2039-2012 (prueba de fluencia, 1200-1800 $^{\circ}\text{C}$), GB/T 13303-1991 (prueba de oxidación, 600-1200 $^{\circ}\text{C}$) y GB/T 7314-2017 (prueba de compresión), para proporcionar orientación para la evaluación del rendimiento. Los fabricantes deben verificar el cumplimiento mediante análisis químicos (ICP-MS, 0,001% de precisión), ensayos no destructivos (ultrasonicos, 5 MHz) y observación microestructural (tamaño de grano de 10 a 50 μm). La ventaja del estándar GB/T es que se adapta al sistema industrial de China, es altamente compatible con los estándares ASTM y es fácil de exportar. Los factores que influyen en la implementación de la norma incluyen la precisión del equipo (por ejemplo, la

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

resolución de carga de la máquina de pruebas hidráulicas de 0,01 kN), el control del entorno de prueba (por ejemplo, el nivel de vacío $<10^{-3}$ Pa) y el nivel de gestión de la calidad de la empresa. Los avances técnicos incluyen la revisión de la norma GB/T, la adición de especificaciones para Mo-La y varillas de molibdeno en miniatura (< 1 mm de diámetro); Los sistemas de inspección automatizados, como los calibradores láser con una precisión de 0,01 mm, aumentan la eficiencia de la ejecución.

8.2.2 Estándares de la industria y estándares de la empresa

Los estándares de la industria son formulados por la Asociación de la Industria de Metales No Ferrosos de China o comités técnicos, y se presentan requisitos detallados para escenarios de aplicación específicos. Por ejemplo, YS/T 495-2005 (estándar de la industria para metales no ferrosos) estipula la resistencia a la corrosión de las varillas de molibdeno en hornos de fusión de vidrio, que requieren una tasa de oxidación de $<0,2$ mg/cm²·h en sales fundidas a alta temperatura; Los estándares de la industria de semiconductores pueden requerir una rugosidad superficial de Ra $<0,4$ μm. Estas normas complementan las normas GB/T y cubren detalles técnicos en la industria del vidrio, aeroespacial y otros campos.

Las normas corporativas son establecidas por los grandes productores y suelen ser más estrictas que las normas nacionales. Por ejemplo, una norma corporativa puede requerir un contenido de molibdeno de $\geq 99,97\%$ y una tolerancia dimensional de $\pm 0,02$ mm para satisfacer las necesidades de los clientes de gama alta. El estándar de la empresa también incluye procesos internos de control de calidad, como el cribado de materias primas (impurezas $< 0,005\%$), la optimización del proceso de sinterización (densidad $> 99\%$ de densidad teórica) y las especificaciones de tratamiento de superficies (Ra $<0,4$ μm). Los factores que influyen en la implementación de la norma incluyen la demanda del mercado, las capacidades técnicas y los requisitos de los clientes. El progreso tecnológico incluye el acoplamiento de las normas empresariales con las normas internacionales, la simplificación de la certificación de las exportaciones; El sistema de gestión de calidad digital mejora la eficiencia de la implementación estándar a través de la adquisición de datos en tiempo real (frecuencia 1 kHz).

8.3 Certificación y conformidad de las varillas de molibdeno

La certificación y el cumplimiento son una parte clave para garantizar la calidad y la seguridad de las varillas de molibdeno, lo que implica el proceso de certificación de materiales y los requisitos de cumplimiento ambiental y de seguridad para garantizar que los productos cumplan con los estándares, leyes y regulaciones nacionales y extranjeras.

8.3.1 Proceso de certificación de materiales

El proceso de calificación de materiales se utiliza para verificar que las varillas de molibdeno cumplen con los requisitos de la norma, lo que garantiza su confiabilidad en los campos aeroespacial, electrónico y otros. La certificación la lleva a cabo una organización externa (por ejemplo, SGS, TÜV) o un laboratorio nacional de certificación (por ejemplo, el Centro Nacional de Supervisión e Inspección de Calidad de Metales No Ferrosos de China) y cubre las pruebas de composición química, propiedades mecánicas, calidad de la superficie y precisión dimensional. El proceso

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

incluye: el fabricante envía muestras y registros de producción (incluidos lotes de materias primas, parámetros de proceso, datos de control de calidad); Análisis químico (p. ej., ICP-MS, detección de Fe, C, O, precisión 0,001 %), ensayos mecánicos (p. ej., tracción, velocidad de 0,5 a 5 mm/min), ensayos no destructivos (p. ej., ultrasónicos, 5 MHz) y medición dimensional (calibrador láser, precisión 0,01 mm); Finalmente, se emite un informe de certificación para demostrar el cumplimiento de las normas ASTM B387, GB/T 3462 o del cliente.

La certificación es necesaria para garantizar la representatividad de la muestra y la repetibilidad de la prueba. Los factores que influyen en los resultados incluyen la calidad de la preparación de la muestra (p. ej., Ra pulido <0,8 μ m), la precisión del dispositivo y las calificaciones institucionales. El progreso tecnológico incluye el desarrollo de un sistema de certificación en línea, la carga en tiempo real de datos de prueba y el acortamiento del ciclo de certificación; La aplicación de la tecnología blockchain garantiza la trazabilidad de los datos y la protección contra manipulaciones.

8.3.2 Cumplimiento ambiental y de seguridad

El cumplimiento ambiental y de seguridad requiere que la producción de varillas de molibdeno cumpla con las regulaciones ambientales y los estándares de seguridad para reducir el impacto en el medio ambiente y el cuerpo humano. El cumplimiento ambiental implica el tratamiento de gases residuales, aguas residuales y residuos sólidos en el proceso de producción. Por ejemplo, las emisiones de SO₂ (<10 ppm) deben controlarse durante el proceso de tostado, y las aguas residuales deben neutralizarse (pH 6-9) antes de su descarga, de acuerdo con la Ley de Protección Ambiental y GB 25466-2010 (estándar de descarga de contaminantes industriales de metales no ferrosos). El cumplimiento de la seguridad requiere que los equipos de producción estén equipados con dispositivos de protección (por ejemplo, sistemas de protección contra explosiones para hornos de alta temperatura) y capacitación en seguridad para los operadores.

Los factores que influyen en el cumplimiento incluyen los procesos de producción, las tecnologías de tratamiento de residuos y la solidez regulatoria. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de tecnologías de producción verde, como la purificación húmeda para reducir las emisiones de escape; El sistema de monitorización inteligente monitoriza las emisiones y los parámetros de seguridad en tiempo real mediante sensores (frecuencia 1 kHz). Además, la implementación del sistema de gestión ambiental ISO 14001 ayuda a las empresas a optimizar sus procesos de cumplimiento.

8.4 Comparación estándar y análisis de escenarios de aplicación de varillas de molibdeno

El análisis comparativo de las normas nacionales y extranjeras ayuda a los fabricantes a seleccionar las normas adecuadas para satisfacer las necesidades de los diferentes escenarios de aplicación. ASTM B387 y GB/T 3462 son altamente consistentes en términos de composición química (contenido de molibdeno $\geq 99,95\%$), propiedades mecánicas (resistencia a la tracción 600-1100 MPa) y tolerancias dimensionales ($\pm 0,05$ mm), pero ASTM B387 se centra más en aplicaciones internacionales y cubre más varillas de molibdeno dopadas (como Mo-W), mientras que GB/T 3462 es más adecuada para el sistema industrial chino y hace hincapié en la rentabilidad. Las normas ISO, como la ISO 6892-1, se centran en la estandarización de los métodos de ensayo y son adecuadas

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

para la certificación transfronteriza, pero carecen de especificaciones específicas para las varillas de molibdeno.

Los escenarios aplicables se analizan de la siguiente manera:

Aeroespacial: ASTM B387 es más adecuado para componentes estructurales y de sistemas de propulsión a alta temperatura debido a sus estrictos requisitos de rendimiento a alta temperatura (tasa de fluencia $<10^{-5}/h$, $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$) y precisión dimensional ($\pm 0,02\text{ mm}$).

Electrónica y semiconductores: ASTM B387 y GB/T 3462 son aplicables y requieren alta pureza ($\geq 99,97\%$) y acabado superficial ($Ra < 0,4\text{ }\mu\text{m}$), ISO 6892-1 para la verificación de pruebas de tracción.

Industria del vidrio: GB/T 3462 es más común porque es adecuado para fundir electrodos debido a sus requisitos anticorrosivos (tasa de oxidación $< 0,2\text{ mg/cm}^2\cdot h$) y el costo es menor.

Campos emergentes (impresión e.g. 3D): ASTM B387 es más adecuado, soporta nuevas aleaciones de molibdeno y micro barras ($< 1\text{ mm}$ de diámetro).

Los factores que influyen en la selección de estándares incluyen el entorno de la aplicación, los requisitos del cliente y el costo. El progreso tecnológico incluye el establecimiento de un mecanismo de reconocimiento mutuo de normas para reducir la duplicación de certificaciones; El desarrollo de una base de datos estándar digital facilita la consulta y comparación rápidas.



