

Enciclopedia de la varilla de molibdeno TZM

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

Copyright and Legal Liability Statement

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.



Copyright and Legal Liability Statement

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

High Melting Point: Suitable for extreme high-temperature environments.

Excellent High-Temperature Strength: Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

Good Thermal Stability and Creep Resistance: Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

Superior Corrosion and Oxidation Resistance: Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

Excellent Machinability: Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

High-Temperature Furnace Components: Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

Aerospace Industry: Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

Nuclear Industry: Used in reactor support structures and control rod guide systems.

Electronics Industry: Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

Mold Manufacturing: Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Copyright and Legal Liability Statement

Directorio

1. Introducción a la varilla de molibdeno TZM

- 1.1 Definición e importancia de la varilla de molibdeno TZM
- 1.2 Desarrollo histórico y evolución tecnológica de la varilla de molibdeno TZM
- 1.3 El papel de la varilla de molibdeno TZM en la industria moderna y la investigación científica

2. Principio básico de la varilla de molibdeno TZM

- 2.1 Composición química y características de aleación de la varilla de molibdeno TZM
- 2.2 Propiedades físicas y mecánicas de la varilla de molibdeno TZM
- 2.3 Comparación de la varilla de molibdeno TZM con molibdeno puro y otras superaleaciones
- 2.4 Mecanismo de trabajo de la varilla de molibdeno TZM en ambientes de alta temperatura

3. Rendimiento de la varilla de molibdeno TZM

- 3.1 Propiedades físicas y químicas
 - 3.1.1 Punto de fusión y estabilidad térmica
 - 3.1.2 Densidad y conductividad térmica
 - 3.1.3 Resistencia a la oxidación y a la corrosión
 - 3.1.4 Resistencia mecánica y tenacidad
- 3.2 Propiedades térmicas y mecánicas
 - 3.2.1 Expansión térmica y deformación a alta temperatura
 - 3.2.2 Resistencia al choque térmico
 - 3.2.3 Rendimiento de fluencia y estabilidad a largo plazo
 - 3.2.4 Rendimiento a la fatiga y capacidad de reciclaje
- 3.3 Relación microestructura-propiedad
 - 3.3.1 Estructura y orientación del grano
 - 3.3.2 El papel del titanio, el circonio y el carbono
 - 3.3.3 Morfología de la superficie y propiedades a altas temperaturas
- 3.4 Vida útil y fiabilidad
 - 3.4.1 Factores que afectan a la vida útil
 - 3.4.2 Análisis modal de fallo (por ejemplo, fractura, corrosión)
 - 3.4.3 Métodos de prueba de confiabilidad
- 3.5 CTIA GROUP LTD TZM Varilla de molibdeno MSDS

4. Proceso y tecnología de preparación

- 4.1 Selección y preparación de materias primas
 - 4.1.1 Purificación de polvo de molibdeno y requisitos de calidad
 - 4.1.2 Selección de aditivos de titanio, circonio y carbono
 - 4.1.3 Optimización de la relación de aleación
 - 4.1.4 Pruebas de materias primas y control de calidad
- 4.2 Procesos metalúrgicos
 - 4.2.1 Mezcla y prensado de polvo
 - 4.2.1.1 Aleación mecánica

Copyright and Legal Liability Statement

- 4.2.1.2 Prensado isostático
- 4.2.2 Proceso de sinterización
 - 4.2.2.1 Sinterización al vacío
 - 4.2.2.2 Sinterización de la atmósfera y control de la temperatura
- 4.2.3 Forja y laminación
 - 4.2.3.1 Forja en caliente y en frío
 - 4.2.3.2 Equipos de rodadura y parámetros
- 4.2.4 Extrusión y embutición
 - 4.2.4.1 Extrusión a alta temperatura
 - 4.2.4.2 Troqueles de trefilado y lubricación
- 4.3 Mecanizado y acabado
 - 4.3.1 Torneado y fresado
 - 4.3.1.1 Mecanizado CNC
 - 4.3.1.2 Precisión de mecanizado y rugosidad de la superficie
 - 4.3.2 Esmerilado y pulido
 - 4.3.2.1 Pulido mecánico
 - 4.3.2.2 Químico y electropulido
 - 4.3.3 Tratamiento térmico y recocido
 - 4.3.3.1 Recocido y control de grano
 - 4.3.3.2 Técnicas de alivio del estrés
 - 4.3.4 Tratamiento superficial
 - 4.3.4.1 Tecnología de recubrimiento antioxidante
 - 4.3.4.2 Carburación y nitruración superficial
- 4.4 Equipos y automatización
 - 4.4.1 Equipos clave de producción
 - 4.4.1.1 Hornos de sinterización al vacío
 - 4.4.1.2 Equipos de forja y laminación
 - 4.4.1.3 Centros de mecanizado CNC
 - 4.4.2 Automatización e inteligencia de la línea de producción
 - 4.4.3 Controles ambientales y de sala limpia

5. Control de calidad y pruebas

- 5.1 Tecnologías de detección en línea
 - 5.1.1 Ensayos de precisión dimensional y geométrica
 - 5.1.2 Inspección de defectos superficiales y grietas
- 5.2 Pruebas de rendimiento
 - 5.2.1 Resistencia y dureza a altas temperaturas
 - 5.2.2 Resistencia a la corrosión y a la oxidación
 - 5.2.3 Expansión térmica y conductividad
- 5.3 Análisis y mejora de fallos
 - 5.3.1 Análisis de grietas y fracturas
 - 5.3.2 Fatiga y fluencia a alta temperatura
 - 5.3.3 Medidas de mejora de la calidad

Copyright and Legal Liability Statement

6. Aplicaciones de la varilla de molibdeno TZM

- 6.1 Componentes del horno de alta temperatura
 - 6.1.1 Elementos calefactores
 - 6.1.2 Aplicaciones de hornos de sinterización al vacío
 - 6.1.3 Aplicaciones de hornos de tratamiento térmico
- 6.2 Industria aeroespacial
 - 6.2.1 Aplicaciones de la tobera de cohetes
 - 6.2.2 Piezas estructurales de alta temperatura
 - 6.2.3 Protección térmica de los vehículos espaciales
- 6.3 Industria nuclear
 - 6.3.1 Componentes del reactor nuclear
 - 6.3.2 Dispositivos de fusión nuclear
 - 6.3.3 Manipulación de materiales radiactivos
- 6.4 Industria electrónica y de semiconductores
 - 6.4.1 Equipo de implantación de iones
 - 6.4.2 Deposición de película delgada
 - 6.4.3 Fabricación de dispositivos electrónicos
- 6.5 Otros campos industriales y de investigación
 - 6.5.1 Equipos experimentales de alta temperatura
 - 6.5.2 Moldes y herramientas de alta temperatura
 - 6.5.3 Aplicaciones de fabricación aditiva

7. Desafíos técnicos y desarrollo futuro

- 7.1 Desafíos técnicos
 - 7.1.1 Mejora de la resistencia a la oxidación a alta temperatura
 - 7.1.2 Geometría compleja y fabricación a escala
 - 7.1.3 Control de costes
- 7.2 Nuevos materiales y tecnologías
 - 7.2.1 Diseño de aleación modificado
 - 7.2.2 Nanoestructuras y materiales compuestos
 - 7.2.3 Materiales de alta temperatura que compiten entre sí
- 7.3 Fabricación inteligente y ecológica
 - 7.3.1 Monitorización inteligente de la producción
 - 7.3.2 Técnicas de ahorro de energía y respetuosas con el medio ambiente
 - 7.3.3 Reciclaje eficiente de residuos
- 7.4 Tendencias futuras
 - 7.4.1 Optimización del rendimiento
 - 7.4.2 Aplicaciones intersectoriales
 - 7.4.3 Aplicaciones en entornos extremos

8. Estándares y especificaciones de varillas de molibdeno TZM

- 8.1 Normas nacionales (GB)
 - 8.1.1 GB/T Normas para molibdeno y aleaciones

Copyright and Legal Liability Statement

- 8.1.2 Normas de ensayo y evaluación de superaleaciones
- 8.1.3 Normas de ejecución de procesos y equipos
- 8.2 Normas Internacionales (ISO)
 - 8.2.1 ISO 6892 - Ensayos de tracción de metales
 - 8.2.2 ISO 14001 - Gestión Ambiental
 - 8.2.3 ISO 3452 - Ensayos no destructivos
- 8.3 Normas americanas (EE. UU.)
 - 8.3.1 ASTM B387 - Barras de aleación de molibdeno
 - 8.3.2 ASTM E384 - Ensayos de microdureza
 - 8.3.3 ASME - Estándares de equipos de alta temperatura
- 8.4 Otras normas internacionales y de la industria
 - 8.4.1 JIS G 0571 - Pruebas de molibdeno
 - 8.4.2 DIN EN 10228 - Ensayos no destructivos
 - 8.4.3 GOST 17431 - Aleaciones de molibdeno
- 8.5 Implementación y certificación de normas
 - 8.5.1 Aplicación de normas en la producción y las pruebas
 - 8.5.2 Certificación del Sistema de Gestión de Calidad (por ejemplo, ISO 9001)
 - 8.5.3 Cumplimiento de las normas de exportación y certificaciones internacionales

Apéndice

- A. Glosario de términos
- B. Referencias

1. Introducción

1.1 Definición e importancia de la varilla de molibdeno TZM

La varilla de molibdeno TZM es un material de aleación de alto rendimiento hecho de molibdeno (molibdeno) como matriz y que agrega titanio (Ti), circonio (Zr) y carbono (C) y otros elementos, y su nombre proviene de la abreviatura de "Titanio-Zirconio-Molibdeno". La varilla de molibdeno TZM tiene una posición insustituible e importante en la industria aeroespacial, nuclear, fabricación de hornos de alta temperatura, industria de semiconductores y otros campos de alta tecnología debido a su excelente resistencia a altas temperaturas, excelente resistencia a la fluencia y buena resistencia a la corrosión. En comparación con el molibdeno puro, la aleación TZM mejora significativamente las propiedades mecánicas a través del dopaje de oligoelementos, especialmente la estabilidad y la durabilidad en entornos de alta temperatura, lo que la convierte en una opción de material ideal en condiciones de trabajo extremas.

La composición química de las varillas de molibdeno TZM suele consistir en aproximadamente un 0,5% de titanio, un 0,08% de circonio y un 0,01-0,04% de carbono, y el resto es molibdeno. Esta relación de aleación específica permite que las varillas de molibdeno TZM tengan una temperatura de recristalización más alta a altas temperaturas (alrededor de 1400 °C, mucho más alta que los 1000 °C del molibdeno puro), lo que les permite mantener la integridad estructural en entornos extremos. Además, la resistencia a la oxidación y la conductividad térmica de las varillas de molibdeno TZM también son superiores a muchas superaleaciones tradicionales, lo que las hace excelentes en escenarios que requieren altas cargas térmicas y resistencia mecánica.

En aplicaciones industriales, las varillas de molibdeno TZM se utilizan ampliamente en la fabricación de elementos calefactores para hornos de alta temperatura, materiales de moldes, componentes aeroespaciales como toberas de cohetes y álabes de turbinas, componentes estructurales para reactores nucleares y componentes para equipos de semiconductores. Su importancia radica no solo en sus propiedades físicas, sino también en su capacidad para satisfacer la creciente demanda de materiales de alto rendimiento en la industria moderna. Por ejemplo, en el sector aeroespacial, las varillas de molibdeno TZM son el material de elección para la fabricación de componentes de sistemas de propulsión a alta temperatura debido a su alto punto de fusión (alrededor de 2623 °C) y su bajo coeficiente de expansión térmica. En la industria nuclear, las varillas de molibdeno TZM se utilizan en la fabricación de componentes clave en reactores nucleares debido a su tolerancia a la radiación de neutrones y su baja sección transversal de absorción térmica de neutrones.

Además, las varillas de molibdeno TZM también juegan un papel importante en el campo de la investigación científica. Por ejemplo, en las pruebas de materiales a alta temperatura, la investigación de física del plasma y el desarrollo de tecnología de fabricación avanzada, las varillas de molibdeno TZM se utilizan como componentes centrales de equipos experimentales debido a sus propiedades estables. El estudio muestra que el proceso de producción y la tecnología de control de calidad de la varilla de molibdeno TZM se han mejorado continuamente en los últimos años, lo que ha promovido su amplia aplicación en el mercado global. Desde la industria aeroespacial hasta la

Copyright and Legal Liability Statement

energética, las varillas de molibdeno TZM se han convertido en una parte indispensable de la industria moderna de alta tecnología, y su importancia continúa aumentando con los avances tecnológicos y la expansión de los campos de aplicación.

1.2 Desarrollo histórico y evolución tecnológica de la varilla de molibdeno TZM

El desarrollo de las varillas de molibdeno TZM se remonta a mediados del siglo XX, cuando la demanda de materiales de alta temperatura aumentó drásticamente con el rápido desarrollo de las industrias aeroespacial y nuclear. Aunque el molibdeno puro tiene un alto punto de fusión y buena conductividad eléctrica y térmica, su falta de resistencia a altas temperaturas, fluencia y recristalización y fragilización limitan su aplicación en entornos extremos. Para superar estas deficiencias, los científicos de materiales comenzaron a explorar la aleación para mejorar las propiedades del molibdeno.

En los años 50 del siglo XX, las instituciones de investigación científica y la industria de los Estados Unidos tomaron la delantera en el desarrollo de aleaciones TZM. Al agregar trazas de titanio, circonio y carbono a la matriz de molibdeno, las aleaciones TZM mejoran significativamente su resistencia a altas temperaturas y a la fluencia. La adición de titanio y circonio mejora la estructura cristalina del molibdeno a través del fortalecimiento de la solución y los mecanismos de fortalecimiento de la segunda fase, mientras que la adición de carbono mejora aún más la fuerza y la resistencia al desgaste de la aleación a través de la formación de partículas de carburo. A finales de la década de 1950, las aleaciones TZM comenzaron a utilizarse en el sector aeroespacial, por ejemplo, en la fabricación de toberas para motores de cohetes y componentes estructurales de alta temperatura.

En los años 60 del siglo XX, con el progreso de la tecnología de pulvimetalurgia, el proceso de producción de varillas de molibdeno TZM se ha mejorado significativamente. El método de pulvimetalurgia hace que la microestructura de la aleación TZM sea más uniforme y el rendimiento más estable al controlar con precisión el tamaño de partícula y la proporción de mezcla del polvo crudo. Durante este período, las varillas de molibdeno TZM comenzaron a ser ampliamente utilizadas en la fabricación de hornos de alta temperatura y en la industria nuclear. Por ejemplo, las barras de control y las piezas estructurales de los reactores nucleares comenzaron a utilizar aleaciones TZM para hacer frente a altas temperaturas y entornos de alta radiación.

De los años 70 a los 80 del siglo XX, con el auge de la industria de los semiconductores, el campo de aplicación de la varilla de molibdeno TZM se amplió aún más. Debido a su alta conductividad térmica y bajo coeficiente de expansión térmica, las varillas de molibdeno TZM se utilizan en la fabricación de accesorios de alta temperatura y objetivos de pulverización catódica en dispositivos semiconductores. Durante el mismo período, la demanda en el sector aeroespacial impulsó una mayor optimización de las varillas de molibdeno TZM, por ejemplo, mejorando el proceso de tratamiento térmico y la tecnología de tratamiento de superficies para mejorar su resistencia a la oxidación.

En el siglo XXI, la tecnología de producción y aplicación de la varilla de molibdeno TZM ha entrado

Copyright and Legal Liability Statement

en una nueva etapa. Los estudios han demostrado que el proceso de producción de las varillas de molibdeno TZM modernas ha logrado un alto grado de automatización y precisión. Por ejemplo, a través de la tecnología avanzada de sinterización por plasma y el proceso de tratamiento térmico al vacío, el tamaño de grano y la consistencia del rendimiento de las varillas de molibdeno TZM se han mejorado significativamente. Además, la introducción de la nanotecnología ha optimizado aún más la microestructura de las aleaciones TZM, mejorando así su durabilidad en entornos extremos.

En los últimos años, con el desarrollo de la tecnología de fabricación aditiva (impresión 3D), se ha explorado más a fondo el potencial de aplicación de la varilla de molibdeno TZM. Los investigadores comenzaron a explorar la fabricación directa de piezas complejas de aleación TZM a través de tecnologías como la fusión selectiva por láser (SLM), que no solo redujo los costos de producción, sino que también amplió las perspectivas de aplicación de las varillas de molibdeno TZM en dispositivos aeroespaciales y médicos. Por ejemplo, las piezas de aleación TZM impresas en 3D se pueden utilizar para fabricar boquillas de cohetes o moldes de alta temperatura con geometrías complejas.

1.3 El papel de la varilla de molibdeno TZM en la industria moderna y la investigación científica

En la industria moderna y la investigación científica, las varillas de molibdeno TZM desempeñan múltiples funciones debido a su combinación única de propiedades. En primer lugar, en el campo aeroespacial, las varillas de molibdeno TZM se utilizan ampliamente en la fabricación de toberas de motores de cohetes, álabes de turbinas y piezas estructurales de alta temperatura. Por ejemplo, empresas como SpaceX han adoptado aleaciones TZM en sus diseños de motores de cohetes para hacer frente al entorno de alta temperatura y alta presión en la cámara de combustión y las boquillas. Los datos técnicos de Chinatungsten Online muestran que el excelente rendimiento de las varillas de molibdeno TZM en estas aplicaciones se debe a su alto punto de fusión y bajo coeficiente de expansión térmica, que pueden mantener la estabilidad estructural bajo cargas de calor extremas.