Varillas de molibdeno negro CTIA GROUP LTD

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Rods Introduction

1. Overview of Molybdenum Rods

Molybdenum rods are high-performance metal materials made from high-purity molybdenum powder through pressing, sintering, forging, and drawing processes. They possess excellent high-temperature performance, thermal conductivity, and chemical stability. These rods are widely used in advanced technological fields such as metallurgy, electronics, glass, aerospace, and nuclear energy, making them one of the key functional materials in modern industrial high-temperature environments.

2. Main Application Fields of Molybdenum Rods

- Heating elements and support rods for high-temperature electric furnaces
- Diffusion tubes and wafer carriers in the semiconductor industry
- Electrodes and targets for vacuum coating equipment
- High-temperature components in nuclear reactors and aircraft engines
- Electrode rods and heat-resistant fixtures in the glass industry
- Medical devices and X-ray targets
- High-temperature experimental materials and components in scientific research

3. Classification of Molybdenum Rods (by purity)

Category	Description	Typical Applications
High-Purity Moly Rods	Purity $\geq 99.95\%$, extremely low impurity levels	Electronics, semiconductors, research equipment
Industrial-Grade Rods	Purity around 99.90%, cost-effective	Electric heating, glass, metallurgical equipment
Doped Moly Rods	Doped with La, Ti, Zr, etc., for enhanced performance	High-temperature structural parts, TZM alloy applications

4. Typical Specifications of Molybdenum Rods from CTIA GROUP LTD

Item	Value Range
Density	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$
Hardness (HV30)	160 – 250 HV
Tensile Strength (Rm/MPa)	$\geq 590 \text{ MPa}$
Yield Strength (Rp0.2/MPa)	$\geq 490 \text{ MPa}$
Elongation after fracture (A/%)	10–25%
Diameter Range	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$, Customizable
Length Range	10 mm – 2000 mm, Customizable

5. 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

Capítulo 9 Procesamiento, uso y mantenimiento de varillas de molibdeno

Las varillas de molibdeno son ampliamente utilizadas en la industria aeroespacial, electrónica, del vidrio y otros campos exigentes debido a su alto punto de fusión, excelentes propiedades mecánicas y estabilidad química. Su procesamiento, uso y mantenimiento involucran tecnologías y procesos complejos, que afectan directamente su rendimiento y vida útil. Este capítulo analiza en detalle la tecnología de procesamiento, los requisitos ambientales, los métodos de instalación y fijación, los procedimientos de mantenimiento y limpieza, y las especificaciones de operación segura de las varillas de molibdeno. A través de la tecnología de procesamiento científico, el diseño del entorno de uso razonable, la instalación y el mantenimiento estandarizados y la operación de seguridad estricta, se puede maximizar el rendimiento de la varilla de molibdeno, se puede prolongar la vida útil y se puede garantizar la seguridad de la operación. Estos contenidos proporcionan una guía técnica completa para que los fabricantes y los usuarios utilicen de manera confiable las varillas de molibdeno en una variedad de entornos exigentes.

9.1 Tecnología de procesamiento de varillas de molibdeno

La tecnología de procesamiento de las varillas de molibdeno es clave para garantizar que satisfagan las necesidades de aplicaciones específicas, que involucran procesos como el corte, el mecanizado y la soldadura y unión. Estos procesos se llevan a cabo en equipos de alta precisión y las condiciones de procesamiento están estrictamente controladas para evitar daños materiales o deterioro del rendimiento.

9.1.1 Corte (corte por hilo, corte por láser)

El corte es el primer proceso en el procesamiento de varillas de molibdeno y se utiliza para procesar las varillas en la longitud o forma deseada. La electroerosión por hilo es un método de corte comúnmente utilizado que utiliza chispas eléctricas de alta frecuencia para producir material fundido localizado a alta temperatura en la superficie de una varilla de molibdeno y cortar con precisión alambres metálicos como alambres de cobre o molibdeno. La electroerosión por hilo es adecuada para el mecanizado de formas complejas o varillas de molibdeno de pequeño diámetro con alta precisión (tolerancia $\pm 0,01$ mm) y una superficie lisa ($Ra < 1,6 \mu m$). El agua desionizada se utiliza como medio de enfriamiento durante el proceso de procesamiento para evitar la oxidación a alta temperatura, y el equipo debe estar equipado con un sistema CNC de alta precisión para controlar la trayectoria de corte.

El corte por láser es otro método altamente eficiente que utiliza un rayo láser de alta energía, como los láseres YAG o CO₂, para derretir o vaporizar la superficie de las varillas de molibdeno, lo que lo hace adecuado para el corte rápido de varillas de molibdeno grandes o de paredes gruesas. El corte por láser tiene la ventaja de ser sin contacto y de alta velocidad, pero puede crear una zona afectada por el calor (HAZ) en el área de corte, que debe eliminarse mediante un pulido posterior. El proceso de corte se lleva a cabo bajo la protección de un gas inerte como el nitrógeno o el argón para evitar la oxidación.

Los factores que afectan la calidad del corte incluyen la velocidad de corte, la condición de la

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

superficie de la pieza de trabajo y las condiciones de enfriamiento. Las velocidades de corte demasiado rápidas pueden provocar grietas o superficies rugosas, y la capa de óxido de la superficie debe eliminarse de forma preventiva para mejorar la precisión. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de corte láser ultrarrápido para reducir la zona afectada por el calor; El sistema de corte automatizado mejora la consistencia del procesamiento al monitorear la trayectoria de corte en tiempo real.

9.1.2 Mecanizado (torneado, fresado, taladrado)

El mecanizado se utiliza para terminar aún más las varillas de molibdeno para cumplir con los requisitos complejos de forma y tamaño, incluidos el torneado, el fresado y el taladrado. El torneado utiliza un torno CNC para mecanizar varillas de molibdeno con diámetros exactos o geometrías específicas, utilizando herramientas de carburo como WC-Co para hacer frente a la alta dureza del molibdeno. El mecanizado debe realizarse a bajas velocidades y avances altos, con refrigerante (por ejemplo, emulsión a base de agua) para reducir la temperatura de corte y evitar el desgaste de la herramienta y daños en la superficie de la pieza de trabajo. La rugosidad de la superficie después del torneado puede alcanzar $Ra < 0,8 \mu m$, lo que lo hace adecuado para aplicaciones electrónicas y aeroespaciales.

El fresado se utiliza para mecanizar planos, ranuras o contornos complejos de varillas de molibdeno, utilizando fresadoras CNC y herramientas recubiertas de diamante para garantizar una alta precisión y calidad de la superficie. Las vibraciones deben controlarse durante el proceso de molienda para evitar microfisuras. La perforación se utiliza para procesar orificios pasantes o orificios ciegos en varillas de molibdeno, y a menudo se usa para fabricar electrodos o conectores, lo que requiere el uso de brocas de acero o carburo cementado de alta velocidad, y con accesorios de alta precisión para garantizar la precisión de la posición del orificio.

Los factores que afectan la calidad del mecanizado incluyen el material de la herramienta, los datos de corte y cómo se sujeta la pieza de trabajo. La fragilidad del molibdeno requiere bajas velocidades de corte y el desgaste de la herramienta debe revisarse regularmente para mantener la precisión del mecanizado. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de tecnología de mecanizado de ultraprecisión, como máquinas herramienta CNC de cinco ejes para mejorar la capacidad de procesar formas complejas; Desarrollo de la tecnología de corte en seco para reducir la contaminación ambiental mediante el enfriamiento con gas inerte.

9.1.3 Tecnología de soldadura y unión

Las técnicas de soldadura y unión se utilizan para conectar varillas de molibdeno a otros componentes o varillas de molibdeno, que se encuentran comúnmente en hornos de alta temperatura y equipos electrónicos. La soldadura por haz de electrones (EBW) es el método principal que utiliza un haz de electrones de alta energía para fundir varillas de molibdeno en un entorno de vacío para formar una soldadura de alta resistencia. El entorno de vacío ($< 10^{-3}$ Pa) evita la oxidación y la calidad del cordón de soldadura es alta, lo que lo hace adecuado para componentes aeroespaciales. La soldadura con gas inerte de tungsteno (TIG) también se usa comúnmente para la soldadura de varillas de molibdeno, utilizando protección contra argón o helio, adecuada para entornos sin vacío,

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

pero la temperatura de soldadura debe controlarse para evitar el crecimiento de granos.

La tecnología de unión también incluye conexiones mecánicas (por ejemplo, uniones roscadas, remaches) y soldadura fuerte. La conexión mecánica requiere roscas o orificios en la superficie de la varilla de molibdeno, lo que requiere un mecanizado de alta precisión para garantizar la resistencia de la conexión. La soldadura fuerte utiliza metales de aporte para soldadura fuerte a alta temperatura (por ejemplo, aleaciones a base de Ni o Ag) que se llevan a cabo en una atmósfera de vacío o hidrógeno y son adecuados para unir varillas de molibdeno con materiales diferentes (por ejemplo, cerámicas). Los factores que afectan la calidad de las soldaduras y uniones incluyen el control de la atmósfera, la temperatura de la soldadura y el diseño de la unión. Las trazas de oxígeno pueden causar la oxidación de la soldadura, y el punto de rocío de la atmósfera ($<-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) debe controlarse estrictamente.

Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de soldadura láser para controlar con precisión la entrada de calor y reducir la zona afectada por el calor; La introducción de la tecnología de pruebas ultrasónicas para monitorear la calidad de las soldaduras en tiempo real. Además, el desarrollo de un nuevo metal de soldadura fuerte ha mejorado la fuerza de conexión entre la varilla de molibdeno y la cerámica para satisfacer las necesidades de componentes complejos de alta temperatura.

9.2 Requisitos medioambientales para el uso de varillas de molibdeno

El entorno en el que se utilizan las varillas de molibdeno tiene un impacto significativo en su rendimiento y vida útil, y es necesario seleccionar la atmósfera y las medidas de protección adecuadas de acuerdo con el escenario de aplicación para garantizar su estabilidad en entornos corrosivos o de alta temperatura.

9.2.1 Vacío y atmósferas inertes

Las varillas de molibdeno son susceptibles a la oxidación a altas temperaturas, por lo que se utilizan principalmente en vacío o atmósferas inertes (como argón, nitrógeno, hidrógeno) para evitar la oxidación de la superficie y la degradación del rendimiento. Los entornos de vacío ($<10^{-3}\text{ Pa}$) se utilizan ampliamente en hornos de alta temperatura, tubos de vacío y equipos semiconductores, y son adecuados para varillas de molibdeno como elementos calefactores o electrodos. Los sistemas de vacío deben estar equipados con conjuntos de bombas de alta eficiencia (por ejemplo, bombas turbomoleculares) para mantener una presión baja y evitar la oxidación por trazas de oxígeno. La atmósfera inerte utiliza un gas de alta pureza (pureza $\geq 99,999\%$), que mantiene una atmósfera homogénea a través de un sistema de circulación de gas para evitar la oxidación local.

Los factores que afectan la efectividad del uso incluyen la pureza de la atmósfera, la estanqueidad y el control de la temperatura. Las trazas de humedad (punto de rocío $>-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) pueden causar la oxidación de la superficie de la varilla de molibdeno y deben eliminarse mediante un sistema de secado. Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de sistemas de ultra alto vacío ($<10^{-6}\text{ Pa}$) para mejorar la estabilidad de las varillas de molibdeno en ambientes extremos; La tecnología de monitoreo de atmósfera en línea utiliza un analizador de espectro para detectar los niveles de

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

oxígeno y humedad en tiempo real para optimizar el control ambiental.

9.2.2 Protección del medio ambiente por oxidación a alta temperatura

En entornos oxidantes de alta temperatura, como atmósferas de aire u oxígeno, las barras de molibdeno son propensas a la formación de óxidos volátiles (MoO_3), lo que resulta en pérdida de masa. Por lo tanto, es necesario aplicar un recubrimiento antioxidante (por ejemplo, MoSi_2 , SiC) o utilizar una atmósfera protectora. Los recubrimientos de MoSi_2 se aplican por deposición química de vapor (CVD) o pulverización de plasma para formar una capa protectora densa que evita eficazmente la oxidación a 1200-1600 °C. El recubrimiento debe ser uniforme y sin grietas, con un grosor de decenas a cientos de micras para equilibrar la protección y el costo.

Las medidas de protección también incluyen el diseño de un cuerpo de horno hermético al gas, combinado con lavado con gas inerte, para reducir la exposición al oxígeno. Los factores que afectan la eficacia de la protección incluyen la calidad del recubrimiento, la temperatura de funcionamiento y la atmósfera ambiente. Los defectos del recubrimiento pueden causar oxidación localizada, lo que requiere pruebas ultrasónicas para verificar la calidad. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de nano-recubrimiento, que mejora la compacidad y la adherencia del recubrimiento; El equipo de prueba de oxidación dinámica optimiza las soluciones de protección al monitorear la tasa de oxidación en tiempo real.

9.3 Instalación y fijación de varillas de molibdeno

La instalación y fijación de la varilla de molibdeno afecta directamente su rendimiento y vida útil, y es necesario garantizar la estabilidad a través de la tecnología y el diseño científicos, especialmente en entornos de alta temperatura y estrés complejo.

9.3.1 Proceso de instalación y diseño del dispositivo

Las varillas de molibdeno deben instalarse para garantizar su estabilidad geométrica y fuerza uniforme en entornos de alta temperatura, que se encuentran comúnmente en hornos de alta temperatura y aplicaciones de electrodos. Los procesos de instalación incluyen sujeción, suspensión y anidamiento. La sujeción utiliza abrazaderas de alta temperatura (como aleaciones de molibdeno o cerámica) para aplicar una presión uniforme a través de pernos o resortes para evitar concentraciones de tensión locales. La suspensión se fija por medio de alambre de molibdeno o gancho de molibdeno para suspender la barra, adecuada para elementos calefactores, y se debe garantizar la resistencia del punto de suspensión. Las varillas de molibdeno anidadas y fijas están incrustadas en ranuras refractarias, adecuadas para electrodos de fusión de vidrio, donde las muescas deben mecanizarse con precisión para que coincidan con el tamaño de la barra.

La resistencia a altas temperaturas y a la corrosión se tienen en cuenta en el diseño de los accesorios, y materiales como las aleaciones TZM o las cerámicas de alúmina se utilizan a menudo en la fabricación de accesorios. La superficie del accesorio debe pulirse ($R_a < 1,6 \mu\text{m}$) para reducir el daño por fricción con la varilla de molibdeno. Los factores que afectan el efecto de la instalación incluyen el material del accesorio, la fuerza de fijación y la precisión de la instalación. Una fuerza de fijación excesiva puede provocar la deformación de las varillas de molibdeno, y el diseño debe optimizarse

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

mediante simulación mecánica. Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de equipos de instalación automatizados para controlar con precisión la posición de los accesorios a través de robots; El diseño modular del accesorio mejora la eficiencia y la flexibilidad de la instalación.

9.3.2 Diseño de adaptación a la expansión térmica

La varilla de molibdeno tiene un bajo coeficiente de expansión térmica (alrededor de $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), lo que puede causar estrés térmico con otros materiales (como la cerámica y el acero) a altas temperaturas, por lo que es necesario diseñar para que coincida con la expansión térmica. El diseño incluye la selección de materiales de unión con coeficientes similares de expansión térmica (por ejemplo, aleaciones de Mo-La y cerámicas de alúmina) o la absorción de diferencias de expansión térmica a través de conexiones flexibles (por ejemplo, abrazaderas de resorte). La holgura de expansión (generalmente de 0,1 a 0,5 mm) debe reservarse para la instalación para evitar la deformación por extrusión a altas temperaturas.

Los factores que influyen en la adaptación de la expansión térmica incluyen la selección del material, el gradiente de temperatura y el estilo de conexión. Un gradiente de temperatura excesivo puede causar concentración de tensión, y el diseño debe optimizarse mediante simulación de campo térmico. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de técnicas de análisis de elementos finitos (FEA) para predecir distribuciones de tensiones térmicas; Desarrollo de accesorios compuestos para equilibrar la expansión térmica y los requisitos de resistencia.

9.4 Mantenimiento y limpieza de varillas de molibdeno

El mantenimiento y la limpieza de las varillas de molibdeno es clave para prolongar su vida útil y mantener el rendimiento, lo que implica la limpieza de superficies y las inspecciones periódicas para garantizar su fiabilidad en entornos hostiles.

9.4.1 Métodos de limpieza de superficies

La limpieza de superficies se utiliza para eliminar óxidos, aceites y contaminantes de la superficie de las varillas de molibdeno y restaurar sus propiedades. La limpieza ultrasónica es un método común que utiliza vibraciones de alta frecuencia (20-40 kHz) para crear burbujas en agua desionizada o fluidos de limpieza neutros para eliminar los contaminantes de la superficie. La temperatura de la solución de limpieza se controla a 40-60 °C para evitar la corrosión de la varilla de molibdeno. El decapado utiliza una solución de ácido diluido (por ejemplo, ácido nítrico al 10% o ácido clorhídrico al 5%) para eliminar la capa de óxido, que se lleva a cabo en una campana extractora y está equipada con un sistema de tratamiento de líquidos residuales para cumplir con los requisitos ambientales.

El pulido mecánico elimina los óxidos persistentes con papel de lija o pasta de pulido (tamaño de partícula de 1 a 5 μm) y es adecuado para la limpieza puntual. Después de la limpieza, debe secarse con nitrógeno de alta pureza para evitar la contaminación secundaria. Los factores que afectan la eficacia de la limpieza incluyen la composición del líquido de limpieza, el tiempo y el estado de la superficie. Un tiempo de decapado excesivo puede provocar corrosión en la superficie, que debe controlarse con precisión. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de tecnología de limpieza

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

verde, el uso de agentes de limpieza respetuosos con el medio ambiente (como el ácido cítrico) para reducir la contaminación; Los equipos de limpieza automatizados utilizan sensores para controlar el pH de la solución de limpieza (6-8) para mejorar la eficiencia de la limpieza.