En la industria nuclear, las barras de molibdeno TZM se utilizan en la fabricación de componentes estructurales y barras de control de reactores nucleares debido a su excelente resistencia a la radiación y estabilidad a altas temperaturas. La alta temperatura y el entorno de radiación intensa dentro de un reactor nuclear imponen demandas extremadamente altas al material, y la baja sección transversal de absorción de neutrones térmicos y la alta resistencia de las barras de molibdeno TZM las convierten en una opción ideal. Además, las barras de molibdeno TZM se utilizan en la fabricación de materiales orientados al plasma (PFM) para reactores de fusión nuclear para hacer frente al calor extremo y al bombardeo de partículas.

En el campo de la fabricación de hornos de alta temperatura, las varillas de molibdeno TZM se utilizan ampliamente como elementos calefactores, soportes y materiales de crisol. Debido a su alta temperatura de recristalización y excelente resistencia a la fluencia, las varillas de molibdeno TZM pueden funcionar de manera estable durante mucho tiempo en entornos de alta temperatura por encima de 1600 °C. Por ejemplo, en hornos de vacío y hornos de protección de atmósfera, las varillas de molibdeno TZM se utilizan en la fabricación de elementos calefactores y fundas

Copyright and Legal Liability Statement

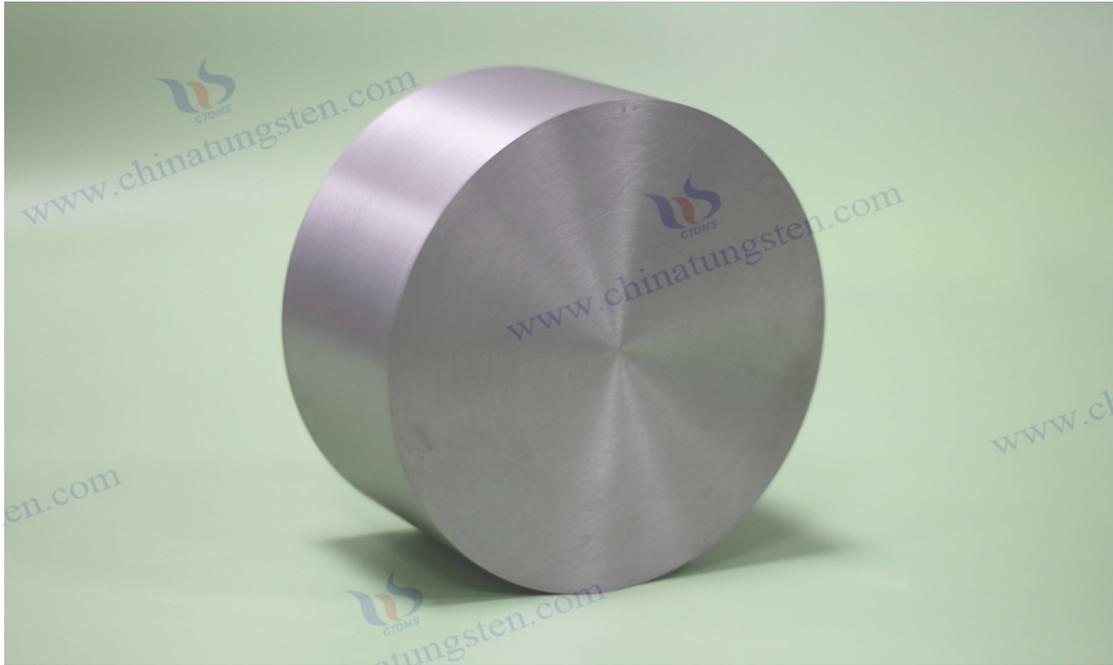
protectoras de termopar para garantizar la confiabilidad y durabilidad de los equipos a altas temperaturas.

En la industria de los semiconductores, las varillas de molibdeno TZM se utilizan como objetivos de pulverización catódica y accesorios de alta temperatura debido a su alta conductividad térmica y bajo coeficiente de expansión térmica. Por ejemplo, en el proceso de deposición física de vapor (PVD), las varillas de molibdeno TZM se utilizan como objetivos para depositar películas delgadas de alto rendimiento. Además, las varillas de molibdeno TZM también se utilizan en la fabricación de componentes clave en dispositivos de implantación de iones para cumplir con los requisitos de alta precisión y estabilidad en la fabricación de semiconductores.

En el campo de la investigación científica, las varillas de molibdeno TZM se utilizan ampliamente en pruebas de materiales a alta temperatura, investigación de física del plasma y desarrollo de tecnología de fabricación avanzada. Por ejemplo, en los ensayos de materiales a alta temperatura, las varillas de molibdeno TZM se utilizan como mordazas de muestras y elementos calefactores para simular las propiedades del material en condiciones de funcionamiento extremas. En la investigación de la física del plasma, las varillas de molibdeno TZM se utilizan como materiales estructurales para configuraciones experimentales debido a su excelente resistencia a la erosión del plasma. Además, las varillas de molibdeno TZM también muestran un gran potencial en el campo de la fabricación aditiva, y los investigadores están explorando el uso de la tecnología de impresión 3D para fabricar piezas de aleación TZM con formas complejas para satisfacer las necesidades especiales de los campos aeroespacial y médico.

La cuenta oficial de WeChat de Chinatungsten Online, "Chinatungsten Online", informó que la demanda del mercado mundial de varillas de molibdeno TZM ha seguido creciendo en los últimos años, especialmente en la región de Asia-Pacífico. Con el rápido desarrollo de China, India y otros países en el campo de la industria aeroespacial y nuclear, la perspectiva de aplicación de la varilla de molibdeno TZM es más amplia. En el futuro, con el avance de la nueva tecnología de materiales, se espera que las varillas de molibdeno TZM desempeñen un papel importante en más campos, como los equipos de energía renovable (como los colectores solares de alta temperatura) y los campos biomédicos (como los equipos de esterilización a alta temperatura).

Copyright and Legal Liability Statement



CTIA GROUP LTD TZM Varilla de molibdeno

2. Principio básico de la varilla de molibdeno TZM

2.1 Composición química y características de aleación de la varilla de molibdeno TZM

La composición química de las varillas de molibdeno TZM generalmente incluye aproximadamente 99.38-99.5% de molibdeno, 0.4-0.55% de titanio, 0.06-0.12% de circonio y 0.01-0.04% de carbono. Esta relación de aleación precisa mejora significativamente las propiedades del molibdeno a través de mecanismos como el fortalecimiento de la solución, el fortalecimiento por precipitación y el fortalecimiento de la segunda fase, lo que da como resultado una excelente estabilidad en entornos de alta temperatura, alta tensión y corrosivos.

Detalles y papel de la composición química

El molibdeno es un material de matriz con un alto punto de fusión (2623 °C), una excelente conductividad térmica (aprox. 139 W/m·K) y un bajo coeficiente de expansión térmica (aprox. $5,3 \times 10^{-6}/K$), lo que lo hace ideal para aplicaciones de alta temperatura. Sin embargo, el molibdeno puro tiene baja resistencia a altas temperaturas y es propenso a la fluencia y la fragilización por recristalización, lo que limita su aplicación en ambientes extremos. Las aleaciones TZM superan estas deficiencias mediante la adición de oligoelementos:

Titanio (Ti): La adición de titanio mejora la estructura cristalina del molibdeno a través de un mecanismo de fortalecimiento de la solución. La solución sólida de átomos de titanio en la red de molibdeno causa distorsión de la red y dificulta el movimiento de dislocación, mejorando así la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la fluencia del material. Además, el titanio reacciona con el carbono para formar partículas de carburo de titanio (TiC), que se mejoran aún más mediante el fortalecimiento de la precipitación para mejorar aún más la dureza y la resistencia al desgaste de la aleación.

Copyright and Legal Liability Statement

Zirconio (Zr): El circonio actúa de manera similar al titanio, aumentando la resistencia del molibdeno a través del fortalecimiento de la solución. Los átomos de circonio también reaccionan con el carbono para formar partículas de carburo de circonio (ZrC), que se distribuyen uniformemente en la matriz de molibdeno, lo que mejora la resistencia a la fluencia y la estabilidad a altas temperaturas del material. La adición de circonio también mejora la resistencia a la oxidación de la aleación TZM, haciéndola más duradera en entornos de oxidación a alta temperatura.

Carbono (C): La adición de carbono es la clave para mejorar el rendimiento de las aleaciones TZM. Las partículas de carburo (como TiC y ZrC) formadas por la reacción del carbono con el titanio y el circonio mejoran significativamente la resistencia y la dureza de la aleación a través del mecanismo de fortalecimiento por precipitación. A altas temperaturas, estas partículas pueden prevenir eficazmente el crecimiento del grano y mantener la estructura de grano fino del material, mejorando así su temperatura de recristalización y resistencia a la fluencia.

La relación entre la microestructura y el rendimiento

La microestructura de la varilla de molibdeno TZM tiene un impacto importante en sus propiedades. Las aleaciones TZM preparadas por el proceso de pulvimetalurgia tienen tamaños de grano finos (normalmente entre 3,0 y 5,0 micras), lo que ayuda a mejorar la resistencia y la tenacidad del material. La pulvimetalurgia garantiza la distribución uniforme de titanio, circonio y carbono en la matriz de molibdeno mediante el control preciso del tamaño de partícula y la proporción de mezcla del polvo en bruto. Los procesos de tratamiento térmico, como el recocido y el envejecimiento, optimizan aún más la microestructura de las varillas de molibdeno TZM. Por ejemplo, el recocido a alta temperatura puede eliminar las tensiones residuales durante el procesamiento, mientras que el envejecimiento promueve la precipitación de partículas de carburo, mejorando así las propiedades mecánicas del material.

Resistencia a la corrosión y a la oxidación

Las varillas de molibdeno TZM exhiben una excelente resistencia a la corrosión en una variedad de entornos químicos, especialmente en atmósferas no oxidantes de alta temperatura como el vacío o los gases inertes. Su resistencia a la corrosión se debe a la estabilidad química de la matriz de molibdeno y al efecto protector de las partículas de carburo. En un entorno oxidante a alta temperatura, se puede formar una densa capa protectora de óxido (por ejemplo, MoO₂) en la superficie de la varilla de molibdeno TZM, lo que ralentiza las reacciones de oxidación posteriores. Por el contrario, el molibdeno puro es propenso a la formación de trióxido de molibdeno volátil (MoO₃) a altas temperaturas, lo que resulta en una rápida pérdida de material. De acuerdo con los datos técnicos de Chinatungsten Online, las varillas de molibdeno TZM pueden funcionar de manera estable en un entorno oxidante por debajo de 1000 °C y, a temperaturas más altas, se requieren recubrimientos antioxidantes (como recubrimientos de siliciuro) para prolongar la vida útil.

La influencia del proceso de producción en las propiedades de la aleación.

La producción de varillas de molibdeno TZM generalmente se realiza mediante un proceso de pulvimetalurgia que incluye pasos como la mezcla de materias primas, el prensado, la sinterización y el tratamiento térmico. Según los datos de Chinatungsten Online, el proceso de producción

Copyright and Legal Liability Statement

moderno ha mejorado significativamente la consistencia del rendimiento de las varillas de molibdeno TZM a través de la tecnología avanzada de sinterización por plasma y el proceso de tratamiento térmico al vacío. Por ejemplo, la tecnología de sinterización por plasma permite la sinterización de alta densidad a temperaturas más bajas, lo que reduce el crecimiento del grano y, por lo tanto, mantiene la estructura de grano fino del material. Además, las técnicas de tratamiento de superficies, como los recubrimientos de deposición química de vapor, mejoran aún más la resistencia a la oxidación y al desgaste de las varillas de molibdeno TZM, lo que las hace adecuadas para una gama más amplia de escenarios industriales.

Adecuación de los escenarios de aplicación a las composiciones químicas

La composición química de la varilla de molibdeno TZM la hace ampliamente utilizada en la industria aeroespacial, nuclear, fabricación de semiconductores y otros campos. Por ejemplo, en el sector aeroespacial, la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la fluencia de las varillas de molibdeno TZM las convierten en materiales ideales para toberas de cohetes y palas de turbinas. En la industria nuclear, la baja sección transversal de absorción de neutrones térmicos y la resistencia a la radiación de las barras de molibdeno TZM las hacen adecuadas para su uso en la fabricación de componentes estructurales de reactores nucleares. En la industria de los semiconductores, el bajo coeficiente de expansión térmica y la alta conductividad térmica de las varillas de molibdeno TZM las convierten en el material de elección para objetivos de pulverización catódica y accesorios de alta temperatura.

2.2 Propiedades físicas y mecánicas de la varilla de molibdeno TZM

Las propiedades físicas y mecánicas de la varilla de molibdeno TZM son la base para su amplia aplicación en entornos de alta temperatura y alta tensión. El siguiente es un análisis detallado de sus principales propiedades, que cubren la resistencia a altas temperaturas, la resistencia a la fluencia, la conductividad térmica, el coeficiente de expansión térmica, la dureza, la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión.

Intensidad de alta temperatura

La resistencia a la tracción y el límite elástico de la varilla de molibdeno TZM a alta temperatura son significativamente más altos que los del molibdeno puro. Por ejemplo, a 1200 °C, la resistencia a la tracción de las varillas de molibdeno TZM puede alcanzar los 400-500 MPa, mientras que el molibdeno puro es de solo 200-300 MPa. Esta excelente resistencia a altas temperaturas se debe al refuerzo del titanio, el circonio y el carbono. El titanio y el circonio mejoran la resistencia de la red de la matriz de molibdeno a través del fortalecimiento de la solución, mientras que la precipitación de partículas de carburo como TiC y ZrC dificulta aún más el movimiento de las dislocaciones, mejorando así la resistencia a la deformación del material. El aumento de la resistencia a altas temperaturas otorga a las varillas de molibdeno TZM una ventaja significativa en la industria aeroespacial (por ejemplo, boquillas de cohetes) y en la fabricación de hornos de alta temperatura.

Resistencia a la fluencia

La fluencia es uno de los principales modos de falla de los materiales de alta temperatura bajo tensión a largo plazo. La resistencia a la fluencia de la varilla de molibdeno TZM es mucho mejor

Copyright and Legal Liability Statement

que la del molibdeno puro. En condiciones de tensión de 1400 °C y 20 MPa, la tasa de fluencia de la varilla de molibdeno TZM es solo 1/10 de la del molibdeno puro. Esta excelente resistencia a la fluencia se debe a la acción de fijación de las partículas de carburo, que evitan eficazmente el deslizamiento del límite del grano y la escalada por dislocación. Además, la estructura de grano fino de las varillas de molibdeno TZM mejora aún más su resistencia a la fluencia, lo que las hace excelentes en escenarios que requieren un funcionamiento estable a largo plazo, como hornos de alta temperatura y reactores nucleares.

Alta temperatura de recristalización

La temperatura de recristalización de la varilla de molibdeno TZM es de aproximadamente 1400 °C, que es mucho más alta que los 1000 °C del molibdeno puro. Esto significa que la varilla de molibdeno TZM es capaz de mantener su estructura de grano fino a altas temperaturas, evitando el crecimiento del grano y la degradación del rendimiento. El aumento de la temperatura de recristalización se debe al efecto sinérgico del titanio, el circonio y el carbono. El fortalecimiento de la solución de titanio y circonio mejora la estabilidad de la red cristalina, mientras que la precipitación de partículas de carburo evita la migración de los límites de grano. Este rendimiento permite que las varillas de molibdeno TZM funcionen de manera estable durante mucho tiempo en entornos de alta temperatura por encima de 1600 °C, lo que las hace adecuadas para hornos de alta temperatura y componentes aeroespaciales.

Conductividad térmica y coeficiente de dilatación térmica

La varilla de molibdeno TZM tiene una excelente conductividad térmica (alrededor de 139 W / m·K) y un bajo coeficiente de expansión térmica (aproximadamente 5.3×10^{-6} / K). La alta conductividad térmica le permite disipar el calor rápidamente y evitar la degradación del rendimiento causada por el sobrecalentamiento local, lo que lo hace particularmente adecuado para su uso en accesorios de alta temperatura y objetivos de pulverización catódica en dispositivos semiconductores. El bajo coeficiente de expansión térmica asegura la estabilidad dimensional del material a altas temperaturas, reduciendo las grietas y deformaciones causadas por el estrés térmico. Esta combinación de propiedades le da a las varillas de molibdeno TZM una ventaja en aplicaciones que requieren altas cargas térmicas y precisión dimensional, como en hornos de vacío y configuraciones experimentales de física de plasma.

Dureza y resistencia a la abrasión

La dureza de las varillas de molibdeno TZM (dureza Vickers aprox. 250-300 HV) es mayor que la del molibdeno puro (aprox. 200 HV), gracias al efecto fortalecedor de las partículas de carburo. La distribución uniforme de las partículas de carburo de titanio y carburo de circonio mejora la dureza de la superficie y la resistencia al desgaste del material, lo que lo hace adecuado para su uso en la fabricación de moldes, herramientas de corte y piezas resistentes al desgaste. Por ejemplo, en la fabricación de moldes a alta temperatura, las varillas de molibdeno TZM pueden soportar altas tensiones y desgaste, lo que prolonga la vida útil del molde.

Copyright and Legal Liability Statement

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

High Melting Point: Suitable for extreme high-temperature environments.

Excellent High-Temperature Strength: Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

Good Thermal Stability and Creep Resistance: Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

Superior Corrosion and Oxidation Resistance: Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

Excellent Machinability: Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

High-Temperature Furnace Components: Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

Aerospace Industry: Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

Nuclear Industry: Used in reactor support structures and control rod guide systems.