9.4.2 Inspección y mantenimiento periódicos

La inspección y el mantenimiento periódicos se utilizan para monitorear el rendimiento y la condición de las varillas de molibdeno y evitar fallas. Las inspecciones incluyen la observación de la calidad de la superficie (con un microscopio óptico, aumento de 50 a 100x), mediciones dimensionales (calibrador láser, precisión de 0,01 mm) y pruebas no destructivas (por ejemplo, ultrasónicas, 5 MHz) para detectar grietas o defectos internos. El mantenimiento incluye el repulido de la superficie ($Ra < 0,8 \mu m$), la sustitución del recubrimiento antioxidante o la reparación de daños mecánicos.

La frecuencia de mantenimiento se determina de acuerdo con el entorno de uso, el entorno de oxidación a alta temperatura debe inspeccionarse mensualmente y el entorno de vacío se puede verificar trimestralmente. Los factores que afectan la eficacia del mantenimiento incluyen la frecuencia de las inspecciones, la precisión del equipo y las especificaciones de funcionamiento. Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de un sistema de monitoreo en línea para detectar la temperatura superficial y el estado de oxidación en tiempo real a través de cámaras infrarrojas; La plataforma de mantenimiento inteligente predice los ciclos de mantenimiento a través del análisis de datos y reduce el tiempo de inactividad.

9.5 Especificaciones de funcionamiento de seguridad para varillas de molibdeno

Las prácticas operativas seguras para las varillas de molibdeno garantizan la seguridad personal y la protección del equipo durante el procesamiento y el uso, especialmente en entornos de manipulación de productos químicos y altas temperaturas.

9.5.1 Precauciones para el funcionamiento a alta temperatura

Las varillas de molibdeno están sujetas a estrictas normas de seguridad durante las operaciones a alta temperatura (por ejemplo, hornos de alta temperatura, soldadura). Los operadores deben usar ropa protectora, guantes y máscaras para protegerlos de la radiación de calor y las salpicaduras. El horno de alta temperatura debe estar equipado con un sistema de apagado automático para evitar accidentes causados por sobrecalentamiento ($>1800^{\circ}C$). La instalación y el desmontaje de la varilla de molibdeno deben realizarse después de enfriar a temperatura ambiente para evitar el estrés térmico que provoque fracturas.

Los factores que afectan la seguridad de las operaciones a alta temperatura incluyen la estanqueidad del equipo, el control de la temperatura y la capacitación del operador. Un sellado deficiente puede provocar oxidación debido a fugas de oxígeno, y el nivel de vacío ($<10^{-3}$ Pa) debe revisarse regularmente. El progreso tecnológico incluye la aplicación de un sistema inteligente de control de temperatura para monitorear la temperatura en el horno en tiempo real (precisión $\pm 1^{\circ}C$); La tecnología de operación remota reduce el riesgo para el personal al completar el trabajo en caliente a través de robots.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Molybdenum Rods Introduction

1. Overview of Molybdenum Rods

Molybdenum rods are high-performance metal materials made from high-purity molybdenum powder through pressing, sintering, forging, and drawing processes. They possess excellent high-temperature performance, thermal conductivity, and chemical stability. These rods are widely used in advanced technological fields such as metallurgy, electronics, glass, aerospace, and nuclear energy, making them one of the key functional materials in modern industrial high-temperature environments.

2. Main Application Fields of Molybdenum Rods

- Heating elements and support rods for high-temperature electric furnaces
- Diffusion tubes and wafer carriers in the semiconductor industry
- Electrodes and targets for vacuum coating equipment
- High-temperature components in nuclear reactors and aircraft engines
- Electrode rods and heat-resistant fixtures in the glass industry
- Medical devices and X-ray targets
- High-temperature experimental materials and components in scientific research

3. Classification of Molybdenum Rods (by purity)

Category	Description	Typical Applications
High-Purity Moly Rods	Purity $\geq 99.95\%$, extremely low impurity levels	Electronics, semiconductors, research equipment
Industrial-Grade Rods	Purity around 99.90%, cost-effective	Electric heating, glass, metallurgical equipment
Doped Moly Rods	Doped with La, Ti, Zr, etc., for enhanced performance	High-temperature structural parts, TZM alloy applications

4. Typical Specifications of Molybdenum Rods from CTIA GROUP LTD

Item	Value Range
Density	$> 10.0 \text{ g/cm}^3$
Hardness (HV30)	160 – 250 HV
Tensile Strength (Rm/MPa)	$\geq 590 \text{ MPa}$
Yield Strength (Rp0.2/MPa)	$\geq 490 \text{ MPa}$
Elongation after fracture (A/%)	10–25%
Diameter Range	$\Phi 1 \text{ mm} - \Phi 200 \text{ mm}$, Customizable
Length Range	10 mm – 2000 mm, Customizable

5. 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

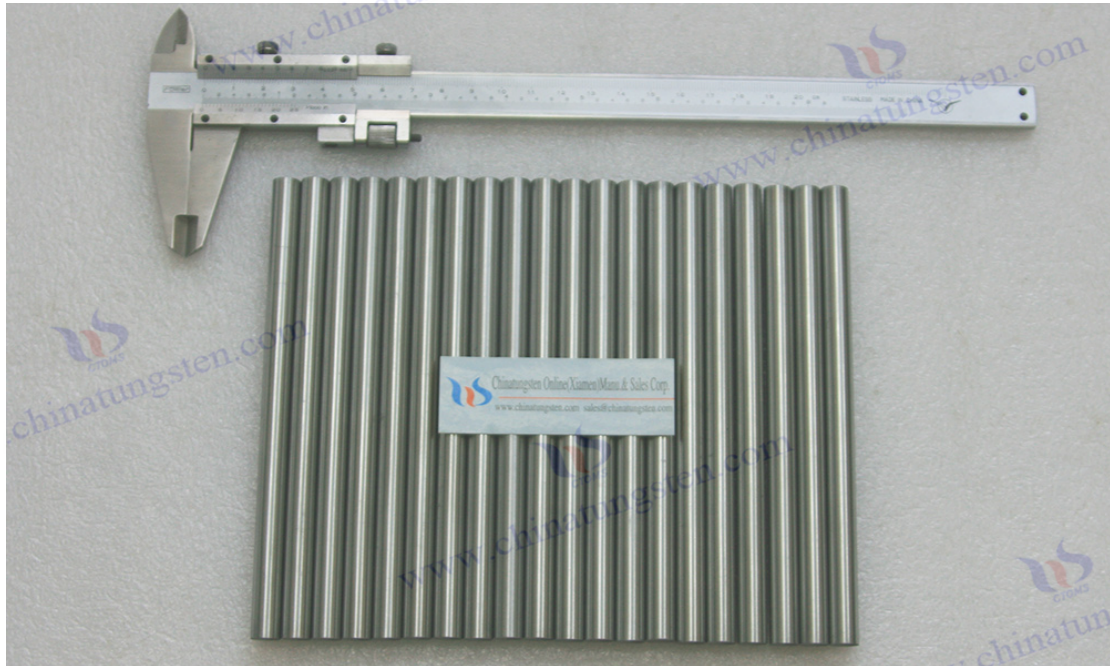
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version
www.ctia.com.cn

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

9.5.2 Especificaciones de seguridad para la manipulación de productos químicos

Los tratamientos químicos (por ejemplo, decapado, preparación del recubrimiento) están sujetos a estrictas normas de seguridad para evitar daños químicos. La operación se lleva a cabo en una campana extractora equipada con un dispositivo de tratamiento de gases de escape (por ejemplo, adsorción de carbón activado) para absorber los gases ácidos. Los operadores deben usar guantes, gafas protectoras y respiradores a prueba de ácido para evitar el contacto con la piel y la inhalación de gases nocivos. La solución de decapado debe almacenarse en un recipiente especial, con una concentración indicada (por ejemplo, 10% de ácido nítrico) y revisarse regularmente para detectar fugas.

Los factores que afectan la seguridad del procesamiento químico incluyen el almacenamiento de productos químicos, la eliminación de desechos y las mejores prácticas. El líquido residual debe neutralizarse (pH 6-9) antes de la descarga, de acuerdo con la norma GB 25466-2010. Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de equipos de procesamiento químico automatizado para reducir el contacto humano; El sistema de monitoreo en tiempo real utiliza sensores para detectar concentraciones de gas (<1 ppm) para mayor seguridad.



Varillas de molibdeno CTIA GROUP LTD

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

Capítulo 10 Reciclaje y desarrollo sostenible de varillas de molibdeno

Como material metálico refractario de alto valor, la producción y el uso de varillas de molibdeno tienen un impacto importante en los recursos y el medio ambiente. Con el énfasis global en el desarrollo sostenible, el reciclaje y la producción ecológica de varillas de molibdeno se han convertido en la dirección clave del desarrollo de la industria. Este capítulo examina en detalle el proceso de reciclaje de varillas de molibdeno, el impacto ambiental y las mejoras en la producción verde, así como la economía circular y las estrategias de sostenibilidad. A través de una tecnología de reciclaje eficiente, la optimización del proceso de protección del medio ambiente y la implementación de un modelo de economía circular, se puede reducir significativamente el consumo de recursos y la contaminación ambiental, y se puede promover el desarrollo sostenible de la industria de varillas de molibdeno. Estos proporcionan orientación técnica a los productores, al tiempo que responden a las regulaciones ambientales globales y a la demanda del mercado de materiales verdes.