Electronics Industry: Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

Mold Manufacturing: Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Copyright and Legal Liability Statement

Resistencia a la corrosión

Las varillas de molibdeno TZM exhiben una buena resistencia a la corrosión en una variedad de entornos químicos, especialmente en atmósferas no oxidantes de alta temperatura como vacío, argón o nitrógeno. Su resistencia a la corrosión se debe a la estabilidad química de la matriz de molibdeno y al efecto protector de las partículas de carburo. En el entorno de oxidación a alta temperatura, la varilla de molibdeno TZM puede formar una densa capa protectora de MoO_2 para ralentizar la reacción de oxidación. Los estudios han demostrado que las varillas de molibdeno TZM pueden funcionar de manera estable en un entorno oxidante por debajo de $1000\text{ }^\circ\text{C}$ y, a temperaturas más altas, se requieren recubrimientos antioxidantes para mejorar aún más la durabilidad.

Otras propiedades físicas

Densidad: La densidad de las varillas de molibdeno TZM es de aproximadamente $10,2\text{ g/cm}^3$, que es menor que la de la aleación de tungsteno (aproximadamente $19,3\text{ g/cm}^3$), lo que le da una ventaja en aplicaciones sensibles al peso como la aeroespacial.

Conductividad: Las varillas de molibdeno TZM tienen buena conductividad (alrededor del 18% IACS) y son adecuadas para la fabricación de electrodos de alta temperatura y piezas conductoras.

Resistencia a la radiación: En la industria nuclear, las varillas de molibdeno TZM pueden soportar la irradiación de neutrones y rayos gamma de alta energía debido a su baja sección transversal de absorción de neutrones térmicos y alta resistencia.

2.3 Comparación con el molibdeno puro y otras superaleaciones

En comparación con el molibdeno puro y otras superaleaciones (como aleaciones de tungsteno, aleaciones a base de níquel, materiales cerámicos), las varillas de molibdeno TZM tienen ventajas de rendimiento únicas. A continuación se muestra una comparación detallada de sus propiedades, que cubre aspectos como la resistencia a altas temperaturas, la resistencia a la fluencia, la resistencia a la oxidación, la procesabilidad y los escenarios de aplicación.

Comparación con el molibdeno puro

El molibdeno puro (tungsteno) tiene un alto punto de fusión ($2623\text{ }^\circ\text{C}$), buena conductividad eléctrica y térmica y un bajo coeficiente de expansión térmica, pero su resistencia a altas temperaturas es baja y es propenso a la fluencia y la fragilización por recristalización. Las varillas de molibdeno TZM mejoran significativamente el rendimiento a altas temperaturas al agregar titanio, circonio y carbono:

Resistencia a altas temperaturas: a $1200\text{ }^\circ\text{C}$, la resistencia a la tracción de la varilla de molibdeno TZM es de 400-500 MPa, mientras que el molibdeno puro es de solo 200-300 MPa. Los mecanismos de fortalecimiento de la solución y del fortalecimiento de la precipitación del TZM lo hacen más resistente a la deformación a altas temperaturas.

Resistencia a la fluencia: La tasa de fluencia de la varilla de molibdeno TZM es aproximadamente 1/10 de la del molibdeno puro, que es adecuado para entornos de estrés a alta temperatura a largo plazo.

Temperatura de recristalización: La temperatura de recristalización del TZM ($1400\text{ }^\circ\text{C}$) es mucho más alta que la del molibdeno puro ($1000\text{ }^\circ\text{C}$), lo que lo hace estructuralmente estable a temperaturas

Copyright and Legal Liability Statement

más altas.

Resistencia a la oxidación: la varilla de molibdeno TZM puede formar una capa protectora de óxido densa por debajo de 800 °C, mientras que el molibdeno puro es propenso a MoO_3 volátil, lo que resulta en una pérdida rápida.

Procesabilidad: La procesabilidad de la varilla de molibdeno TZM es ligeramente inferior a la del molibdeno puro, pero se pueden procesar formas complejas optimizando el proceso de tratamiento térmico.

Comparación con la aleación de tungsteno

La aleación de tungsteno tiene un punto de fusión más alto (3422 °C) y densidad (19,3 g/cm³), pero es difícil de procesar y costosa. Las ventajas comparativas de las varillas de molibdeno TZM incluyen:

Densidad: La densidad de las varillas de molibdeno TZM (10,2 g/cm³) es mucho menor que la de las aleaciones de tungsteno, lo que las hace adecuadas para aplicaciones sensibles al peso, como la aeroespacial.

Procesabilidad: La ductilidad y maquinabilidad de la varilla de molibdeno TZM son mejores que las de la aleación de tungsteno, lo que facilita la fabricación de piezas con formas complejas.

Resistencia a la oxidación: la varilla de molibdeno TZM es más duradera que la aleación de tungsteno en un entorno de oxidación a alta temperatura, especialmente por debajo de 1000 °C.

Costo: La varilla de molibdeno TZM es menos costosa de producir que la aleación de tungsteno, lo que la hace más económica en muchas aplicaciones.

Comparación con aleaciones a base de níquel

Las aleaciones a base de níquel (por ejemplo, Inconel 718) tienen buena resistencia y resistencia a la corrosión a altas temperaturas, pero su punto de fusión (alrededor de 1350 °C) es mucho más bajo que el de las varillas de molibdeno TZM, y se produce un reblandecimiento severo por encima de 1600 °C. Las ventajas comparativas de las varillas de molibdeno TZM incluyen:

Estabilidad a alta temperatura: La varilla de molibdeno TZM aún puede mantener la estabilidad estructural por encima de 1600 °C, mientras que las aleaciones a base de níquel han fallado a esta temperatura.

Coefficiente de expansión térmica: El coeficiente de expansión térmica de TZM (5.3×10^{-6} / K) es menor que el de las aleaciones a base de níquel (aproximadamente 13×10^{-6} / K), lo que lo hace más adecuado para aplicaciones que requieren estabilidad dimensional.

Resistencia a la radiación: La baja sección transversal de absorción de neutrones térmicos de las barras de molibdeno TZM las hace superiores a las aleaciones a base de níquel en la industria nuclear.

Comparación con materiales cerámicos

Los materiales cerámicos, como el zirconio, son extremadamente resistentes al calor, pero son frágiles y difíciles de mecanizar en formas complejas. Las ventajas comparativas de las varillas de molibdeno TZM incluyen:

Copyright and Legal Liability Statement

Tenacidad: La varilla de molibdeno TZM tiene tanto la tenacidad del metal como la estabilidad de la alta temperatura, lo que es adecuado para escenarios que requieren alta resistencia y tenacidad.

Procesabilidad: Las varillas de molibdeno TZM se pueden forjar, laminar y mecanizar para crear componentes complejos, mientras que los materiales cerámicos a menudo requieren un costoso proceso de sinterización.

Conductividad térmica: La conductividad térmica del TZM ($139 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) es muy superior a la de los materiales cerámicos (alrededor de $2\text{-}30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), lo que la hace adecuada para aplicaciones que requieren una rápida disipación de calor.

Comparación completa de aplicaciones

Las varillas de molibdeno TZM son ampliamente utilizadas en la industria aeroespacial, nuclear, fabricación de semiconductores y fabricación de hornos de alta temperatura. En comparación con el molibdeno puro, su rendimiento a alta temperatura es mejor; En comparación con la aleación de tungsteno, es liviana y de bajo costo; En comparación con las aleaciones a base de níquel, tiene una mayor estabilidad a altas temperaturas y resistencia a la radiación; En comparación con los materiales cerámicos, tiene mejor tenacidad y procesabilidad. Esta combinación de propiedades hace que las varillas de molibdeno TZM sean ideales para aplicaciones de alta temperatura en una amplia gama de campos.

2.4 Mecanismo de trabajo en un entorno de alta temperatura

El mecanismo de trabajo de la varilla de molibdeno TZM en un entorno de alta temperatura es el núcleo de su excelente rendimiento, que involucra muchos aspectos, como el fortalecimiento de la solución, el fortalecimiento de la precipitación, el mecanismo antioxidante, la conductividad térmica y el mecanismo de expansión térmica, y el mecanismo de resistencia a la radiación. A continuación se presenta un análisis detallado de estos mecanismos.

Fortalecimiento de la solución

La solución sólida de átomos de titanio y circonio en cristales de molibdeno dificulta el movimiento de dislocaciones a través de la distorsión de la red, mejorando así la resistencia a alta temperatura del material. Este mecanismo es particularmente efectivo a altas temperaturas, donde el movimiento de dislocaciones es la principal causa de fluencia a altas temperaturas. El radio atómico del titanio y el circonio es ligeramente diferente al del molibdeno, lo que resulta en una ligera deformación de la red cristalina, lo que aumenta la resistencia al movimiento de dislocación, mejorando así la resistencia a la tracción y la resistencia a la fluencia de la varilla de molibdeno TZM.

Aumento de las precipitaciones

Las partículas de carburo (por ejemplo, TiC y ZrC) formadas por la reacción del carbono con el titanio y el circonio se distribuyen uniformemente en la matriz de molibdeno, y estas partículas mejoran la fuerza y la resistencia a la fluencia del material al fijar dislocaciones y límites de grano. A altas temperaturas, las partículas de carburo pueden prevenir eficazmente el crecimiento del grano, mantener la estructura de grano fino del material y, por lo tanto, aumentar su temperatura de recrystalización. Los estudios han demostrado que el tamaño de partícula de carburo de las varillas de molibdeno TZM suele estar entre $0,1$ y 1 micras, y su uniformidad de distribución es fundamental

Copyright and Legal Liability Statement

para el rendimiento.

Mecanismo antioxidante

En un entorno oxidante a alta temperatura, se formará una densa capa protectora de MoO_2 en la superficie de la varilla de molibdeno TZM para ralentizar las reacciones de oxidación posteriores. Por el contrario, el molibdeno puro es propenso a la formación de MoO_3 volátil, lo que conduce a una rápida pérdida de material. La resistencia a la oxidación de las varillas de molibdeno TZM se debe a la adición de titanio y circonio, que promueven la formación de una densa capa de óxido. Por debajo de $1000\text{ }^\circ\text{C}$, las varillas de molibdeno TZM pueden funcionar de manera estable en un entorno oxidante, mientras que a temperaturas más altas, se requieren recubrimientos antioxidantes como el siliciuro de molibdeno o los recubrimientos de alúmina para prolongar su vida útil.

Conductividad térmica y mecanismos de expansión térmica

La alta conductividad térmica de las varillas de molibdeno TZM ($139\text{ W/m}\cdot\text{K}$) les permite disipar el calor rápidamente y evitar la degradación del rendimiento causada por el sobrecalentamiento local. Este rendimiento es particularmente importante en la fabricación de equipos semiconductores y hornos de alta temperatura. El bajo coeficiente de expansión térmica de TZM ($5.3\times 10^{-6}/\text{K}$) asegura la estabilidad dimensional del material a altas temperaturas, reduciendo las grietas y deformaciones causadas por el estrés térmico. Por ejemplo, en los hornos de vacío, las varillas de molibdeno TZM se utilizan como elementos calefactores para soportar ciclos rápidos de calentamiento y enfriamiento mientras permanecen estructuralmente intactas.

Mecanismo de endurecimiento por radiación

En la industria nuclear, las barras de molibdeno TZM son resistentes a la irradiación de neutrones y rayos gamma de alta energía debido a su baja sección transversal de absorción de neutrones térmicos y alta resistencia. Esta propiedad lo convierte en un material ideal para reactores nucleares y dispositivos de fusión. Por ejemplo, en el material de revestimiento de plasma (PFM) de un reactor de fusión nuclear, las barras de molibdeno TZM son capaces de resistir el bombardeo de partículas de alta energía mientras mantienen la estabilidad estructural. Además, la resistencia a la radiación de TZM también se debe a su estructura de grano fino y al efecto fortalecedor de las partículas de carburo, que reducen los defectos cristalinos inducidos por la radiación.

Rendimiento integral en entornos de alta temperatura

El rendimiento integral de la varilla de molibdeno TZM en un entorno de alta temperatura se beneficia del efecto sinérgico de sus múltiples mecanismos de fortalecimiento. El fortalecimiento de la solución y el fortalecimiento de la precipitación mejoran la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la fluencia, el mecanismo antioxidante prolonga la vida útil del material en el entorno oxidante, la alta conductividad térmica y el bajo coeficiente de expansión térmica garantizan la estabilidad térmica, y la resistencia a la radiación hace que tenga ventajas únicas en la industria nuclear. En conjunto, estos mecanismos permiten que las varillas de molibdeno TZM funcionen de manera estable en entornos extremos por encima de $1600\text{ }^\circ\text{C}$, cumpliendo con los altos requisitos de la industria aeroespacial, nuclear y de fabricación de semiconductores.

Copyright and Legal Liability Statement

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

High Melting Point: Suitable for extreme high-temperature environments.

Excellent High-Temperature Strength: Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

Good Thermal Stability and Creep Resistance: Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

Superior Corrosion and Oxidation Resistance: Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

Excellent Machinability: Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

High-Temperature Furnace Components: Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

Aerospace Industry: Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

Nuclear Industry: Used in reactor support structures and control rod guide systems.

Electronics Industry: Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

Mold Manufacturing: Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Copyright and Legal Liability Statement

3.5 CTIA GROUP LTD TZM Varilla de molibdeno MSDS

Sección 1: Identificación de productos químicos

Nombre químico: Varilla de molibdeno TZM

Nombre en inglés: Varilla de molibdeno TZM

Números CAS: Molibdeno (7439-98-7), Titanio (7440-32-6), Circonio (7440-67-7), Carbono (7440-44-0)

Sección 2: Composición/Información sobre los ingredientes

Composición química:

Molibdeno (Mo) $\geq 99.38\%$

Titanio (Ti) 0,4–0,55%

Zirconio (Zr) 0,06–0,12%

Carbono (C) 0,01–0,04%

Sección 3: Identificación de peligros

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

Riesgos de incendio y explosión: No inflamable y no irritante.

Sección 4: Medidas de primeros auxilios

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

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

Busca atención médica.

Inhalación: Llevar a la persona afectada al aire libre. Si tiene dificultad para respirar, administre oxígeno. Busca atención médica.

Ingestión: Beba abundante agua tibia e induzca el vómito. Busca atención médica.

Sección 5: Medidas de extinción de incendios

Productos de combustión peligrosos: Productos de descomposición desconocidos.

Método de extinción: Los bomberos deben usar máscaras antigás y trajes protectores completos, y extinguir los incendios contra el viento.

Medios de extinción: Arena seca, polvo.

Sección 6: Medidas de Liberación Accidental

Respuesta a emergencias:

Aísle el área contaminada y restrinja el acceso.

Elimine las fuentes de ignición.

El personal de emergencia debe usar máscaras contra el polvo (cara completa) y trajes protectores.

Evite levantar polvo; Barre con cuidado el material y colócalo en bolsas para transferirlo a un lugar seguro.

Para derrames grandes, cúbralo con láminas de plástico o lonas.

Recoja para reciclar o desechar en una instalación de tratamiento de residuos.

Copyright and Legal Liability Statement

Sección 7: Manipulación y almacenamiento

Manipulación:

Los operadores deben estar especialmente capacitados y seguir estrictamente los procedimientos operativos.

El EPP recomendado incluye máscaras antipolvo con filtro autocebante, gafas de seguridad química, ropa de trabajo resistente a la permeación y guantes de goma.

Mantener alejado del fuego y de fuentes de calor. Está terminantemente prohibido fumar en el lugar de trabajo.

Utilice sistemas y equipos de ventilación a prueba de explosiones.

Evite la generación de polvo y el contacto con oxidantes y halógenos.

Manéjelo con cuidado para evitar daños al embalaje y a los contenedores.

Proporcionar equipos adecuados de extinción de incendios y respuesta a derrames.

Los contenedores vacíos pueden retener residuos peligrosos.

Almacenamiento:

Almacene en un almacén fresco y ventilado, lejos del fuego y de fuentes de calor.

Almacene separado de oxidantes y halógenos; Evite el almacenamiento mixto.

Proporcionar el equipo adecuado de extinción de incendios y materiales de contención de fugas.

Sección 8: Controles de exposición/Protección personal

China MAC (mg/m³): 6

Antigua URSS MAC (mg/m³): 6

TLVTN (ACGIH): 1 mg/m³

TLVWN (ACGIH): 3 mg/m^μ

Método de monitoreo: colorimetría de tiocianato-potasio y titanio

Controles de ingeniería: Producción libre de polvo y ventilación general.

Protección respiratoria: Cuando los niveles de polvo excedan los límites, use máscaras antipolvo tipo filtro autocebantes. Para emergencias y evacuaciones, use un respirador con suministro de aire.

Protección ocular: Use gafas de seguridad químicas.

Protección del cuerpo: Desgaste Ropa de trabajo protectora resistente a la permeación.

Protección de las manos: Use guantes de goma.

Sección 9: Propiedades físicas y químicas

Ingrediente principal: Sustancia pura

Aspecto: Sólido, metálico de color blanco brillante (mecanizado); Superficie negra (materia prima)

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 saturado (kPa): Sin datos

Calor de combustión (kJ/mol): Sin datos

Copyright and Legal Liability Statement

Temperatura crítica (°C): Sin datos

Presión crítica (MPa): Sin datos

Coefficiente de partición logarítmica (n-octanol/agua): Sin datos

Punto de inflamación (°C): Sin datos

Temperatura de autoignición (°C): Sin datos

Límite de explosión – Superior (% V/V): Sin datos

Límite de explosión – Inferior (% V/V): Sin datos

Solubilidad: Soluble en ácido nítrico y ácido fluorhídrico

Usos principales: Utilizado en la producción de moldes, alambres de molibdeno, componentes electrónicos, etc.

Sección 10: Estabilidad y reactividad

Materiales incompatibles: Ácidos y bases fuertes.

Sección 11: Información toxicológica

Toxicidad aguda: No hay datos disponibles

LC50: No hay datos disponibles

Sección 12: Información ecológica

Datos ecológicos: No disponibles

Sección 13: Consideraciones sobre la eliminación

Método de eliminación: Consulte las regulaciones nacionales y locales antes de la eliminación.

Recicla si es posible.

Sección 14: Información de transporte

Código de Mercancías Peligrosas: No disponible

Categoría de embalaje: Z01

Precauciones de transporte:

El embalaje debe estar intacto y debidamente asegurado antes del transporte.

Asegúrese de que no haya fugas, colapsos, caídas o daños durante el transporte.

No lo mezcle con oxidantes, halógenos o productos químicos comestibles.

Protéjalo de la luz solar, la lluvia y las altas temperaturas durante el transporte.

Limpie los vehículos a fondo después del transporte.

Sección 15: Información reglamentaria

Normativa relevante:

Reglamento sobre la Gestión de la Seguridad de los Productos Químicos Peligrosos (Consejo de Estado, 17 de febrero de 1987)

Detalles de 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 productos químicos en el lugar de trabajo ([1996] Lao Bu Fa N° 423)

Copyright and Legal Liability Statement

Normas higiénicas para tungsteno en el aire del lugar de trabajo (GB 16229-1996), que especifica la concentración máxima permitida y los métodos de detección.

Sección 16: Información del proveedor

Proveedor: CTIA GROUP LTD

Teléfono: 0592-5129696 / 5129595



CTIA GROUP LTD TzM Varilla de molibdeno

3. Rendimiento de la varilla de molibdeno TzM

3.1 Propiedades físicas y químicas de la varilla de molibdeno TzM

Como material de aleación de alto rendimiento a base de molibdeno, la varilla de molibdeno TzM exhibe excelentes propiedades físicas y químicas al agregar titanio (Ti), circonio (Zr) y carbono (C). Estas propiedades lo hacen prometedor para una amplia gama de aplicaciones en entornos corrosivos, de alta temperatura y de alta tensión. El siguiente es un análisis detallado de las propiedades físicas y químicas de la varilla de molibdeno TzM desde cuatro aspectos: punto de fusión y estabilidad térmica, densidad y conductividad térmica, resistencia a la oxidación y corrosión, y resistencia y tenacidad mecánicas.

3.1.1 Punto de fusión y estabilidad térmica de la varilla de molibdeno TzM

El punto de fusión de la varilla de molibdeno TzM es cercano a 2623 °C (alrededor de 2896 K) de molibdeno puro, y es una de las superaleaciones comúnmente utilizadas en la industria. Su alto punto de fusión se debe a la estructura cristalina BCC (cúbica centrada en el cuerpo) de la matriz de molibdeno, que tiene una alta estabilidad a altas temperaturas y es capaz de soportar cargas térmicas extremas. En comparación con el molibdeno puro, la varilla de molibdeno TzM aumenta significativamente la temperatura de recristalización al agregar titanio, circonio y carbono, desde aproximadamente 1000 °C para molibdeno puro hasta más de 1400 °C. Esta alta temperatura de

Copyright and Legal Liability Statement

recristalización significa que las varillas de molibdeno TZM son capaces de mantener una estructura de grano fino a altas temperaturas, evitando la degradación del rendimiento debido al crecimiento del grano.

La estabilidad térmica es una ventaja clave de las varillas de molibdeno TZM en aplicaciones de alta temperatura. En el sector aeroespacial, como las toberas de los motores de cohetes y los componentes de las cámaras de combustión, las varillas de molibdeno TZM deben soportar cargas de calor instantáneas en entornos superiores a 2000 °C. Los resultados muestran que las varillas de molibdeno TZM aún pueden mantener una alta resistencia e integridad estructural a 1800 °C, mientras que el molibdeno puro ha experimentado un ablandamiento y fluencia significativos en las mismas condiciones. Los resultados muestran que la estabilidad térmica de las varillas de molibdeno TZM se debe al fortalecimiento de la solución de titanio y circonio y al fortalecimiento por precipitación de partículas de carburo como TiC y ZrC, que en conjunto mejoran la resistencia del material a la deformación a alta temperatura.

Además, la estabilidad térmica de la varilla de molibdeno TZM está estrechamente relacionada con su proceso de producción. Las varillas de molibdeno TZM preparadas por el proceso de pulvimetalurgia tienen una microestructura uniforme, que puede reducir eficazmente el deslizamiento del límite del grano y la dislocación a altas temperaturas. Los procesos de tratamiento térmico, como el recocido y el envejecimiento, optimizan aún más la estabilidad térmica del material. Por ejemplo, el recocido a alta temperatura puede eliminar las tensiones residuales durante el procesamiento, mientras que el envejecimiento promueve la precipitación de partículas de carburo y mejora la estabilidad del material a altas temperaturas.

3.1.2 Densidad y conductividad térmica de la varilla de molibdeno TZM

La densidad de la varilla de molibdeno TZM es de aproximadamente 10,2 g/cm³, que es menor que la de la aleación de tungsteno (19,3 g/cm³) pero mayor que la de las aleaciones a base de níquel (aproximadamente 8,5 g/cm³). Esta densidad media le otorga ventajas significativas en aplicaciones sensibles al peso, como componentes aeroespaciales y satelitales. En comparación con la aleación de tungsteno, la menor densidad de la varilla de molibdeno TZM reduce el peso estructural al tiempo que mantiene una alta resistencia y estabilidad a altas temperaturas.

La conductividad térmica de la varilla de molibdeno TZM es de 139 W/m·K, que es mucho mayor que la de los materiales cerámicos (alrededor de 2-30 W/m·K) y las aleaciones a base de níquel (alrededor de 10-20 W/m·K). La alta conductividad térmica le permite disipar el calor rápidamente y evitar la degradación del rendimiento causada por el sobrecalentamiento localizado. Por ejemplo, en la fabricación de equipos de semiconductores, las varillas de molibdeno TZM se utilizan como objetivos de pulverización catódica y accesorios de alta temperatura, y su alta conductividad térmica garantiza una distribución uniforme del calor y reduce las grietas causadas por el estrés térmico. Además, en la fabricación de hornos de alta temperatura, la varilla de molibdeno TZM se puede utilizar como elemento calefactor para transferir calor rápidamente y mejorar la uniformidad de la temperatura en el horno.

Copyright and Legal Liability Statement

La conductividad térmica está estrechamente relacionada con la microestructura de las varillas de molibdeno TZM. El proceso de pulvimetalurgia garantiza la continuidad de la trayectoria de la conductividad térmica mediante el control del tamaño de grano y la distribución de las partículas de carburo. Los estudios han demostrado que la conductividad térmica de las varillas de molibdeno TZM solo disminuye en aproximadamente un 10-15% a altas temperaturas (por ejemplo, 1200 °C), que es mucho mejor que la tasa de disminución del 20-25% del molibdeno puro. Esta conductividad térmica estable permite un excelente rendimiento en entornos de ciclo de alta temperatura.

3.1.3 Resistencia a la oxidación y corrosión de la varilla de molibdeno TZM

Las varillas de molibdeno TZM exhiben una excelente resistencia a la corrosión en atmósferas no oxidantes de alta temperatura como vacío, argón o nitrógeno. Su estabilidad química se debe a la inercia de la matriz de molibdeno y al fortalecimiento del titanio, el circonio y el carbono. En un entorno oxidante a alta temperatura, las varillas de molibdeno TZM son capaces de formar una capa densa de capa protectora de óxido de MoO_2 para ralentizar las reacciones de oxidación posteriores. Por el contrario, el molibdeno puro es propenso a propiedades volátiles a altas temperaturas como óxido de tungsteno, lo que conduce a un rápido deterioro del material. Los estudios han demostrado que las varillas de molibdeno TZM pueden funcionar de manera estable en un entorno oxidante por debajo de 1000 °C y, a temperaturas más altas, se requieren recubrimientos antioxidantes (como los recubrimientos de siliciuro de molibdeno o alúmina) para prolongar su vida útil.

En ambientes corrosivos, las varillas de molibdeno TZM tienen buena resistencia a ácidos, álcalis y soluciones salinas. Por ejemplo, en entornos de ácido sulfúrico diluido y ácido clorhídrico, las varillas de molibdeno TZM tienen una tasa de corrosión mucho más baja que las aleaciones de acero inoxidable y níquel. Esta resistencia a la corrosión hace que sea ampliamente utilizado en las industrias química y nuclear. Por ejemplo, en el entorno refrigerante de un reactor nuclear, las barras de molibdeno TZM son capaces de soportar altas temperaturas y corrosión química, manteniendo la integridad estructural.

La mejora de la resistencia a la oxidación y la corrosión también está estrechamente relacionada con la tecnología de tratamiento de superficies. Por ejemplo, la deposición de un recubrimiento antioxidante en la superficie de una varilla de molibdeno TZM mediante procesos de deposición química de vapor (CVD) o deposición física de vapor (PVD) puede mejorar significativamente su durabilidad en entornos oxidantes a alta temperatura. Además, las tecnologías de pulido de superficies y pulverización de plasma pueden reducir los defectos de la superficie y mejorar la resistencia a la corrosión.

3.1.4 Resistencia mecánica y tenacidad de la varilla de molibdeno TZM

La resistencia mecánica de la varilla de molibdeno TZM supera con creces la del molibdeno puro a altas temperaturas. Por ejemplo, a 1200 °C, la resistencia a la tracción de la varilla de molibdeno TZM es de 400-500 MPa, mientras que el molibdeno puro es de solo 200-300 MPa. Esta alta resistencia se debe al fortalecimiento de la solución de titanio y circonio y al fortalecimiento por precipitación de las partículas de carburo. Las partículas de carburo de titanio (TiC) y carburo de circonio (ZrC) se distribuyen uniformemente en la matriz de molibdeno, lo que mejora la dureza y

Copyright and Legal Liability Statement

la resistencia del material al fijar las dislocaciones y los límites de grano. La dureza Vickers de las varillas de molibdeno TZM es de aproximadamente 250-300 HV, que es más alta que los 200 HV del molibdeno puro, lo que las hace adecuadas para su uso en la fabricación de moldes resistentes al desgaste y herramientas de corte.

En términos de tenacidad, las varillas de molibdeno TZM exhiben una buena resistencia a la fractura a temperatura ambiente y a alta temperatura. En comparación con los materiales cerámicos, las varillas de molibdeno TZM tienen la ductilidad y tenacidad del metal, y pueden soportar ciertos impactos y deformaciones sin fracturas frágiles. Los resultados muestran que la tenacidad a la fractura (K_{IC}) de la varilla de molibdeno TZM es de aproximadamente $15-20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ a temperatura ambiente, que es mayor que la del molibdeno puro ($10-12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Esta excelente tenacidad le permite soportar entornos de tensión complejos en las industrias aeroespacial y nuclear.

La mejora de la resistencia mecánica y la tenacidad también está relacionada con el proceso de producción. Al controlar la temperatura y la presión de sinterización en el proceso de pulvimetalurgia, se puede optimizar el tamaño de grano y la distribución del carburo de la varilla de molibdeno TZM, equilibrando así la resistencia y la tenacidad. Por ejemplo, una temperatura de sinterización más baja (alrededor de $1800 \text{ }^\circ\text{C}$) puede obtener granos más finos y mejorar la tenacidad; La temperatura de sinterización más alta (alrededor de $2000 \text{ }^\circ\text{C}$) aumenta la resistencia.

3.2 Propiedades térmicas y mecánicas de la varilla de molibdeno TZM

Las propiedades térmicas y mecánicas de la varilla de molibdeno TZM son la base para su amplia aplicación en entornos de alta temperatura y alta tensión. El siguiente es un análisis detallado de cuatro aspectos: coeficiente de expansión térmica y deformación a alta temperatura, resistencia al choque térmico, rendimiento de fluencia y estabilidad a largo plazo, rendimiento a fatiga y capacidad de reciclaje.

3.2.1 Coeficiente de expansión térmica y deformación a alta temperatura de la varilla de molibdeno TZM

El coeficiente de expansión térmica de la varilla de molibdeno TZM es de aproximadamente $5,3 \times 10^{-6} / \text{K}$, que es mucho más bajo que el de las aleaciones a base de níquel (aproximadamente $13 \times 10^{-6} / \text{K}$) y el acero inoxidable (aproximadamente $16 \times 10^{-6} / \text{K}$). El bajo coeficiente de expansión térmica garantiza la estabilidad dimensional de las varillas de molibdeno TZM a altas temperaturas, reduciendo las grietas y la deformación causadas por el estrés térmico. Por ejemplo, en los hornos de vacío, las varillas de molibdeno TZM se utilizan como elementos calefactores para mantener la estabilidad geométrica durante los ciclos rápidos de calentamiento y enfriamiento.

La deformación a alta temperatura es un tema clave en el diseño de materiales de alta temperatura. La varilla de molibdeno TZM se fortalece mediante el fortalecimiento de la solución sólida de titanio y circonio y el fortalecimiento por precipitación de partículas de carburo, lo que reduce significativamente la tasa de deformación a alta temperatura. Bajo las condiciones de tensión de $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ y 20 MPa , la tasa de deformación de la varilla de molibdeno TZM es solo $1/5$ de la del molibdeno puro. Los estudios han demostrado que las partículas de carburo son capaces de fijar los

Copyright and Legal Liability Statement

límites de grano a altas temperaturas, evitando que los límites de grano se deslicen, reduciendo así la deformación. Los estudios han demostrado que la tasa de deformación de la varilla de molibdeno TZM por debajo de 1600 °C se puede controlar dentro del 0.1%, lo que es adecuado para moldes de alta temperatura y piezas aeroespaciales.

La estabilidad del coeficiente de expansión térmica también está relacionada con la microestructura de la varilla de molibdeno TZM. El tamaño de grano fino (10-50 micras) y la distribución uniforme del carburo reducen la migración del límite de grano a altas temperaturas, lo que garantiza la estabilidad dimensional. Además, las técnicas de tratamiento de superficies, como el pulido y el recubrimiento, pueden reducir aún más las concentraciones de estrés térmico y mejorar la resistencia a la deformación.

3.2.2 Resistencia al choque térmico de la varilla de molibdeno TZM

La resistencia al choque térmico es un indicador importante de la estabilidad de los materiales de alta temperatura en un entorno que cambia rápidamente. La varilla de molibdeno TZM exhibe una excelente resistencia al choque térmico debido a su alta conductividad térmica (139 W / m·K), bajo coeficiente de expansión térmica (5.3×10^{-6} / K) y alta resistencia mecánica. En las pruebas de choque térmico, las varillas de molibdeno TZM pueden soportar cientos de ciclos sin grietas obvias en un ciclo rápido de 1000 °C a temperatura ambiente, mientras que el molibdeno puro generalmente muestra microgrietas después de 50 ciclos en las mismas condiciones.

La mejora de la resistencia al choque térmico se debe a la microestructura y las propiedades de aleación de las varillas de molibdeno TZM. El fortalecimiento por precipitación de las partículas de carburo mejora la resistencia y tenacidad del material y reduce la propagación de grietas causadas por el estrés térmico. Además, la alta conductividad térmica permite que la varilla de molibdeno TZM disipe el calor rápidamente, reduciendo la tensión interna causada por los gradientes de temperatura. En el sector aeroespacial, las varillas de molibdeno TZM se utilizan como materiales de toberas de cohetes que son capaces de soportar cambios rápidos de temperatura en la cámara de combustión manteniendo la integridad estructural.

De acuerdo con los datos técnicos publicados, la resistencia al choque térmico de la varilla de molibdeno TZM se puede mejorar aún más optimizando el proceso de producción. Por ejemplo, al controlar la velocidad de enfriamiento durante el proceso de sinterización, se pueden reducir los defectos microscópicos y mejorar la resistencia del material al choque térmico. Además, los recubrimientos de superficie, como los recubrimientos de zirconio, pueden mejorar aún más la resistencia al choque térmico y prolongar la vida útil del material.

3.2.3 Comportamiento de fluencia y estabilidad a largo plazo de la varilla de molibdeno TZM

La fluencia es uno de los principales modos de falla de los materiales de alta temperatura bajo tensión a largo plazo. La resistencia a la fluencia de la varilla de molibdeno TZM es mucho mejor que la del molibdeno puro. En condiciones de tensión de 1400 °C y 20 MPa, la tasa de fluencia de la varilla de molibdeno TZM es solo 1/10 de la del molibdeno puro. Esta excelente resistencia a la fluencia se debe al fortalecimiento de la solución de titanio y circonio y a la fijación de las partículas de carburo. Las partículas de carburo pueden prevenir eficazmente el deslizamiento del límite del

Copyright and Legal Liability Statement

grano y la subida por dislocación, lo que ralentiza el proceso de fluencia.

La estabilidad a largo plazo es una ventaja clave de las varillas de molibdeno TZM en aplicaciones de alta temperatura. En los reactores nucleares, las barras de molibdeno TZM son componentes estructurales que deben funcionar durante varios años en un entorno de alta temperatura y alta radiación para mantener un rendimiento estable. Los estudios han demostrado que las varillas de molibdeno TZM pueden mantener un rendimiento estable hasta 5000 horas por debajo de 1600 °C, mientras que el molibdeno puro generalmente sufre una fluencia significativa dentro de las 1000 horas en las mismas condiciones. Los resultados muestran que la estabilidad a largo plazo de las varillas de molibdeno TZM está estrechamente relacionada con su estructura de grano fino y su distribución uniforme del carburo.

No se puede ignorar la influencia del proceso de producción en las propiedades de fluencia. Al optimizar la temperatura y la presión de sinterización en el proceso de pulvimetalurgia, se puede controlar el tamaño de grano y la distribución del carburo, lo que resulta en una mejor resistencia a la fluencia. Por ejemplo, una temperatura de sinterización más baja (alrededor de 1800 °C) da como resultado granos más finos y una mayor resistencia a la fluencia. Además, los procesos de tratamiento térmico, como el envejecimiento, pueden promover la precipitación de partículas de carburo, mejorando aún más la estabilidad a largo plazo.