10.1 Proceso de reciclaje de varillas de molibdeno

El proceso de reciclaje de varillas de molibdeno está diseñado para extraer molibdeno de alta pureza de los materiales de desecho y reutilizarlo en la producción, reduciendo la dependencia de los minerales vírgenes. El proceso de reciclaje incluye la recogida y clasificación de residuos, así como tecnologías de reciclaje y purificación para garantizar un reciclaje eficiente y mantener la calidad del molibdeno.

10.1.1 Recogida y clasificación de residuos

La recolección y clasificación de chatarra es el primer paso en el reciclaje de varillas de molibdeno, que implica la recuperación de varillas de molibdeno de desecho, astillas procesadas y piezas al final de su vida útil de la producción y el uso. Las fuentes de chatarra incluyen desechos de la producción de varillas de molibdeno (p. ej., virutas de corte y torneado), varillas de molibdeno usadas defectuosas (p. ej., elementos calefactores de hornos de alta temperatura, electrodos de fusión de vidrio) y componentes a base de molibdeno desechados (p. ej., piezas estructurales aeroespaciales). El proceso de recolección requiere un sistema de reciclaje sólido para garantizar que los residuos se recojan de manera eficiente de la fábrica, los usuarios y las estaciones de reciclaje.

La clasificación se lleva a cabo en función de la forma, composición y grado de contaminación de los residuos. Las varillas de molibdeno sólido (por ejemplo, electrodos gastados) distinguen entre el molibdeno de alta pureza y el molibdeno dopado (por ejemplo, TZM, Mo-La) mediante inspección visual y análisis químico. La chatarra en polvo (por ejemplo, virutas) se tamiza y se separa magnéticamente para eliminar las impurezas metálicas (por ejemplo, limaduras de hierro). Los materiales de desecho altamente contaminados (por ejemplo, piezas con superficies oxidadas o piezas contaminadas con aceite) deben limpiarse previamente para eliminar los óxidos o los compuestos orgánicos. El equipo de clasificación incluye cribas vibratorias, separadores magnéticos y sistemas de clasificación óptica para garantizar que los residuos se agrupen por tipo y pureza.

Los factores que influyen en la eficacia de la recogida y clasificación de residuos incluyen la cobertura del sistema de reciclaje, el grado de contaminación de los residuos y la precisión de la

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

clasificación. Los residuos muy contaminados pueden aumentar el coste de la purificación posterior, y es necesario optimizar el proceso de pretratamiento. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de clasificación automatizada para identificar los tipos de residuos a través de la visión artificial y la inteligencia artificial para mejorar la eficiencia de la clasificación; La introducción de la tecnología blockchain garantiza la trazabilidad de las fuentes de residuos y optimiza la gestión de la cadena de suministro.

10.1.2 Tecnología de reciclaje y purificación

La tecnología de reciclaje y purificación se utiliza para convertir las varillas de molibdeno de desecho clasificadas en polvo de molibdeno de alta pureza o varillas de molibdeno reutilizables, lo que implica la purificación química y el tratamiento metalúrgico. La purificación química se realiza principalmente a través del proceso hidrometalúrgico, que disuelve los materiales de desecho en soluciones ácidas o alcalinas (como el amoníaco o el ácido nítrico) para extraer molibdato u óxido de molibdeno. La solución se filtra y precipita para eliminar las impurezas (por ejemplo, hierro, cobre). Posteriormente, el óxido de molibdeno de alta pureza se genera por cristalización o tostado, que se reduce a polvo de molibdeno (pureza $\geq 99,95\%$) en atmósfera de hidrógeno. El equipo incluye un reactor, un filtro y un horno de reducción tubular, y la atmósfera (punto de rocío $< -40^{\circ}\text{C}$) debe controlarse estrictamente para evitar la oxidación.

El tratamiento metalúrgico se aplica a varillas sólidas de molibdeno para eliminar impurezas volátiles (como carbono, oxígeno) mediante fusión al vacío o fusión por haz de electrones para producir lingotes de molibdeno de alta pureza. Los hornos de fusión al vacío deben mantener un alto nivel de vacío ($< 10^{-3}\text{ Pa}$) para garantizar que el proceso de fusión esté libre de contaminación. Los lingotes de molibdeno purificado se pueden rehacer en varillas de molibdeno mediante pulvimetalurgia o procesamiento térmico. Los factores que afectan los resultados de purificación incluyen la pureza inicial de la chatarra, los parámetros del proceso de purificación y la estanqueidad del equipo. Los residuos altamente contaminantes pueden requerir múltiples etapas de purificación para aumentar el consumo de energía.

El progreso tecnológico incluye el desarrollo de tecnología de purificación verde, como el uso de solventes respetuosos con el medio ambiente (ácido cítrico) en lugar de ácidos fuertes para reducir la contaminación por líquidos residuales; La aplicación de la tecnología de intercambio iónico mejora la eficiencia de la eliminación de impurezas. Además, el sistema de purificación automatizado optimiza la eficiencia de la purificación y la recuperación de molibdeno mediante el monitoreo de la composición de la solución y los parámetros de la atmósfera en tiempo real.

10.2 Impacto ambiental de la varilla de molibdeno y la producción verde

El proceso de producción de varillas de molibdeno implica un alto consumo de energía y una posible contaminación ambiental, y la aplicación de tecnologías de producción ecológicas puede reducir significativamente el impacto ambiental y cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible.

10.2.1 Consumo de energía y emisiones en el proceso de producción

La producción de varillas de molibdeno incluye la purificación de la materia prima, la

pulvimetalurgia, el procesamiento térmico y el tratamiento de superficies, cada uno de los cuales consume mucha energía y genera emisiones. La purificación de las materias primas (por ejemplo, tostado y reducción) se lleva a cabo a altas temperaturas (600-1000 °C), lo que consume mucha electricidad y puede liberar óxidos de azufre (por ejemplo, SO₂) durante el proceso de tostado. El proceso de sinterización en pulvimetalurgia utiliza hornos de vacío u hornos de hidrógeno, que necesitan mantener altas temperaturas (1500-1800 °C) y una atmósfera de alta pureza para aumentar el consumo de energía. El procesamiento en caliente (por ejemplo, forja, laminación) requiere un calentamiento repetido y consume mucha electricidad. Los tratamientos superficiales (p. ej., decapado) producen líquidos residuales ácidos y gases de escape, que deben eliminarse adecuadamente para cumplir con las normativas medioambientales (p. ej., GB 25466-2010).

Las emisiones incluyen principalmente gases de escape (por ejemplo, SO₂, NO_x), aguas residuales (que contienen ácidos o metales pesados) y residuos sólidos (por ejemplo, escorias). Los gases residuales deben tratarse mediante lavado húmedo o adsorción de carbón activado, las aguas residuales deben neutralizarse (pH 6-9) antes de su descarga, y los residuos sólidos deben clasificarse y reciclarse o depositarse en vertederos de forma segura. Los factores que influyen en el impacto ambiental incluyen la escala de producción, la eficiencia del equipo y la capacidad de tratamiento de desechos. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de sistemas de monitoreo de consumo de energía para registrar datos de consumo de energía y emisiones en tiempo real a través de sensores; El desarrollo de la tecnología de recuperación de calor residual utiliza el calor residual del horno de alta temperatura para precalentar las materias primas y reducir el consumo de energía.

10.2.2 Mejora del proceso de protección del medio ambiente

Las mejoras de procesos ambientales tienen como objetivo reducir el consumo de energía y las emisiones en la producción de varillas de molibdeno y mejorar la utilización de los recursos. Las mejoras incluyen la optimización del proceso de tostado, la sustitución de los hornos rotativos tradicionales por tostadores de lecho fluidizado, la mejora de la eficiencia térmica y la reducción de las emisiones de SO₂ a través de las corrientes de gas circulante. El proceso de reducción utiliza agentes reductores verdes, como el hidrógeno derivado de la biomasa, para sustituir los combustibles fósiles tradicionales y reducir la huella de carbono. El proceso de sinterización adopta un horno de calentamiento por inducción de frecuencia intermedia para controlar con precisión la temperatura (± 1 °C), acortar el tiempo de calentamiento y reducir el consumo de energía.