3.2.4 Rendimiento a la fatiga y capacidad de reciclaje de la varilla de molibdeno TZM

El rendimiento a la fatiga de la varilla de molibdeno TZM bajo tensión cíclica a alta temperatura es mejor que el del molibdeno puro. Bajo las condiciones de tensión cíclica de 1200 °C y ± 200 MPa, la vida a fatiga de la varilla de molibdeno TZM puede alcanzar 10^5 ciclos, mientras que la del molibdeno puro es de solo 10^4 ciclos. Este excelente rendimiento a la fatiga se debe a su alta resistencia y tenacidad, así como a la inhibición de la propagación de grietas por partículas de carburo. Los resultados muestran que la tasa de crecimiento de grietas por fatiga de la varilla de molibdeno TZM es aproximadamente 1/3 de la del molibdeno puro, mostrando una mayor resistencia a la fatiga.

La capacidad de reciclar es una característica importante de la varilla de molibdeno TZM en un entorno de ciclo de alta temperatura. Por ejemplo, en hornos de alta temperatura, las varillas de molibdeno TZM se utilizan como elementos calefactores para mantener un rendimiento estable durante ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento. Las pruebas han demostrado que las varillas de molibdeno TZM son capaces de soportar miles de ciclos en ciclos de 1000 °C a temperatura ambiente sin una degradación significativa del rendimiento. Esta circularidad hace que sea ampliamente utilizado en hornos de alta temperatura y fabricación de equipos semiconductores.

La mejora en el rendimiento a la fatiga y la capacidad de reciclaje también está relacionada con la calidad de la superficie y la microestructura. El pulido de la superficie puede reducir los defectos de la superficie y reducir la probabilidad de inicio de grietas por fatiga. Los procesos de tratamiento térmico, como el recocido, pueden eliminar el estrés del mecanizado y aumentar la vida útil a la fatiga. Además, la adición de un recubrimiento antioxidante puede reducir las pérdidas por

Copyright and Legal Liability Statement

oxidación durante los ciclos a alta temperatura y prolongar la vida útil del ciclo.

3.3 Relación entre la microestructura y las propiedades de la varilla de molibdeno TZM

Las propiedades de las varillas de molibdeno TZM están estrechamente relacionadas con su microestructura, incluida la estructura y orientación del grano, el papel del titanio, el circonio y el carbono, así como la morfología de la superficie y las propiedades a alta temperatura. A continuación se presenta un análisis detallado de estos tres aspectos.

3.3.1 Estructura y orientación del grano de las varillas de molibdeno TZM

La estructura del grano de las varillas de molibdeno TZM generalmente se controla mediante un proceso de pulvimetalurgia con un tamaño de grano entre 10 y 50 micras. El tamaño de grano fino aumenta la resistencia y tenacidad del material, lo que reduce el deslizamiento del límite de grano y la fluencia a altas temperaturas. Los estudios han demostrado que las varillas de molibdeno TZM tienen un tamaño de grano más pequeño que el molibdeno puro (alrededor de 50-100 micras), gracias a la adición de titanio, circonio y carbono, que inhiben el crecimiento del grano mediante la formación de partículas de carburo.

La orientación del grano también tiene un impacto importante en el rendimiento de las varillas de molibdeno TZM. Durante el proceso de laminación o forjado, los granos de la varilla de molibdeno TZM formarán una cierta orientación a lo largo de la dirección de procesamiento, mostrando anisotropía. La resistencia a la tracción a lo largo de la dirección de rodadura suele ser aproximadamente un 10-15% mayor que en la dirección vertical. Los resultados muestran que mediante el control de la temperatura de laminación y la deformación, se puede optimizar la orientación del grano y mejorar las propiedades mecánicas del material. Por ejemplo, el laminado en caliente (alrededor de 1400 °C) puede obtener una orientación de grano más uniforme y mejorar la resistencia a altas temperaturas.

La optimización de la estructura del grano también está relacionada con el proceso de tratamiento térmico. El recocido puede aliviar el estrés del procesamiento y ajustar el tamaño del grano; El tratamiento de envejecimiento promueve la precipitación de partículas de carburo y mejora la resistencia del límite del grano. Juntos, estos procesos garantizan la estabilidad del rendimiento de las varillas de molibdeno TZM a altas temperaturas.

3.3.2 El papel del titanio, el circonio y el carbono

El titanio, el circonio y el carbono son los elementos clave para mejorar el rendimiento de las varillas de molibdeno TZM, y sus funciones se reflejan principalmente en los siguientes aspectos:

Titanio (Ti): El titanio mejora la resistencia de la red de la matriz de molibdeno a través del fortalecimiento de la solución. La solución sólida de átomos de titanio en la red de molibdeno causa distorsión de la red y dificulta el movimiento de las dislocaciones, mejorando así la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la fluencia. Además, el titanio reacciona con el carbono para formar partículas de carburo de titanio (TiC), que mejoran la dureza y la resistencia al desgaste del material mediante el fortalecimiento por precipitación.

Copyright and Legal Liability Statement

Zirconio (Zr): El circonio actúa de manera similar al titanio, mejorando la resistencia y estabilidad del material a través del fortalecimiento de la solución y el fortalecimiento de la precipitación. El circonio reacciona con el carbono para formar partículas de carburo de circonio (ZrC), que son capaces de fijar los límites de grano a altas temperaturas, evitando el crecimiento del grano y aumentando las temperaturas de recristalización. El circonio también mejora la resistencia a la oxidación de las varillas de molibdeno TZM.

Carbono (C): La adición de carbono es el núcleo de la mejora del rendimiento de las aleaciones TZM. Las partículas de carburo generadas por la reacción del carbono con el titanio y el circonio se distribuyen uniformemente en la matriz de molibdeno, y la resistencia, la resistencia a la fluencia y la temperatura de recristalización del material se mejoran fijando dislocaciones y límites de grano. Los estudios han demostrado que el tamaño y la distribución de las partículas de carburo alcanzan un estado óptimo cuando el contenido de carbono es de 0,01-0,04%.

Según la información disponible públicamente, el efecto sinérgico del titanio, el circonio y el carbono hace que las varillas de molibdeno TZM sean mucho más eficientes que el molibdeno puro. Por ejemplo, a 1400 °C, la resistencia a la tracción de las varillas de molibdeno TZM es aproximadamente 2 veces mayor que la del molibdeno puro y la tasa de fluencia se reduce en aproximadamente un 90%.

3.3.3 Morfología superficial y propiedades a alta temperatura de las varillas de molibdeno TZM

La morfología de la superficie de la varilla de molibdeno TZM tiene una influencia importante en su rendimiento a altas temperaturas. Los defectos superficiales (por ejemplo, microfisuras, porosidad) pueden convertirse en puntos de concentración de tensiones, lo que provoca la propagación de grietas a altas temperaturas. La topografía de la superficie se puede mejorar significativamente mediante técnicas de pulido de superficies, pulverización de plasma o recubrimiento para mejorar el rendimiento a altas temperaturas.

En el entorno de oxidación a alta temperatura, la morfología de la superficie de la varilla de molibdeno TZM cambiará para formar una densa capa protectora de MoO₂. La formación de esta capa protectora está estrechamente relacionada con la calidad de la superficie. Los estudios han demostrado que las varillas de molibdeno TZM con un alto acabado superficial pueden formar una capa de óxido más uniforme, mejorando así la resistencia a la oxidación. Además, los recubrimientos antioxidantes, como los recubrimientos de siliciuro de molibdeno, pueden mejorar aún más la topografía de la superficie y prolongar la vida útil de los materiales en entornos oxidantes de alta temperatura.

La topografía de la superficie también afecta la resistencia al choque térmico de las varillas de molibdeno TZM. La superficie lisa reduce las concentraciones de estrés térmico y mejora la resistencia al choque térmico. En el sector aeroespacial, la superficie de las varillas de molibdeno TZM a menudo necesita ser mecanizada con precisión para cumplir con los requisitos de los entornos de ciclo de alta temperatura.

Copyright and Legal Liability Statement

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

High Melting Point: Suitable for extreme high-temperature environments.

Excellent High-Temperature Strength: Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

Good Thermal Stability and Creep Resistance: Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

Superior Corrosion and Oxidation Resistance: Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

Excellent Machinability: Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

High-Temperature Furnace Components: Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

Aerospace Industry: Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

Nuclear Industry: Used in reactor support structures and control rod guide systems.

Electronics Industry: Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

Mold Manufacturing: Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Copyright and Legal Liability Statement

3.4 Vida útil y fiabilidad de la varilla de molibdeno TZM

La longevidad y confiabilidad de la varilla de molibdeno TZM son los indicadores clave para su aplicación en entornos de alta temperatura y alto estrés. El siguiente es un análisis detallado desde tres aspectos: factores que influyen en la vida, análisis del modo de falla y prueba de confiabilidad.

3.4.1 Factores que influyen en la vida útil de las varillas de molibdeno TZM

La vida útil de las varillas de molibdeno TZM se ve afectada por una variedad de factores, incluida la temperatura de funcionamiento, el nivel de tensión, la atmósfera ambiente, el proceso de producción y el tratamiento de la superficie, etc.:

Temperatura de funcionamiento: La temperatura es el principal factor que afecta la vida útil de las varillas de molibdeno TZM. Por debajo de 1600 °C, la varilla de molibdeno TZM puede mantener la estabilidad a largo plazo; Sin embargo, por encima de 1800 °C, las tasas de oxidación y fluencia aumentan significativamente, acortando la vida útil.

Nivel de estrés: Las tensiones altas pueden acelerar el fluencia y el fallo por fatiga. Por ejemplo, a una tensión de 1400 °C y 50 MPa, la vida útil de una varilla de molibdeno TZM es aproximadamente 1/3 de la del molibdeno puro.

Atmósfera ambiente: en vacío o gas inerte, la vida útil de la varilla de molibdeno TZM puede alcanzar miles de horas; En un entorno oxidante, se requiere un recubrimiento antioxidante para prolongar la vida útil.

Proceso de producción: La temperatura de sinterización, la presión y el proceso de tratamiento térmico en el proceso de pulvimetalurgia afectan directamente el tamaño de grano y la distribución del carburo, lo que a su vez afecta la vida útil. Optimizar el proceso puede aumentar la vida útil en un 20-30%.

Tratamiento de superficies: El recubrimiento antioxidante y el pulido de superficies pueden reducir la oxidación y el inicio de grietas y prolongar la vida útil. Por ejemplo, un recubrimiento de siliciuro y molibdeno puede prolongar la vida útil de las varillas de molibdeno TZM en un entorno oxidante a 1200 °C por un factor de 2-3.

3.4.2 Análisis del modo de fallo de las varillas de molibdeno TZM (por ejemplo, fractura, corrosión)

Los modos de falla de la varilla de molibdeno TZM incluyen principalmente fractura, corrosión y falla por fluencia:

Fractura: La fractura suele estar causada por fatiga o estrés térmico. En los ciclos de alta temperatura, los defectos de la superficie pueden desencadenar la propagación de grietas, lo que provoca fracturas frágiles o dúctiles. Los resultados muestran que la tenacidad a la fractura de la varilla de molibdeno TZM ($15-20 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^{1/2}$) es mayor que la del molibdeno puro, pero la calidad de la superficie aún debe optimizarse para reducir el riesgo de fractura.

Corrosión: En un entorno oxidante a alta temperatura, las varillas de molibdeno TZM pueden fallar debido al desconchado de la capa de óxido. La formación de MoO_3 volátil acelera la pérdida de material. El recubrimiento antioxidante puede ralentizar eficazmente la corrosión.

Copyright and Legal Liability Statement

Falla por fluencia: La tensión a alta temperatura a largo plazo puede provocar una falla por fluencia, que se manifiesta por una deformación lenta del material y pérdida de resistencia. La acción de fijación de las partículas de carburo reduce significativamente la tasa de fluencia, pero la alta tensión aún puede provocar fallas.

El análisis del modo de falla muestra que la optimización de la calidad de la superficie y la tecnología de recubrimiento es la clave para mejorar la vida útil de las varillas de molibdeno TZM. Por ejemplo, los recubrimientos de alúmina depositados por CVD pueden reducir significativamente la corrosión oxidativa.

3.4.3 Ensayo de fiabilidad de varillas de molibdeno TZM

La prueba de confiabilidad de la varilla de molibdeno TZM generalmente incluye una prueba de resistencia a alta temperatura, una prueba de fluencia, una prueba de choque térmico y una prueba de fatiga:

Prueba de resistencia a alta temperatura: la resistencia a la tracción y el límite elástico se prueban a 1200-1600 °C mediante una máquina de prueba de tracción para garantizar que el material cumpla con los requisitos de diseño.

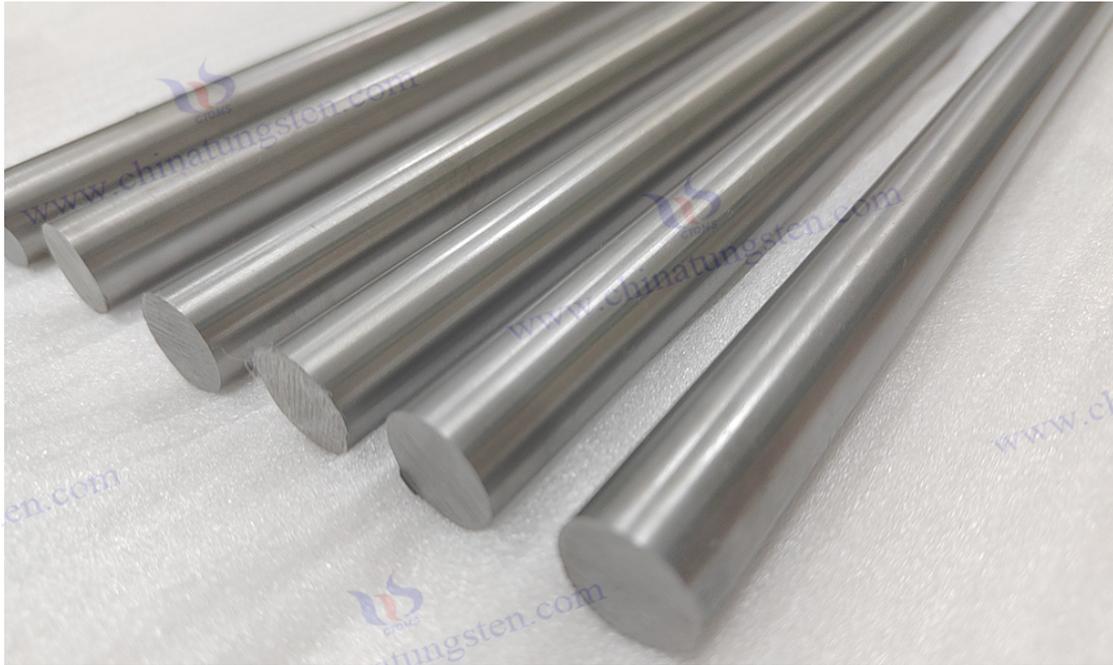
Prueba de fluencia: Pruebe la tasa de fluencia a 1400 °C y una tensión de 20-50 Mpa para evaluar la estabilidad a largo plazo. Los resultados de las pruebas muestran que la vida útil de fluencia de las varillas de molibdeno TZM supera con creces la del molibdeno puro.

Prueba de choque térmico: La resistencia al choque térmico se prueba mediante ciclos rápidos de calentamiento y enfriamiento (1000 °C a temperatura ambiente). Las varillas de molibdeno TZM generalmente pueden soportar cientos de ciclos sin agrietarse.

Prueba de fatiga: Pruebe la vida útil a la fatiga bajo una tensión cíclica de 1200 °C y ± 200 Mpa para evaluar la capacidad cíclica.

Los resultados de las pruebas de confiabilidad muestran que la varilla de molibdeno TZM tiene una excelente confiabilidad en entornos de alta temperatura y alta tensión, y es adecuada para su uso en la industria aeroespacial, nuclear y fabricación de semiconductores. A través de un estricto control de calidad y pruebas, la confiabilidad de la varilla de molibdeno TZM puede alcanzar más del 99.9%.

Copyright and Legal Liability Statement



CTIA GROUP LTD TZM Varilla de molibdeno

4. Proceso de preparación y tecnología de la varilla de molibdeno TZM

4.1 Selección y preparación de materias primas para varillas de molibdeno TZM

Como material de aleación de alto rendimiento, el rendimiento de la varilla de molibdeno TZM depende en gran medida de la calidad y la proporción de las materias primas. La selección y preparación de las materias primas es la base para la preparación de las varillas de molibdeno TZM, lo que afecta directamente a la microestructura y las propiedades del producto final. El siguiente es un análisis detallado de cuatro aspectos: purificación de polvo de molibdeno, selección de aditivos de titanio, circonio y carbono, optimización de la relación de aleación, pruebas de materias primas y control de calidad.

4.1.1 Requisitos de purificación y calidad del polvo de molibdeno

El polvo de molibdeno es la principal materia prima de la varilla de molibdeno TZM, y su pureza y calidad son cruciales para las propiedades de la aleación. El polvo de molibdeno generalmente se prepara reduciendo el paratungstato de amonio. El proceso de purificación consta principalmente de los siguientes pasos:

Purificación de minerales: El polvo de molibdeno generalmente se extrae de concentrados de molibdeno como el molibdeno. La molibdenita se somete a flotación y tostado para eliminar impurezas como el azufre y el silicio para obtener trióxido de molibdeno de alta pureza.

Reducción química: El trióxido de molibdeno se reduce a polvo de molibdeno en etapas bajo una atmósfera de hidrógeno. El proceso de reducción se divide en reducción a baja temperatura (400-600 °C, MoO₂) y reducción a alta temperatura (800-1000 °C, polvo metálico de molibdeno). El estudio muestra que el proceso de reducción moderno adopta un horno de reducción de múltiples etapas para garantizar que la pureza del polvo de molibdeno alcance más del 99,95%.

Copyright and Legal Liability Statement

Control del tamaño de partícula: El tamaño de partícula del polvo de molibdeno generalmente se controla a 1-5 micras, un tamaño de partícula demasiado grande conducirá a una sinterización desigual y un tamaño de partícula demasiado pequeño aumentará los costos de producción. El tamaño de partícula fino y uniforme ayuda a mejorar la densidad y las propiedades mecánicas de las varillas de molibdeno TZM.

Los requisitos de calidad para el polvo de molibdeno incluyen alta pureza ($\geq 99,95\%$), bajo contenido de oxígeno ($\leq 0,005\%$), bajo contenido de impurezas (por ejemplo, hierro, silicio, aluminio, etc. $\leq 0,01\%$) y distribución uniforme del tamaño de partícula. Estos requisitos garantizan la estabilidad y la resistencia a la corrosión de las varillas de molibdeno TZM a altas temperaturas.

4.1.2 Selección de aditivos de titanio, circonio y carbono

Los elementos de aleación de las varillas de molibdeno TZM incluyen titanio (Ti, 0,4-0,55%), circonio (Zr, 0,06-0,12%) y carbono (C, 0,01-0,04%), y la selección de estos aditivos es fundamental para las propiedades de la aleación:

Titanio (Ti): El titanio generalmente se agrega en forma de polvos de titanio de alta pureza ($\geq 99,9\%$ de pureza) o compuestos de titanio (por ejemplo, TiH_2). El tamaño de partícula del polvo de titanio se controla entre 1 y 10 micras para garantizar una mezcla uniforme con el polvo de molibdeno. La adición de titanio mejora la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la fluencia de la aleación a través del fortalecimiento de la solución y el fortalecimiento de la precipitación (generando partículas de TiC).

Zirconio (Zr): El zirconio se añade en forma de polvo de circonio de alta pureza (pureza $\geq 99,9\%$) o compuesto de circonio (por ejemplo, ZrH_2), normalmente con un tamaño de partícula de 1-5 micras. El circonio mejora la resistencia a la oxidación y la temperatura de recristalización de la aleación a través del fortalecimiento de la solución y la formación de partículas de ZrC.

Carbono (C): El carbono generalmente se agrega en forma de polvo de grafito o negro de humo, la pureza debe alcanzar más del 99.99% y el tamaño de partícula se controla en 0.5-2 micras. El carbono reacciona con el titanio y el circonio para formar partículas de carburo (TiC y ZrC), que se fortalecen por precipitación para mejorar la dureza y la resistencia a la fluencia de la aleación.

Los estudios han demostrado que los aditivos se seleccionan en función de su actividad química, la distribución del tamaño de partícula y la compatibilidad con el polvo de molibdeno. Por ejemplo, los hidruros de titanio y circonio se descomponen durante el proceso de sinterización para liberar hidrógeno, lo que ayuda a reducir el contenido de oxígeno y mejorar la pureza de la aleación.

4.1.3 Optimización de la relación de aleación

La relación de aleación de la varilla de molibdeno TZM (Mo: 99.38-99.5%, Ti: 0.4-0.55%, Zr: 0.06-0.12%, C: 0.01-0.04%) debe optimizarse a través de experimentos y simulaciones para equilibrar la resistencia, la tenacidad y la resistencia a la oxidación. Los puntos clave de la optimización de ratios incluyen:

Proporción de titanio y circonio: La proporción de titanio y circonio suele ser de 5:1 a 8:1 para

Copyright and Legal Liability Statement

garantizar el efecto sinérgico del fortalecimiento de la solución. Un contenido de titanio demasiado alto puede conducir a una mayor fragilidad, y un contenido demasiado alto de circonio puede aumentar los costos.

Control del contenido de carbono: el contenido de carbono debe controlarse con precisión a 0.01-0.04%, demasiado bajo conducirá a partículas de carburo insuficientes y reducirá el efecto de fortalecimiento; Un nivel demasiado alto puede dar lugar a la formación de demasiado carburo y a una menor tenacidad.

Homogeneidad: La distribución uniforme de titanio, circonio y carbono en polvo de molibdeno está garantizada por la mezcla mecánica o el proceso de molienda de bolas para evitar que la segregación local afecte el rendimiento.

Los resultados muestran que la relación óptima puede aumentar la resistencia a la tracción de la varilla de molibdeno TZM en un 10-15% y reducir la tasa de fluencia en un 20-30%.

4.1.4 Ensayos y control de calidad de las materias primas

El control de calidad de las materias primas es una parte clave para garantizar la consistencia del rendimiento de las varillas de molibdeno TZM. Los ensayos incluyen:

Análisis de composición química: Se utilizó espectroscopia de emisión de plasma acoplada inductivamente (ICP-OES) o espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) para detectar el contenido de molibdeno, titanio, circonio y carbono para garantizar que se cumplieran los requisitos de relación.

Análisis de tamaño de partícula: La distribución del tamaño de partícula del polvo es medida por el analizador láser de tamaño de partícula para garantizar la uniformidad del tamaño de partícula.

Detección de impurezas: La espectrometría de masas de descarga incandescente (GDMS) se utiliza para detectar el contenido de impurezas como oxígeno, nitrógeno y hierro para garantizar que esté por debajo del límite estándar.

Análisis de microestructura: La microscopía electrónica de barrido (SEM) y la difracción de rayos X (XRD) se utilizan para analizar la topografía y la estructura cristalina de los polvos para garantizar que estén libres de defectos y segregación.

La investigación muestra que el principal productor mundial de varillas de molibdeno TZM utiliza un sistema de gestión de calidad ISO 9001 para garantizar la calidad de las materias primas a través de pruebas multinivel. El control de calidad también incluye auditorías de proveedores, seguimiento de lotes y seguimiento del proceso de producción para garantizar la coherencia y la trazabilidad de las materias primas.

4.2 Proceso metalúrgico de varillas de molibdeno TZM

El proceso metalúrgico de las varillas de molibdeno TZM incluye pasos como la mezcla y el prensado de polvo, la sinterización, la forja y el laminado, y la extrusión y el estirado. Estos procesos determinan directamente la microestructura y las propiedades de las varillas de molibdeno TZM. A continuación se presenta un análisis de los detalles y puntos técnicos de cada subproceso.

Copyright and Legal Liability Statement

4.2.1 Mezcla y prensado de polvo

4.2.1.1 Tecnología de aleación mecánica

La aleación mecánica es un paso clave en la preparación de varillas de molibdeno TZM, donde el polvo de molibdeno, el polvo de titanio, el polvo de circonio y el polvo de tóner se mezclan uniformemente mediante molienda de bolas de alta energía. Los principales parámetros de la aleación mecánica incluyen:

Equipo de molino de bolas: molino de bolas planetario o molino de bolas vibratorio, el medio de molienda suele ser bolas de polvo de carburo de tungsteno.

Proporción de pellets: normalmente de 10:1 a 20:1 para garantizar una mezcla y molienda eficientes.

Tiempo de molienda: 6-12 horas, demasiado largo puede introducir impurezas, demasiado corto no se mezclará uniformemente.

Control de atmósfera: se realiza bajo la protección de argón o nitrógeno para evitar la oxidación.

La aleación mecánica no solo logra una mezcla uniforme de polvos, sino que también mejora el efecto de solución sólida de titanio, circonio y molibdeno a través de cambios microestructurales inducidos por colisiones de alta energía. Los estudios han demostrado que la aleación mecánica puede aumentar la uniformidad de la mezcla de los polvos a más del 99%, mejorando significativamente la calidad de la sinterización posterior.

4.2.1.2 Proceso de prensado isostático

El moldeo por prensa isostática (CIP) es un proceso clave para prensar polvos mezclados en espacios en blanco. La formación por presión isostática garantiza una densidad uniforme de la pieza en bruto mediante la aplicación de una presión uniforme a un medio líquido, como agua o aceite. Los parámetros principales incluyen:

Presión: 150-300 MPa, demasiado alta puede causar grietas en la palanquilla, demasiado baja causará una densidad insuficiente.

Material del molde: molde de caucho o poliuretano de alta resistencia, resistencia a la presión y buena flexibilidad.

Densidad de palanquilla: 60-70% de la densidad teórica, que proporciona la base para la posterior sinterización.

La ventaja del prensado isostático es la capacidad de preparar piezas en bruto con formas complejas, lo que reduce la cantidad de procesamiento posterior. Los estudios han demostrado que la combinación de prensado isostático en frío (CIP) y prensado isostático en caliente (HIP) puede aumentar aún más la densidad de la palanquilla a más del 90% de la densidad teórica.

4.2.2 Proceso de sinterización

4.2.2.1 Tecnología de sinterización al vacío

La sinterización al vacío es el proceso central en la preparación de varillas de molibdeno TZM, que solidifica la pieza en bruto en una aleación de alta densidad a través de la sinterización a alta

Copyright and Legal Liability Statement

temperatura. Los parámetros principales incluyen:

Temperatura: 1800-2000 °C, más baja que el punto de fusión del molibdeno (2623 °C), evite la sinterización en fase líquida.

Vacío: 10^{-3} - 10^{-5} Pa para reducir la contaminación por oxígeno y nitrógeno.

Tiempo de retención: 2-4 horas para garantizar la precipitación uniforme de las partículas de carburo.

La sinterización al vacío puede eliminar eficazmente los poros de la pieza en bruto y aumentar la densidad a más del 98% de la densidad teórica. El horno de sinterización al vacío líder en el mundo utiliza elementos calefactores de alambre de tungsteno para garantizar la uniformidad de la temperatura.

4.2.2.2 Sinterización atmosférica y control de temperatura

En algunos casos, las varillas de molibdeno TZM se sinterizan en una atmósfera (por ejemplo, atmósfera de hidrógeno o argón) para reducir costos. Los principales parámetros de la sinterización atmosférica incluyen:

Atmósfera: Hidrógeno de alta pureza (pureza $\geq 99.999\%$) o argón, evite la oxidación.

Control de temperatura: Se utilizan curvas de calentamiento de varias etapas (como presinterización de 1000 °C, sinterización principal de 1800 °C) para evitar grietas causadas por un aumento rápido de temperatura.

Velocidad de enfriamiento: controlada a 5-10 °C/min para evitar grietas causadas por el estrés térmico.

La ventaja de la sinterización atmosférica es que el costo es menor, pero la pureza de la atmósfera debe controlarse estrictamente para evitar la contaminación por impurezas. Los estudios han demostrado que la densidad de las varillas de molibdeno TZM sinterizadas en atmósfera puede alcanzar el 95-97% de la densidad teórica.

4.2.3 Forja y laminación

4.2.3.1 Procesos de forja en caliente y forja en frío

La forja es un paso importante en la preparación de varillas de molibdeno TZM para mejorar la densidad y las propiedades mecánicas de la pieza en bruto. Los procesos de forja en caliente y forja en frío son los siguientes:

Forja en caliente: Se realiza a 1200-1600 °C, utilizando la ductilidad del molibdeno para mejorar la estructura del grano. La presión de forja en caliente suele ser de 50-100 MPa y la deformación se controla al 30-50%.

Forja en frío: Se realiza a temperatura ambiente para el acabado y la mejora de la calidad de la superficie. La forja en frío requiere presiones más altas (100-200 MPa), pero puede aumentar significativamente la resistencia.

Copyright and Legal Liability Statement

La forja en caliente elimina los microporos en la pieza en bruto sinterizada y aumenta la densidad a más del 99% de la densidad teórica. La forja en frío optimiza aún más la orientación del grano y mejora la resistencia de la anisotropía.

4.2.3.2 Equipo de laminación y parámetros de proceso

El laminado es un proceso clave para procesar piezas en bruto forjadas en barras. El equipo de laminación incluye trenes de laminación de cuatro alturas y trenes de laminación de varias alturas, y los parámetros principales incluyen:

Temperatura de laminación: 1000-1400 °C para garantizar la ductilidad del material.

Deformación: La deformación de un solo laminado se controla al 10-20% para evitar grietas.

Velocidad de laminación: 0,5-2 m/s, equilibrando eficiencia y calidad.

El proceso de laminación puede mejorar significativamente la calidad de la superficie y la precisión dimensional de las varillas de molibdeno TZM. El estudio muestra que los equipos de laminación modernos adoptan un sistema de servocontrol para garantizar un control preciso de los parámetros de laminación.

4.2.4 Extrusión y embutición

4.2.4.1 Tecnología de extrusión a alta temperatura

La extrusión a alta temperatura es el proceso de procesamiento de piezas en bruto laminadas en barras alargadas, generalmente a 1200-1600 °C. Los parámetros principales incluyen:

Relación de extrusión: 5:1 a 10:1 para garantizar una deformación uniforme.

Material del molde: carburo de tungsteno o aleación de alta temperatura, resistente al desgaste y a altas temperaturas.

Lubricante: Disulfuro de grafito o [molibdeno](#) para reducir la fricción y el desgaste de la matriz.

La extrusión a alta temperatura puede mejorar significativamente la densidad y las propiedades mecánicas de la barra de molibdeno TZM, que es adecuada para la preparación de barras de alta precisión.

4.2.4.2 Troqueles de trefilado y lubricantes

El trefilado es el proceso de acabado de varillas de molibdeno TZM para obtener superficies lisas y de alta precisión. Los parámetros principales incluyen:

Material del molde: carburo de tungsteno o molde de diamante, alta dureza, resistencia al desgaste.

Velocidad de trefilado: 0,1-0,5 m/s para evitar arañazos en la superficie.

Lubricantes: lubricación seca (por ejemplo, polvo de grafito) o lubricación húmeda (por ejemplo, lubricantes a base de aceite).

El proceso de trefilado puede mejorar la rugosidad de la superficie de la varilla de molibdeno TZM

Copyright and Legal Liability Statement

y mejorar la resistencia a la fatiga.

4.3 Procesamiento y acabado de varillas de molibdeno TZM

Los procesos de mecanizado y acabado de las varillas de molibdeno TZM incluyen torneado y fresado, esmerilado y pulido, tratamiento térmico y recocido, y tratamiento de superficies. Estos procesos garantizan la precisión dimensional, la calidad de la superficie y la estabilidad del rendimiento de las varillas de molibdeno TZM.

4.3.1 Torneado y fresado

4.3.1.1 Tecnología de mecanizado CNC

El mecanizado de control numérico (CNC) es el método principal de acabado de varillas de molibdeno TZM para la fabricación de componentes de formas complejas. Los parámetros principales incluyen:

Material de la herramienta: carburo de tungsteno o diamante policristalino (PCD), alta dureza y resistencia al desgaste.

Velocidad de corte: 50-100 m/min, evite el sobrecalentamiento.

Avance: 0,05-0,2 mm/rev, equilibrando la eficiencia y la calidad de la superficie.

El mecanizado CNC permite que la precisión dimensional de las varillas de molibdeno TZM alcance los $\pm 0,05$ mm, lo que cumple con los requisitos de los equipos aeroespaciales y de semiconductores. Los estudios han demostrado que los centros de mecanizado CNC modernos son capaces de mecanizar geometrías complejas utilizando la tecnología de enlace de cinco ejes.

4.3.1.2 Precisión de mecanizado y rugosidad de la superficie

La precisión del mecanizado y la rugosidad de la superficie de la varilla de molibdeno TZM tienen un impacto importante en su rendimiento. El aumento de la rugosidad de la superficie (Ra) reducirá las concentraciones de tensión y el inicio de grietas. El control de la precisión del mecanizado se basa en máquinas herramienta de alta precisión y en una estricta optimización de los parámetros del proceso. Por ejemplo, el uso de corte y refrigerante a baja velocidad puede reducir la zona afectada por el calor y mejorar la calidad de la superficie.

4.3.2 Esmerilado y pulido

4.3.2.1 Tecnología de pulido mecánico

El pulido mecánico elimina pequeños defectos en la superficie de las varillas de molibdeno TZM a través de una muela abrasiva o un paño de pulido para mejorar el acabado de la superficie. Los parámetros principales incluyen:

Abrasivo: diamante o alúmina, tamaño de partícula 0,5-5 micras.

Velocidad de pulido: 1000-3000 rpm, control del calor por fricción.

Medio de pulido: lechada de pulido a base de agua o aceite.

El pulido mecánico mejora la rugosidad de la superficie y mejora significativamente la resistencia

Copyright and Legal Liability Statement

a la fatiga.

4.3.2.2 Pulido químico y electropulido

El pulido químico y el electropulido se utilizan para mejorar aún más la calidad de la superficie de las varillas de molibdeno TZM:

Pulido químico: Corrosión de microdefectos superficiales con soluciones ácidas (como una mezcla de ácido nítrico y ácido sulfúrico) con una rugosidad superficial de hasta 0,02 micras.

Electropulido: Eliminación de material superficial por disolución anódica en un electrolito, adecuado para piezas de alta precisión. El voltaje de electropulido suele ser de 10-20 V y la densidad de corriente es de 0,5-2 A/cm².

El pulido químico y el electropulido pueden mejorar significativamente la resistencia a la corrosión y el acabado superficial de las varillas de molibdeno TZM.

4.3.3 Tratamiento térmico y recocido

4.3.3.1 Temperatura de recocido y control del grano

El recocido es un proceso clave para aliviar el estrés del procesamiento y optimizar la estructura del grano. El recocido de las varillas de molibdeno TZM generalmente se lleva a cabo en vacío o atmósfera inerte a una temperatura de 1000-1400 °C. Los parámetros principales incluyen:

Temperatura de recocido: 1200 °C para aliviar la mayor parte de la tensión, 1400 °C para ajustar el tamaño del grano.