En cuanto al tratamiento de residuos, el sistema de reciclaje de aguas residuales recupera ácido y agua mediante tecnología de intercambio iónico y ósmosis inversa para reducir las emisiones. El tratamiento de gases de escape utiliza catalizadores de alta eficiencia, como la tecnología SCR, para convertir los NO_x en gases inofensivos. Los residuos sólidos se reciclan mediante fundición a alta temperatura para reducir la cantidad de molibdeno en los vertederos. Los factores que influyen en la eficacia de las mejoras incluyen la inversión en equipos, la estabilidad del proceso y la madurez tecnológica. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de sistemas de control inteligentes para optimizar los parámetros del proceso y reducir el consumo de energía a través de la IA; La implementación de sistemas de certificación verde, como la ISO 14001, guía a las empresas para

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

lograr una producción respetuosa con el medio ambiente.

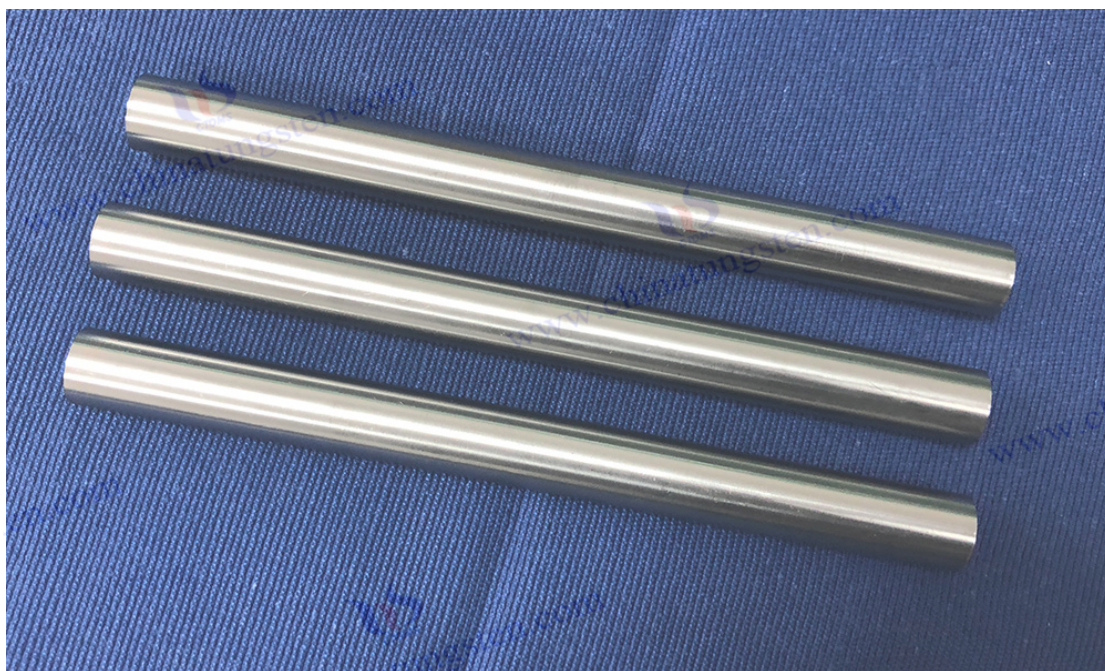
10.3 Economía circular y estrategia de desarrollo sostenible de la varilla de molibdeno

La estrategia de economía circular y desarrollo sostenible promueve el desarrollo verde de la industria de varillas de molibdeno y reduce la dependencia de los recursos primarios a través del reciclaje de recursos y la sinergia industrial.

El modelo de economía circular hace hincapié en la gestión del ciclo de vida completo de las varillas de molibdeno, desde la producción hasta el reciclaje. Las varillas de molibdeno de desecho se reciclan y purifican y se vuelven a introducir en la cadena de producción para fabricar nuevas varillas de molibdeno o productos a base de molibdeno, lo que reduce la extracción de molibdenita. El modelo circular incluye el establecimiento de una red de reciclaje de residuos, trabajando con los usuarios y las estaciones de reciclaje para garantizar la recogida eficiente de los residuos; Optimizar el proceso de purificación para mejorar la tasa de recuperación (objetivo > 95%); Desarrollo de tecnologías de remanufactura para procesar molibdeno reciclado en productos de alto valor añadido, como objetivos de pulverización catódica o polvos de impresión 3D.

Las estrategias de sostenibilidad incluyen la conservación de los recursos, el respeto al medio ambiente y la responsabilidad social. Conservación de recursos: Reducción de residuos de materias primas a través de procesos de producción eficientes como la forja isotérmica; Respetuoso con el medio ambiente: reducir las emisiones a través de la tecnología verde y el reciclaje de residuos; La responsabilidad social incluye aumentar la conciencia ambiental de los empleados y apoyar proyectos de sostenibilidad comunitaria. Los factores que influyen en la implementación de una economía circular incluyen la integridad de los sistemas de reciclaje, el costo de la tecnología y la demanda del mercado. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de gemelos digitales para optimizar los procesos de reciclaje y producción a través de modelos virtuales; La tecnología blockchain garantiza la transparencia en la cadena de reciclaje. Además, el apoyo político, como la Ley de Promoción de la Economía Circular de China, ofrece incentivos para que la industria de varillas de molibdeno promueva el desarrollo sostenible.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal



Varillas de molibdeno CTIA GROUP LTD

Capítulo 11 La última tecnología y la tendencia futura de las varillas de molibdeno

Como material metálico refractario de alto rendimiento, la varilla de molibdeno se expande constantemente en la industria aeroespacial, electrónica, nuevas energías y otros campos, y su investigación y desarrollo tecnológico y actualización industrial están promoviendo el desarrollo de la industria en una dirección más eficiente, ecológica e inteligente. Este capítulo analiza en detalle el progreso de la investigación y el desarrollo de aleaciones a base de molibdeno, el desarrollo de varillas de molibdeno nanoestructuradas, las tecnologías inteligentes de producción y prueba, el potencial de las varillas de molibdeno en el campo de las nuevas energías y las futuras direcciones y desafíos de investigación. Reflejando las últimas fronteras en la tecnología de varillas de molibdeno, estos contenidos están diseñados para proporcionar a los fabricantes, investigadores y usuarios conocimientos técnicos que ayuden a la industria a mantenerse por delante de la competencia global mientras aborda los desafíos de la sostenibilidad y la innovación tecnológica.

11.1 Avances en la investigación y el desarrollo de aleaciones a base de molibdeno

Las aleaciones a base de molibdeno mejoran significativamente el rendimiento a altas temperaturas, la resistencia a la fluencia y la resistencia a la corrosión de las varillas de molibdeno al optimizar su composición y microestructura, satisfaciendo las necesidades de aplicaciones exigentes como las industrias aeroespacial y nuclear. La investigación y el desarrollo se centran en la optimización de las aleaciones TZM y Mo-La, así como en las nuevas tecnologías de dopaje.

11.1.1 Optimización de aleaciones TZM y Mo-La

La aleación TZM (titanio, circonio y molibdeno) mejora significativamente la resistencia, la resistencia a la fluencia y la estabilidad a altas temperaturas del molibdeno al agregar una pequeña cantidad de titanio, circonio y carbono, y es ampliamente utilizada en hornos de alta temperatura,

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

piezas estructurales aeroespaciales y otros campos. La investigación y desarrollo más recientes optimiza aún más las propiedades de las aleaciones TZM a través del control preciso de las proporciones de los elementos dopantes y los procesos de tratamiento térmico. Por ejemplo, la forja isotérmica y las tecnologías de enfriamiento controlado se utilizan para refinar el tamaño de grano y mejorar la resistencia a la fatiga térmica. Durante el proceso de tratamiento térmico, la atmósfera y el gradiente de temperatura se controlan con precisión para reducir la oxidación del límite de grano y mejorar la estabilidad a largo plazo de la aleación a altas temperaturas.

Las aleaciones de Mo-La (molibdeno-lantano) están dopadas con óxido de lantano (La_2O_3) para mejorar la resistencia a la fluencia y la oxidación, lo que las hace especialmente adecuadas para electrodos de fusión de vidrio y elementos calefactores de alta temperatura. El progreso de la investigación y el desarrollo incluye la optimización de la distribución y el tamaño de las partículas de óxido de lantano, y la fabricación de partículas de óxido dispersas uniformemente en la matriz de molibdeno a través del dopaje en fase líquida y la tecnología de sinterización a alta temperatura, para mejorar la fuerza de unión interfacial. También se está mejorando la tecnología de recubrimiento antioxidante de las aleaciones de Mo-La, como la aplicación de recubrimientos de MoSi_2 por deposición química de vapor (CVD) para mejorar su durabilidad en entornos oxidantes.

Los factores que influyen en la optimización de las aleaciones TZM y Mo-La incluyen la uniformidad del dopaje, el proceso de tratamiento térmico y el costo de producción. El dopaje desigual puede conducir a un rendimiento inestable y debe abordarse con equipos de mezcla de alta precisión. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de radiación de sincrotrón y el análisis en tiempo real de la distribución de los elementos dopados; El nuevo horno de tratamiento térmico utiliza el calentamiento por inducción para mejorar la uniformidad de la temperatura y optimizar las propiedades de la aleación.