Tiempo de retención: 1-2 horas para asegurar la homogeneización del grano.

Velocidad de enfriamiento: 5-10 °C/min para evitar el estrés térmico.

El recocido puede controlar el tamaño de grano de las varillas de molibdeno TZM a 10-30 micras, mejorando la tenacidad y la resistencia a la fluencia.

4.3.3.2 Técnicas de alivio del estrés

Las técnicas de alivio de tensiones incluyen recocido a baja temperatura (800-1000 °C) y alivio de tensiones por vibración. El recocido a baja temperatura es adecuado para componentes mecanizados, mientras que el alivio de tensiones por vibración alivia las tensiones residuales a través de la vibración mecánica. Estas tecnologías pueden mejorar la vida a fatiga y la estabilidad dimensional de las varillas de molibdeno TZM.

4.3.4 Tratamiento superficial

4.3.4.1 Tecnología de recubrimiento antioxidante

El recubrimiento antioxidante es una tecnología clave para prolongar la vida útil de las varillas de molibdeno TZM en entornos oxidantes de alta temperatura. Los recubrimientos comúnmente utilizados incluyen:

Recubrimiento de siliciuro de molibdeno (MoSi₂): La deposición por deposición química de

Copyright and Legal Liability Statement

vapor (CVD) o deposición por pulverización de plasma protege el material a 1500 °C.

Recubrimiento de alúmina (Al_2O_3): Resistente a la oxidación a alta temperatura y a la corrosión por deposición física de vapor (PVD).

El recubrimiento antioxidante puede prolongar la vida útil de las varillas de molibdeno TZM en un entorno oxidante a 1200 °C 2-3 veces.

4.3.4.2 Carburación y nitruración superficiales

La cementación y nitruración de la superficie mejoran la dureza de la superficie y la resistencia al desgaste mediante la introducción de átomos de carbono o nitrógeno en la superficie de las varillas de molibdeno TZM:

Carbonización: Se realiza en una atmósfera de carbono de 1000-1200 °C para generar una capa de carburo con una dureza de hasta 500 HV.

Nitruración: Se lleva a cabo en una atmósfera de nitrógeno de 800-1000 °C para generar una capa de nitruro y mejorar la resistencia a la corrosión.

Los procesos de carburación y nitruración pueden mejorar significativamente la resistencia al desgaste y la resistencia a la fatiga de las varillas de molibdeno TZM.

4.4 Equipo de producción y automatización de varillas de molibdeno TZM

El equipo de producción y la tecnología de automatización de la varilla de molibdeno TZM son cruciales para la eficiencia de la producción y la calidad del producto. Se analiza desde tres aspectos: equipos clave de producción, automatización e inteligencia de la línea de producción, sala limpia y control ambiental.

4.4.1 Equipos clave de producción

4.4.1.1 Hornos de sinterización al vacío

El horno de sinterización al vacío es el equipo principal en la producción de varillas de molibdeno TZM, que se utiliza para sinterizar piezas en bruto de polvo en aleaciones de alta densidad. Las características clave incluyen:

Elemento calefactor: _calentador de tungsteno, resistencia a altas temperaturas y conducción de calor uniforme.

Vacío: 10^{-3} - 10^{-5} Pa para reducir la contaminación oxidativa.

Control de temperatura: la precisión ± 5 °C para garantizar la uniformidad de la sinterización.

El horno de sinterización al vacío líder en el mundo adopta un sistema de control PLC, que puede lograr un calentamiento de múltiples etapas y un control de temperatura preciso.

4.4.1.2 Equipos de forja y laminación

El equipo de forja y laminación incluye una máquina de forja hidráulica y un tren de laminación de cuatro alturas, y las características principales incluyen:

Copyright and Legal Liability Statement

Máquina de forja: presión 500-2000 toneladas, adecuada para forja en caliente y forja en frío.

Tren de laminación: sistema de servocontrol, velocidad de laminación 0,5-2 m/s, precisión $\pm 0,05$ mm.

Estas máquinas son capaces de mecanizar varillas de molibdeno TZM de alta densidad y alta precisión.

4.4.1.3 Centros de mecanizado CNC

El centro de mecanizado CNC se utiliza para el acabado de varillas de molibdeno TZM y está equipado con un sistema de enlace de cinco ejes y herramientas de carburo de tungsteno, que pueden realizar el mecanizado de formas complejas. La precisión de mecanizado puede alcanzar $\pm 0,01$ mm y la rugosidad de la superficie $Ra < 1,6$ micras.

4.4.2 Automatización e inteligencia de las líneas de producción

La automatización y la inteligencia de la línea de producción de varillas de molibdeno TZM mejoran significativamente la eficiencia de la producción y la consistencia de la calidad. Las tecnologías clave incluyen:

Control automático: Los sistemas PLC y SCADA se utilizan para monitorear los parámetros de sinterización, forja y procesamiento en tiempo real.

Inspección inteligente: Monitoreo en tiempo real de piezas en bruto y productos terminados para detectar defectos a través de la inspección por rayos X en línea y la inspección ultrasónica.

Análisis de datos: Aproveche el big data y la inteligencia artificial para optimizar los parámetros del proceso y mejorar la consistencia del producto.

Los estudios han demostrado que las líneas de producción inteligentes pueden aumentar la eficiencia de la producción en un 30% y reducir la tasa de defectos a menos del 1%.

4.4.3 Sala limpia y control ambiental en la producción

La producción de varillas de molibdeno TZM es exigente con el medio ambiente y debe llevarse a cabo en una sala limpia para evitar la contaminación por polvo e impurezas. Las medidas clave incluyen:

Limpieza: sala limpia ISO Clase 7, concentración de partículas < 10.000 partículas/m³.

Control ambiental: temperatura 20-25 °C, humedad 40-60%, evite la absorción de humedad en polvo.

Protección de la atmósfera: La mezcla y sinterización de polvo se lleva a cabo bajo la protección de argón o hidrógeno con un contenido de oxígeno de < 10 ppm.

Los controles ambientales y de sala limpia garantizan una alta pureza y estabilidad del rendimiento de las varillas de molibdeno TZM, lo que las hace especialmente adecuadas para aplicaciones aeroespaciales y de semiconductores.

Copyright and Legal Liability Statement



CTIA GROUP LTD TZM Varilla de molibdeno

5. Control de calidad y pruebas de la varilla de molibdeno TZM

Como material de aleación de alto rendimiento, el control de calidad y la inspección de la varilla de molibdeno TZM es la clave para garantizar su funcionamiento estable en entornos corrosivos, de alta temperatura y de alta tensión. El control de calidad abarca todo el proceso de producción, desde la selección de la materia prima hasta la inspección del producto terminado, e involucra múltiples aspectos, como la tecnología de pruebas en línea, las pruebas de rendimiento y el análisis de fallas. El siguiente es un análisis detallado de la tecnología de prueba y control de calidad de la varilla de molibdeno TZM de tres subcapítulos: tecnología de prueba en línea, pruebas de rendimiento y análisis y mejora de fallas.

5.1 Tecnología de detección en línea de varillas de molibdeno TZM

La tecnología de inspección en línea es una parte importante del proceso de producción de varillas de molibdeno TZM, que se utiliza para monitorear la calidad del producto en tiempo real y garantizar la precisión dimensional, la calidad de la superficie y la integridad de la estructura interna. El siguiente es un análisis detallado desde dos aspectos: inspección de precisión dimensional y geométrica, y detección de defectos y grietas en la superficie.

5.1.1 Ensayos de precisión dimensional y geométrica

El tamaño y la precisión geométrica de la varilla de molibdeno TZM afectan directamente su efecto de aplicación en la industria aeroespacial, nuclear y de semiconductores. Las pruebas de precisión dimensional y geométrica incluyen principalmente las siguientes tecnologías:

Rango láser y medición de tres coordenadas: el telémetro láser puede lograr una medición de alta precisión sin contacto con una precisión de $\pm 0,01$ mm, que es adecuada para detectar el diámetro,

Copyright and Legal Liability Statement

la longitud y la redondez de las varillas de molibdeno TZM. Las máquinas de medición por coordenadas (MMC) miden la geometría de las barras con una sonda táctil y son capaces de detectar desviaciones dimensionales en formas complejas. Por ejemplo, en la industria aeroespacial, las varillas de molibdeno TZM deben tener tolerancias de diámetro dentro de $\pm 0,02$ mm, y las MMC pueden cumplir con este requisito.

Perfilador óptico: El perfilador óptico mide el perfil de la superficie y la geometría de las varillas de molibdeno TZM mediante interferometría de luz blanca, que es adecuada para detectar la cilindridad y la rectitud de las barras. Con una resolución de hasta 0,1 micras, es adecuado para aplicaciones de alta precisión.

Sistema de inspección visual en línea: La línea de producción moderna adopta la cámara CCD y la tecnología de procesamiento de imágenes para monitorear el tamaño y la geometría de la varilla de molibdeno TZM en tiempo real. El sistema utiliza algoritmos de aprendizaje automático para identificar desviaciones dimensionales, y la velocidad de detección puede alcanzar las 10 piezas por segundo, lo que mejora significativamente la eficiencia de la producción.

Los estudios han demostrado que las inspecciones de precisión dimensional y geométrica a menudo se combinan con la norma ISO 1101 para garantizar que las varillas de molibdeno TZM cumplan con los estrictos requisitos de los equipos aeroespaciales (por ejemplo, boquillas de cohetes) y semiconductores (por ejemplo, objetivos de pulverización catódica). La temperatura ambiente (20-25 °C) y la humedad (40-60%) deben controlarse durante el proceso de inspección para evitar errores de medición causados por la expansión térmica o la humedad.

5.1.2 Detección de defectos superficiales y grietas

Los defectos superficiales (por ejemplo, arañazos, grietas, porosidad) y las grietas internas pueden reducir significativamente las propiedades mecánicas y la vida útil de las varillas de molibdeno TZM. La detección de defectos superficiales y grietas utiliza las siguientes técnicas:

Pruebas ultrasónicas (UT): Las pruebas ultrasónicas detectan grietas, poros e inclusiones dentro de las varillas de molibdeno TZM a través de ondas acústicas de alta frecuencia. La frecuencia de inspección suele ser de 5-10 MHz, el diámetro de la sonda es de 5-10 mm y es capaz de detectar defectos superiores a 0,1 mm. Las pruebas ultrasónicas son adecuadas para evaluar la integridad de la estructura interna de las barras, especialmente en la industria nuclear.

Prueba de corrientes de Foucault (ET): La prueba de corrientes de Foucault detecta grietas microscópicas y cambios de conductividad en la superficie de las varillas de molibdeno TZM por inducción electromagnética. La sensibilidad de detección puede alcanzar los 0,05 mm, lo que es adecuado para la detección en línea. La ventaja de las pruebas de corrientes de Foucault es que son rápidas (hasta 1 m/s) y son adecuadas para la producción de grandes volúmenes.

Inspección por rayos X (RT): La inspección por rayos X se utiliza para detectar defectos profundos, como porosidad e inclusiones dentro de las varillas de molibdeno TZM. Los modernos sistemas de imágenes digitales de rayos X proporcionan imágenes de alta resolución (resolución $< 0,1$ mm) para la inspección de componentes altamente fiables.

Inspección visual de la superficie: La cámara CCD de alta resolución combinada con algoritmos de inteligencia artificial puede detectar arañazos, picaduras y capas de óxido en la

Copyright and Legal Liability Statement

superficie de las varillas de molibdeno TZM con una precisión de hasta 0,01 mm. Los estudios han demostrado que el sistema de inspección visual puede reducir la tasa de defectos a menos del 0,5% en la producción de varillas de molibdeno TZM.

Estas técnicas de inspección se utilizan a menudo en combinación para lograr una inspección exhaustiva de los defectos superficiales e interiores. Por ejemplo, la inspección ultrasónica y de rayos X se utiliza para defectos internos, y la inspección visual y de corrientes de Foucault se utiliza para defectos superficiales. Los resultados de las pruebas están sujetos a normas internacionales como ASTM E1444 (pruebas de corrientes de Foucault) y ASTM E1742 (pruebas de rayos X).

5.2 Prueba de rendimiento de varillas de molibdeno TZM

Las pruebas de rendimiento son un paso crítico para evaluar el rendimiento de las varillas de molibdeno TZM en entornos corrosivos, de alta tensión y de alta temperatura. El siguiente es un análisis detallado de tres aspectos: prueba de resistencia y dureza a alta temperatura, prueba de resistencia a la corrosión y resistencia a la oxidación, y prueba de expansión térmica y conductividad térmica.

5.2.1 Ensayo de resistencia y dureza a alta temperatura

La resistencia y dureza a alta temperatura de la varilla de molibdeno TZM son sus principales indicadores de rendimiento en las industrias aeroespacial y nuclear. Los métodos de prueba incluyen:

Ensayos de tracción a alta temperatura: Se realizan en vacío o atmósfera inerte de 1200-1600 °C, utilizando una máquina de ensayos de tracción a alta temperatura (como la serie 5980 de Instron). Los resultados de la prueba muestran que la resistencia a la tracción de la varilla de molibdeno TZM a 1200 °C es de 400-500 MPa, que es mucho mayor que la del molibdeno puro a 200-300 MPa. Se requiere que la prueba cumpla con la norma ASTM E21 para garantizar una precisión de control de temperatura ± 5 °C.

Ensayo de compresión a alta temperatura: se utiliza para evaluar la resistencia a la compresión de las varillas de molibdeno TZM a altas temperaturas, generalmente realizadas a 1400 °C y 50 MPa. Los resultados de la prueba muestran que el límite elástico de la varilla de molibdeno TZM es de aproximadamente 300-400 MPa, lo que es adecuado para aplicaciones de moldes a alta temperatura.

Prueba de dureza: El probador de dureza Vickers (HV) o el probador de dureza Rockwell (HRC) se utiliza para probar la dureza de las varillas de molibdeno TZM. La dureza Vickers de la varilla de molibdeno TZM a temperatura ambiente es de 250-300 HV, que es más alta que la del molibdeno puro a 200 HV. La prueba de dureza a alta temperatura (1000 °C) mostró que la dureza de la varilla de molibdeno TZM disminuyó solo en un 10-15%, mostrando una excelente estabilidad a alta temperatura.

Prueba de microdureza: La dureza microscópica de la varilla de molibdeno TZM se mide mediante tecnología de nanoindentación para evaluar el efecto de fortalecimiento de las partículas de carburo (como TiC y ZrC). Los resultados de la prueba mostraron que la dureza del área de partículas de carburo era de hasta 500 HV.

Copyright and Legal Liability Statement

Los estudios han demostrado que las pruebas de resistencia y dureza a alta temperatura se combinan con análisis microestructurales (por ejemplo, SEM, XRD) para evaluar los efectos de refuerzo del titanio, el circonio y el carbono.

5.2.2 Ensayo de resistencia a la corrosión y a la oxidación

La resistencia a la corrosión y oxidación de las varillas de molibdeno TZM es la clave para su aplicación en entornos químicos de alta temperatura. Los métodos de prueba incluyen:

Prueba antioxidante: Realizada en una atmósfera de aire u oxígeno de 1000-1200 °C, se midió la tasa de ganancia de peso oxidativo y el espesor de la capa de óxido de la varilla de molibdeno TZM. Los resultados de la prueba muestran que la varilla de molibdeno TZM puede formar una capa protectora densa de MoO₂ por debajo de 1000 °C, y la tasa de ganancia de peso oxidativa es inferior a 0,1 mg/cm²·h, que es mucho mejor que la del molibdeno puro (1-2 mg/cm²·h). Los recubrimientos antioxidantes, como el siliciuro de molibdeno, pueden aumentar la temperatura de servicio hasta 1500 °C.

Prueba de resistencia a la corrosión: prueba de velocidad de corrosión en ácido sulfúrico diluido, ácido clorhídrico y solución alcalina. Los resultados de la prueba muestran que la tasa de corrosión de la varilla de molibdeno TZM en una solución de ácido sulfúrico al 5% es de aproximadamente 0,01 mm / año, que es mucho más baja que la del acero inoxidable 0,1 mm / año.

Prueba electroquímica: El potencial de corrosión y la densidad de la corriente de corrosión de la varilla de molibdeno TZM se miden mediante el método de escaneo potenciodinámico para evaluar su estabilidad en un entorno corrosivo. Los resultados de la prueba muestran que el potencial de corrosión de la varilla de molibdeno TZM es mayor que el del molibdeno puro y muestra una mejor resistencia a la corrosión.

Los estudios han demostrado que las pruebas de resistencia a la oxidación y la corrosión deben combinarse con entornos de aplicación del mundo real, como refrigerantes de reactores nucleares o atmósferas de fabricación de semiconductores, para garantizar la fiabilidad de los resultados de las pruebas.

5.2.3 Ensayo de dilatación térmica y conductividad térmica

La expansión térmica y la conductividad térmica son los parámetros clave de rendimiento de las varillas de molibdeno TZM en aplicaciones de alta temperatura. Los métodos de prueba incluyen:

Prueba de expansión térmica: El coeficiente de expansión térmica de las varillas de molibdeno TZM se mide a temperatura ambiente a 1600 °C utilizando un dilatómetro (por ejemplo, NETZSCH DIL 402). Los resultados de la prueba muestran que el coeficiente de expansión térmica de la varilla de molibdeno TZM es de $5,3 \times 10^{-6}$ / K, que es menor que el de las aleaciones a base de níquel de 13×10^{-6} / K, lo que muestra una excelente estabilidad dimensional.