11.1.2 Nuevas tecnologías de dopaje

La nueva tecnología de dopaje mejora aún más las propiedades integrales de las varillas de molibdeno mediante la introducción de elementos de tierras raras (como el cerio y el itrio) u otros elementos metálicos (como el tungsteno y el renio). El dopaje de tierras raras mejora la resistencia a la fluencia del molibdeno y su resistencia a altas temperaturas mediante la formación de partículas de óxido a nanoescala, lo que lo hace adecuado para reactores nucleares y aplicaciones superconductoras de alta temperatura. Por ejemplo, las aleaciones de Mo-Ce mejoran significativamente la resistencia a la radiación al agregar óxido de cerio. El dopaje de tungsteno o renio mejora la dureza y la resistencia a la corrosión de las varillas de molibdeno mediante el fortalecimiento de la solución, que es adecuado para los componentes del sistema de propulsión aeroespacial.

El proceso de dopaje debe realizarse mediante pulvimetalurgia o tecnología de fundición, y el dopaje en fase líquida y el dopaje con plasma se han convertido en métodos emergentes que pueden lograr una distribución uniforme a nivel nanométrico. Los factores que influyen en la eficacia del dopaje incluyen la selección de dopantes, el tamaño de partícula y el control del proceso. Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de la tecnología de nanodopaje para preparar partículas dopadas ultrafinas mediante molienda de bolas o deposición de vapor; Las técnicas analíticas in situ, como

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

la difracción de rayos X, monitorizan el proceso de dopaje en tiempo real y mejoran la consistencia. Además, la aplicación de dopantes verdes (como los agentes reductores de base biológica) reduce la contaminación ambiental.

11.2 Desarrollo de varillas de molibdeno nanoestructuradas

Las varillas de molibdeno nanoestructuradas mejoran significativamente la resistencia, la tenacidad y la resistencia a la corrosión al controlar la microestructura a la nanoescala (tamaño de grano < 100 nm), que es adecuada para campos de vanguardia como la microelectrónica y la impresión 3D. El proceso de desarrollo incluye tecnologías de preparación, sinterización y moldeo de nanopulvos. El polvo de nano molibdeno se prepara mediante molienda de bolas de alta energía o deposición de vapor, y el tamaño de partícula se controla con precisión para garantizar la uniformidad. La sinterización utiliza la tecnología de sinterización por plasma por chispa (SPS) para lograr un moldeo de alta densidad a alta temperatura y alta presión (1500-1800 °C, 50-100 MPa) en un corto período de tiempo, mientras se conserva la nanoestructura.

El desafío de las varillas de molibdeno nanoestructurado es mantener la estabilidad de los nanocristales, que son fáciles de cultivar a altas temperaturas y deben suprimirse mediante dopaje o recubrimiento. El dopaje con óxido de lantano u óxido de itrio puede determinar los límites de los granos y evitar el crecimiento de los granos; Los recubrimientos de SiC o Al₂O₃ mejoran la resistencia a la corrosión de la superficie. Los factores que influyen en los resultados del desarrollo incluyen la calidad del polvo, los parámetros de sinterización y el control de costos. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de sinterización láser ultrarrápida, que controla con precisión la velocidad de calentamiento y reduce el crecimiento del grano; La microscopía de radiación sincrotrón se utiliza para analizar la evolución de las nanoestructuras. Además, la tecnología de impresión 3D de varillas de molibdeno nanoestructuradas realiza el moldeo directo de formas complejas mediante deposición de fusión por láser.

11.3 Tecnología inteligente de producción y pruebas

A través de la automatización, el análisis de datos y la inteligencia artificial, la tecnología inteligente de producción e inspección ha mejorado significativamente la eficiencia, la calidad y la trazabilidad de la producción de varillas de molibdeno, adaptándose a la tendencia de desarrollo de la Industria 4.0.

11.3.1 Monitorización en línea y análisis de big data

El sistema de monitoreo en línea utiliza sensores para capturar parámetros clave en el proceso de producción, como la temperatura, la presión, el tamaño y la composición de la atmósfera, en tiempo real para la optimización del proceso y el control de calidad. Por ejemplo, un termómetro infrarrojo en el horno de sinterización (precisión ± 1 °C) monitorea la distribución de la temperatura en tiempo real, un calibrador láser (precisión $\pm 0,01$ mm) detecta el tamaño de las varillas de molibdeno y un espectrómetro infrarrojo analiza el contenido de oxígeno y humedad en la atmósfera (punto de rocío < -40 °C). El análisis de big data recopila cantidades masivas de datos de producción para identificar anomalías en el proceso y optimizar la configuración de los parámetros. Por ejemplo, al analizar la relación entre la temperatura y la densidad de sinterización, es posible acortar el tiempo de

sinterización y reducir el consumo de energía.

Los factores que afectan la efectividad del monitoreo en línea incluyen la precisión del sensor, la frecuencia de adquisición de datos y la integración del sistema. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de Internet de las cosas (IoT) para permitir la interconexión de dispositivos y el intercambio de datos; La plataforma en la nube predice los fallos de los equipos a través de algoritmos de big data y reduce el tiempo de inactividad. Además, la tecnología de gemelos digitales simula el proceso de producción a través de un modelo virtual para optimizar los parámetros del proceso.

11.3.2 Aplicación de la inteligencia artificial en la producción de varillas de molibdeno

La inteligencia artificial (IA) se utiliza en la producción de varillas de molibdeno para la optimización de procesos, la predicción de la calidad y el diagnóstico de fallos. Los algoritmos de aprendizaje automático analizan datos históricos para optimizar la pulvimetalurgia y los parámetros de procesamiento térmico. Por ejemplo, un modelo de red neuronal predice la densidad y el tamaño de grano de la varilla de molibdeno durante el proceso de sinterización, guiando los ajustes de temperatura y presión. La IA también se utiliza en el reconocimiento de imágenes para detectar defectos microscópicos, como porosidad o inclusiones, mediante el análisis de imágenes de microscopio (aumento de 50 a 100x). El sistema de diagnóstico de fallas analiza los datos de los sensores a través de la IA para predecir el desgaste o las fallas del equipo y programar el mantenimiento con anticipación.

Los factores que afectan a la eficacia de las aplicaciones de IA son la calidad de los datos, la precisión de los algoritmos y la potencia informática. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de redes generativas adversarias (GANs) para simular la evolución de la microestructura de las varillas de molibdeno; La introducción de la tecnología de computación periférica puede procesar datos en tiempo real en el sitio de producción para reducir la latencia. Además, la IA se combina con blockchain para garantizar la seguridad y la trazabilidad de los datos de producción.

11.4 El potencial de las varillas de molibdeno en el campo de las nuevas energías

El potencial de aplicación de la varilla de molibdeno en el campo de las nuevas energías continúa surgiendo, especialmente en los campos de la energía del hidrógeno, el almacenamiento de energía y la superconductividad a alta temperatura, mostrando ventajas únicas con su rendimiento a alta temperatura y estabilidad química.

11.4.1 Energía de hidrógeno y aplicaciones de almacenamiento de energía

Las varillas de molibdeno se utilizan en el campo de la energía del hidrógeno para electrodos y componentes de alta temperatura de equipos de producción de hidrógeno por electrólisis de agua debido a su excelente conductividad y resistencia a la corrosión. Como material de electrodo, la varilla de aleación Mo-La puede funcionar de manera estable en un electrolito alcalino de alta temperatura y prolongar la vida útil del electrodo. En el campo del almacenamiento de energía, las varillas de molibdeno se utilizan en los electrodos o colectores de corriente de las baterías de metal líquido de alta temperatura, que se someten a altas temperaturas (>600 °C) y ambientes corrosivos.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

La producción requiere mecanizado de precisión y recubrimientos superficiales (por ejemplo, MoSi_2) para mejorar la resistencia a la corrosión.

Los factores que afectan la efectividad de la aplicación incluyen la condición de la superficie del electrodo, la composición del electrolito y la temperatura de funcionamiento. Los avances tecnológicos incluyen la aplicación de la tecnología de nano-recubrimiento para mejorar la eficiencia catalítica de los electrodos; Desarrollo de tecnología de fabricación aditiva para la preparación de electrodos basados en molibdeno con formas complejas. Además, la aplicación de varillas de molibdeno en baterías de estado sólido ha demostrado potencial para mejorar la conductividad eléctrica a través del dopaje.

11.4.2 Soporte de material superconductor de alta temperatura

Las varillas de molibdeno se utilizan en el campo de la superconductividad a alta temperatura para estructuras de soporte o electrodos, y se utilizan en imanes superconductores y equipos de transmisión de energía. Las varillas de aleación TZM o Mo-W son estables en entornos de nitrógeno líquido o helio ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$) debido a su alta resistencia y bajo coeficiente de expansión térmica. Se requiere un mecanizado de ultraprecisión para garantizar la precisión dimensional ($\pm 0,01\text{ mm}$) y el pulido de la superficie ($R_a < 0,4\text{ }\mu\text{m}$) para reducir la resistencia. El entorno operativo debe controlar estrictamente el oxígeno y la humedad para evitar la contaminación por materiales superconductores.

Los factores que afectan la eficacia de la aplicación incluyen la pureza del material, la precisión del procesamiento y el rendimiento a baja temperatura. Los avances tecnológicos incluyen el desarrollo de aleaciones Mo-Re para mejorar la tenacidad a baja temperatura; La técnica de ensayo in situ evalúa el rendimiento de las varillas de molibdeno a través de un ensayo de tracción a baja temperatura. Además, la investigación sobre la aplicación de barras de molibdeno en reactores de fusión nuclear, como los componentes de soporte de los dispositivos tokamak, muestra potencial a largo plazo.

11.5 Direcciones y desafíos futuros de la investigación de las varillas de molibdeno

Las futuras direcciones de investigación de la varilla de molibdeno incluyen los siguientes aspectos:

Desarrollo de aleaciones de alto rendimiento: investigación y desarrollo de nuevas aleaciones a base de molibdeno (como Mo-Re, Mo-Nb) para mejorar la resistencia a la radiación y la resistencia a altas temperaturas para satisfacer las necesidades de la industria nuclear y aeroespacial.

Aplicaciones de la nanotecnología: Desarrollo de varillas de molibdeno nanoestructuradas estables para explorar sus aplicaciones en microelectrónica y biomedicina, como nanoelectrodos o sensores implantables.

Tecnología de producción verde: Promover la tecnología de purificación y reciclaje de baja energía para reducir las emisiones de gases residuales y aguas residuales, en línea con el objetivo de neutralidad de carbono.

Fabricación inteligente: Profundizar en la aplicación de la IA y la tecnología de gemelos digitales en la producción para realizar la automatización y optimización de todo el proceso.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Nueva expansión energética: explore nuevas aplicaciones de las varillas de molibdeno en la fusión nuclear, las células solares de perovskita y el almacenamiento de energía de alto rendimiento.

Los desafíos clave incluyen:

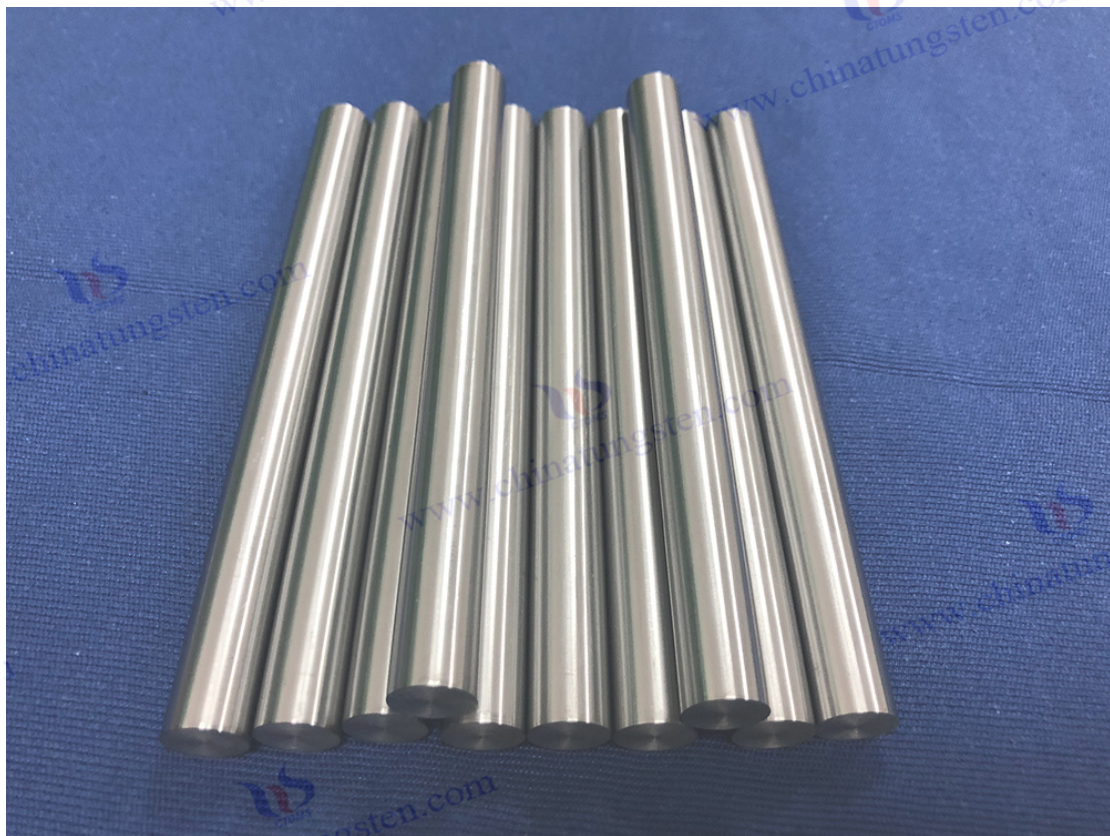
Control de costos: El costo del nuevo dopaje y la nanotecnología es alto, y el proceso debe optimizarse para reducir los costos de producción.

Presiones ambientales: Las estrictas regulaciones ambientales requieren una mejor gestión de los residuos y la gestión de la energía, así como una mayor inversión en tecnología.

Estabilidad técnica: Es necesario seguir verificando la estabilidad a largo plazo de las nanoestructuras y las tecnologías inteligentes.

Competencia en el mercado: las varillas de molibdeno deben competir con materiales alternativos como el tungsteno y el niobio, y es necesario mejorar la relación rendimiento-precio.

Los avances tecnológicos incluyen la colaboración interdisciplinaria para acelerar la innovación a través de la convergencia de la ciencia de los materiales, la inteligencia artificial y las nuevas tecnologías energéticas; Aumento de los proyectos de cooperación internacional para promover el intercambio de tecnología y la armonización de normas.



Varillas de molibdeno CTIA GROUP LTD

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

Apéndice

A. Glosario

Varilla de molibdeno: Un material similar a una varilla hecho de molibdeno de alta pureza o aleaciones de molibdeno, comúnmente utilizado en aplicaciones de alta temperatura o alto rendimiento.

Aleación TZM: Aleación de titanio-circonio-molibdeno, con excelente resistencia a altas temperaturas y resistencia a la fluencia.

Aleación Mo-La: Aleación de molibdeno-lantano para mejorar la resistencia a la oxidación y la ductilidad a altas temperaturas.

Pulvimetalurgia: Proceso de preparación de materiales mediante prensado y sinterización de polvos metálicos.

Sinterización: El proceso de calentar un polvo metálico a una temperatura por debajo del punto de fusión para formar un material sólido.

Trabajo en caliente: El proceso de deformación plástica del metal a altas temperaturas.

Ensayos no destructivos (END): Método para detectar defectos internos sin dañar la estructura de un material, como los ensayos ultrasónicos, la inspección por rayos X.

Recubrimiento antioxidante: Se utiliza para proteger el recubrimiento superficial de la varilla de molibdeno en un entorno de oxidación a alta temperatura.

Fluencia: Fenómeno en el que un material se deforma lentamente a altas temperaturas y bajo tensión constante.

Objetivo de pulverización catódica: Un material utilizado para la preparación de películas delgadas por deposición física de vapor (PVD).

B. Referencias

- [1] Chinatungsten en línea. Producción de varillas de molibdeno con especificaciones estándar.
- [2] GB/T 3462-2017. Norma nacional para varillas de molibdeno y barras de molibdeno.
- [3] Revista de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Investigación sobre el reciclaje de varillas de molibdeno y la producción de protección del medio ambiente.
- [4] YS/T 495-2005. Métodos de análisis químico para molibdeno y aleaciones de molibdeno.
- [5] GB 25466-2010. Normas de emisión de contaminantes industriales de metales no ferrosos.
- [6] GB/T 4188-2015. Barra de aleación de molibdeno TZM estándar.
- [7] Revista de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Propiedades y preparación de barras de aleación a base de molibdeno.
- [8] Informe de desarrollo de la industria del molibdeno. Asociación de la Industria de Metales No Ferrosos de China.
- [9] Materiales de la naturaleza. Aleaciones de molibdeno de alto rendimiento para aplicaciones energéticas.
- [10] Materiales avanzados. IA en la fabricación de materiales.
- [11] Energías renovables. Molibdeno en hidrógeno y almacenamiento de energía.
- [12] Asociación Internacional del Molibdeno (IMOA). Reciclaje de molibdeno y sostenibilidad.
- [13] ASTM B387-18. Especificación estándar para barras, varillas y alambres de molibdeno y aleaciones de molibdeno.

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

- [14] ISO 6892-1:2019. Materiales metálicos: ensayos de tracción.
- [15] ASTM E8/E8M-21. Métodos de ensayo estándar para ensayos de tensión de materiales metálicos.
- [16] ASTM E9-19. Métodos de ensayo estándar de ensayos de compresión de materiales metálicos.
- [17] ASTM E290-14. Métodos de prueba estándar para la prueba de ductilidad de la flexión del material.
- [18] Asociación Internacional del Molibdeno (IMOA). Pruebas y análisis de molibdeno.
- [19] Asociación Internacional del Molibdeno (IMOA). Descripción general del mercado global de molibdeno.

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