Prueba de conductividad térmica: La conductividad térmica de las varillas de molibdeno TZM se mide mediante el método de flash láser (LFA). Los resultados de la prueba muestran que la conductividad térmica de la varilla de molibdeno TZM es de 139 W / m·K, que solo disminuye en un 10-15% a 1200 °C, lo que es adecuado para aplicaciones de disipación de calor a alta temperatura.

Copyright and Legal Liability Statement

Prueba de difusividad térmica: La difusividad térmica de la varilla de molibdeno TZM se calcula combinando datos de densidad y calor específico mediante el método de flash láser, y se evalúa su eficiencia de conducción de calor. Los resultados de la prueba muestran que la difusividad térmica de la varilla de molibdeno TZM permanece estable a altas temperaturas.

Estas pruebas deben cumplir con las normas ASTM E228 (expansión térmica) y ASTM E1461 (conductividad térmica) para garantizar la precisión y repetibilidad de los datos. La atmósfera (por ejemplo, argón o vacío) debe controlarse durante la prueba para evitar que la oxidación afecte los resultados de la medición.

5.3 Análisis de fallos y mejora de la varilla de molibdeno TZM

El análisis de fallas es un medio importante para mejorar la calidad y confiabilidad de las varillas de molibdeno TZM, y se proponen medidas de mejora específicas mediante el análisis de los modos de falla como grietas, fracturas, fatiga a alta temperatura y fluencia. El siguiente es un análisis detallado desde tres aspectos: análisis de grietas y fracturas, análisis de fatiga y fluencia a alta temperatura y medidas de mejora de la calidad.

5.3.1 Análisis de fisuras y fracturas

El agrietamiento y la fractura son los principales modos de falla de las varillas de molibdeno TZM en entornos de alta temperatura y alta tensión. Los métodos analíticos incluyen:

Análisis de fracturas: Observe la morfología de la fractura de la varilla de molibdeno TZM mediante microscopio electrónico de barrido (SEM) para determinar el tipo de fractura (fractura dúctil o fractura frágil). Los resultados muestran que la tenacidad a la fractura de la varilla de molibdeno TZM es de 15-20 MPa·m^{1/2}, que es mayor que la del molibdeno puro 10-12 MPa·m^{1/2}, pero la tensión cíclica a alta temperatura puede causar microfisuras.

Análisis de propagación de grietas: La difracción de retrodispersión de electrones (EBSD) se utiliza para analizar las trayectorias de propagación de grietas para evaluar el papel de los límites de grano y las partículas de carburo. Los resultados muestran que las partículas de carburo pueden dificultar eficazmente la propagación de grietas y mejorar la resistencia a las fracturas.

Análisis de concentración de tensión: La distribución de tensión de la varilla de molibdeno TZM a alta temperatura se simula mediante análisis de elementos finitos (FEA) para identificar la ubicación de inicio de la grieta. Los defectos superficiales (por ejemplo, arañazos, porosidad) son concentraciones de tensión importantes.

Los estudios han demostrado que las grietas y fracturas a menudo se asocian con la calidad de la superficie y los defectos microestructurales. Por ejemplo, los arañazos en la superficie durante el mecanizado pueden desencadenar grietas por fatiga, y los poros durante la sinterización pueden causar fracturas frágiles.

Copyright and Legal Liability Statement

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

High Melting Point: Suitable for extreme high-temperature environments.

Excellent High-Temperature Strength: Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

Good Thermal Stability and Creep Resistance: Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

Superior Corrosion and Oxidation Resistance: Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

Excellent Machinability: Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

High-Temperature Furnace Components: Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

Aerospace Industry: Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

Nuclear Industry: Used in reactor support structures and control rod guide systems.

Electronics Industry: Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

Mold Manufacturing: Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Copyright and Legal Liability Statement

5.3.2 Análisis de fatiga y fluencia a alta temperatura

La fatiga a alta temperatura y la fluencia son los principales modos de falla de la varilla de molibdeno TZM en un entorno de estrés a alta temperatura a largo plazo. Los métodos analíticos incluyen:

Ensayo de fatiga a alta temperatura: El ensayo de fatiga se realizó bajo una tensión cíclica de 1200 °C y ± 200 MPa para evaluar la vida a fatiga de la varilla de molibdeno TZM. Los resultados de la prueba muestran que la vida a fatiga de la varilla de molibdeno TZM es de 10^5 ciclos, que es mucho mayor que la de los ciclos de molibdeno puro 10^4 . Las grietas por fatiga generalmente surgen de defectos superficiales o límites de grano, y las partículas de carburo pueden ralentizar la propagación de las grietas.

Prueba de fluencia: La prueba de fluencia se realizó a 1400 °C y 20 MPa para medir la tasa de fluencia y la vida útil de la varilla de molibdeno TZM. Los resultados de la prueba muestran que la tasa de fluencia de la varilla de molibdeno TZM es aproximadamente 1/10 de la del molibdeno puro, y la vida útil puede alcanzar las 5000 horas. La falla por fluencia es causada principalmente por el deslizamiento del límite del grano y la escalada por dislocación, y el efecto de fijación de las partículas de carburo reduce significativamente la tasa de fluencia.

Análisis de microestructura: Se utilizó microscopía electrónica de transmisión (TEM) para observar la dislocación y los cambios en el límite de grano de las varillas de molibdeno TZM durante los procesos de fatiga y fluencia a alta temperatura. Los resultados muestran que el fortalecimiento de la solución de titanio y circonio y el fortalecimiento de las partículas de carburo por precipitación pueden mejorar efectivamente la resistencia a la fatiga y la resistencia a la fluencia.

Los estudios han demostrado que el análisis de fatiga y fluencia a alta temperatura debe combinarse con entornos de aplicación del mundo real, como los ciclos de alta temperatura aeroespaciales o la operación a largo plazo de reactores nucleares, para evaluar con precisión los mecanismos de falla.

5.3.3 Medidas de mejora de la calidad

Según los resultados del análisis de fallas, las medidas de mejora de la calidad de la varilla de molibdeno TZM incluyen principalmente los siguientes aspectos:

Calidad de superficie optimizada: El pulido mecánico, químico y electropulido reduce la rugosidad de la superficie a menos de 1,6 micras y reduce los puntos de inicio de grietas. Los recubrimientos antioxidantes (por ejemplo, siliciuro de molibdeno, alúmina) pueden mejorar aún más la resistencia a la corrosión.

Microestructura mejorada: Los granos más finos (3.0 ~ 5.0 micras) se obtienen optimizando el proceso de pulvimetalurgia (por ejemplo, reduciendo la temperatura de sinterización a 1800 °C y controlando la velocidad de enfriamiento) para mejorar la resistencia a la fatiga y la fluencia.

Control mejorado del proceso de producción: adopte tecnología de inspección en línea (como ultrasonidos, rayos X) y líneas de producción inteligentes para monitorear defectos y parámetros de rendimiento en tiempo real para garantizar la consistencia del producto.

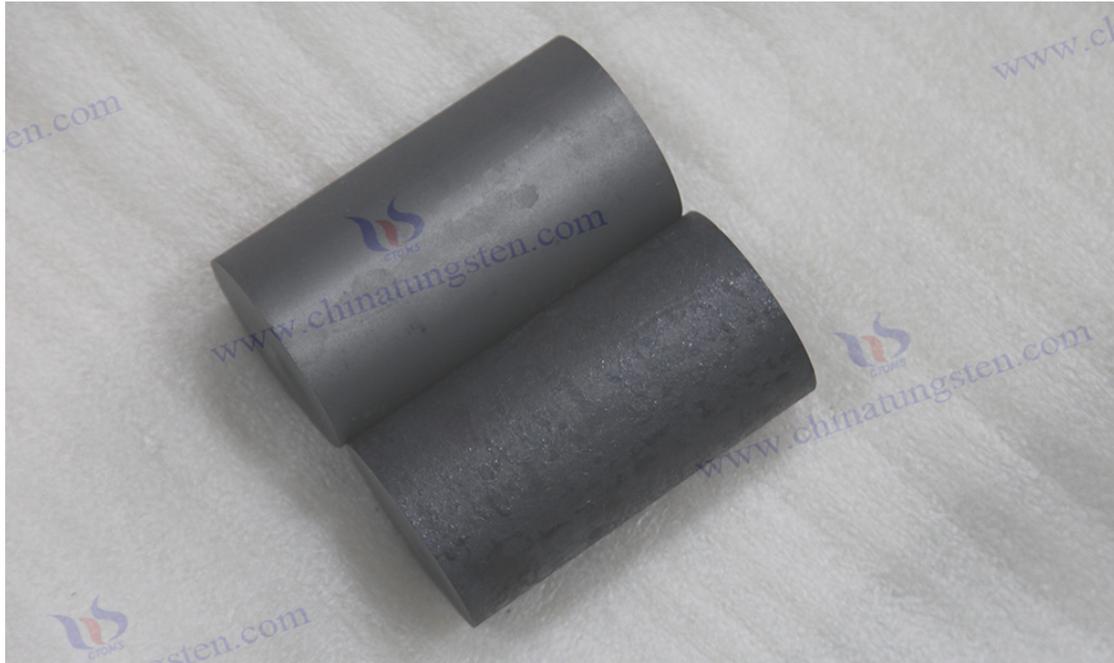
Desarrollo de nuevos recubrimientos: Investigación de nuevos recubrimientos antioxidantes y anticorrosivos (como recubrimientos nanocompuestos) para mejorar la vida útil de varillas de

Copyright and Legal Liability Statement

molibdeno TZM en ambientes por encima de 1500°C.

Sistema de gestión de calidad; Implementar los sistemas de gestión de calidad ISO 9001 y AS9100 (aeroespacial) para garantizar el control de calidad desde las materias primas hasta los productos terminados.

El estudio muestra que a través de las medidas de mejora anteriores, la tasa de defectos de la varilla de molibdeno TZM se puede reducir a menos del 0.5%, y la vida útil se puede aumentar en un 20-30%, lo que cumple con los requisitos de alta confiabilidad de la industria aeroespacial, nuclear y equipos de semiconductores.



CTIA GROUP LTD TZM Varilla de molibdeno

6. Uso de la varilla de molibdeno TZM

Como material de aleación de alto rendimiento, la varilla de molibdeno TZM se ha utilizado ampliamente en muchos campos de alta tecnología debido a su excelente resistencia a altas temperaturas, resistencia a la fluencia, bajo coeficiente de expansión térmica y alta conductividad térmica. La adición de titanio (Ti), circonio (Zr) y carbono (C) a las varillas de molibdeno TZM (molibdeno) mejora significativamente las propiedades del molibdeno, lo que las hace ideales para hornos de alta temperatura, industria aeroespacial, industria nuclear, industrias electrónicas y de semiconductores, y otros campos industriales y científicos. La siguiente es una discusión detallada del uso de la varilla de molibdeno TZM desde cinco aspectos.

6.1 Aplicaciones en hornos de alta temperatura

Las varillas de molibdeno TZM juegan un papel clave en la fabricación de hornos de alta temperatura, debido a su alto punto de fusión (alrededor de 2623 °C), excelente resistencia a la fluencia y a la oxidación, y pueden funcionar de manera estable durante mucho tiempo en entornos de alta temperatura por encima de 1600 °C. A continuación se analiza su aplicación desde tres

Copyright and Legal Liability Statement

aspectos: elemento calefactor, horno de sinterización al vacío y horno de tratamiento térmico.

6.1.1 como elemento calefactor

La varilla de molibdeno TZM es ampliamente utilizada como elemento calefactor en hornos de alta temperatura debido a su alta conductividad térmica ($139 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y su excelente resistencia a la deformación a alta temperatura. En comparación con el molibdeno puro, las varillas de molibdeno TZM tienen una temperatura de recristalización de hasta $1400 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que puede mantener una estructura de grano fino a altas temperaturas y evitar la degradación del rendimiento debido al crecimiento del grano. En los hornos de resistencia, las varillas de molibdeno TZM se utilizan como elementos calefactores para soportar ciclos rápidos de calentamiento y enfriamiento, manteniendo la estabilidad a largo plazo.

Las aplicaciones específicas incluyen:

Horno de vacío: La varilla de molibdeno TZM actúa como elemento calefactor en un entorno de vacío y es capaz de funcionar durante miles de horas a $1600\text{-}1800 \text{ }^\circ\text{C}$, adecuada para la sinterización de metales y cerámicas. Por ejemplo, en los hornos de sinterización de aleaciones de titanio y circonio, las varillas de molibdeno TZM garantizan la uniformidad y la estabilidad de la temperatura.

Horno de protección de atmósfera: En la atmósfera protectora de argón o nitrógeno, la resistencia a la oxidación de la varilla de molibdeno TZM le permite soportar el estrés de oxidación a alta temperatura y prolongar la vida útil. Según Chinatungsten Online, la vida útil del elemento calefactor de la varilla de molibdeno TZM es aproximadamente un 50% más larga que la del molibdeno puro.

Horno de recocido de alta temperatura: la varilla de molibdeno TZM se utiliza para fabricar el elemento calefactor del horno de recocido, que puede proporcionar un campo térmico estable por encima de $1400 \text{ }^\circ\text{C}$, que es adecuado para el tratamiento térmico de aleaciones de alto rendimiento.

La superficie de las varillas de molibdeno TZM generalmente está recubierta con un recubrimiento antioxidante (por ejemplo, siliciuro de molibdeno, MoSi_2) para mejorar aún más la durabilidad en atmósferas oxidantes. Los principales fabricantes de estufas del mundo utilizan ampliamente las varillas de molibdeno TZM en sus diseños de hornos de alta temperatura para satisfacer las necesidades industriales y científicas.

6.1.2 Aplicaciones en hornos de sinterización al vacío

El horno de sinterización al vacío es un equipo importante para la fabricación de materiales de alto rendimiento (como cerámica, aleaciones metálicas), y las varillas de molibdeno TZM se utilizan como soportes, crisoles y elementos calefactores para hornos de sinterización debido a su alta resistencia y resistencia a la corrosión. Las aplicaciones clave incluyen:

Soportes y crisoles: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan para fabricar marcos de soporte y crisoles para hornos de sinterización, que pueden soportar la gravedad y el estrés térmico del material a altas temperaturas. Por ejemplo, en los hornos de sinterización de cerámica de alúmina, los soportes de varillas de molibdeno TZM mantienen la estabilidad geométrica y evitan la

Copyright and Legal Liability Statement

deformación.

Accesorio de alta temperatura: La varilla de molibdeno TZM se procesa en un accesorio que se utiliza para fijar el material sinterizado y garantizar la precisión dimensional durante el proceso de sinterización. Su bajo coeficiente de expansión térmica ($5,3 \times 10^{-6}/K$) garantiza la estabilidad de la luminaria a altas temperaturas.

Manguitos protectores de termopar: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan en la fabricación de fundas protectoras de termopar que pueden proteger los termopares de la corrosión y el daño mecánico en un entorno de vacío por encima de 1800 °C.

6.1.3 Aplicaciones en hornos de tratamiento térmico

Los hornos de tratamiento térmico se utilizan para el recocido, enfriamiento y revenido de metales y aleaciones, y las varillas de molibdeno TZM se utilizan ampliamente en piezas estructurales y elementos calefactores de hornos de tratamiento térmico debido a su excelente resistencia a la fluencia y alta conductividad térmica. Las aplicaciones específicas incluyen:

Elemento calefactor: La varilla de molibdeno TZM se utiliza como elemento calefactor en el horno de tratamiento térmico, que puede proporcionar un campo térmico estable a 1400-1600 °C, que es adecuado para el tratamiento térmico de acero de alta resistencia y aleaciones de titanio.

Componentes internos del horno: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan en la fabricación de bastidores, bandejas y tabiques de soporte de hornos, que son capaces de soportar el peso y el estrés térmico del material a altas temperaturas. Por ejemplo, en los hornos de tratamiento térmico para componentes aeroespaciales, los soportes de varillas de molibdeno TZM mantienen la estabilidad a largo plazo.

Control de atmósfera: En hornos de tratamiento térmico con atmósfera de hidrógeno o argón, la resistencia a la corrosión de las varillas de molibdeno TZM les permite resistir el ataque químico y prolongar la vida útil del horno.

Los resultados muestran que la aplicación de varilla de molibdeno TZM en el horno de tratamiento térmico puede controlar la uniformidad de la temperatura en el horno dentro de ± 5 °C y mejorar significativamente la calidad del tratamiento térmico. Los fabricantes mundiales de hornos de tratamiento térmico prefieren las varillas de molibdeno TZM en sus equipos de alta gama para satisfacer las necesidades de las industrias aeroespacial y automotriz.

6.2 Ámbito aeroespacial

Debido a su alto punto de fusión, excelente resistencia a altas temperaturas y bajo coeficiente de expansión térmica, la varilla de molibdeno TZM juega un papel insustituible en el campo aeroespacial y es ampliamente utilizada en boquillas de cohetes, piezas estructurales de alta temperatura y sistemas de protección térmica de naves espaciales. A continuación se presenta un análisis detallado de estos tres aspectos.

6.2.1 Aplicaciones en toberas de cohetes

Las toberas de cohetes son una de las aplicaciones más exigentes de la industria aeroespacial, ya que soportan altas temperaturas de más de 2000 °C y fuertes choques térmicos. La varilla de

Copyright and Legal Liability Statement

molibdeno TZM se ha convertido en el material elegido para las boquillas de cohetes debido a su alto punto de fusión (2623 °C) y su excelente resistencia al choque térmico. Las aplicaciones específicas incluyen:

Garganta de la boquilla: La varilla de molibdeno TZM se utiliza para hacer la garganta de una boquilla de cohete, que puede soportar flujos de gas a alta temperatura y alta presión en la cámara de combustión. Por ejemplo, las toberas del motor Raptor de SpaceX utilizan aleación TZM para hacer frente a la carga de calor extrema de la combustión de oxígeno líquido/metano.

Extensión de la boquilla: La varilla de molibdeno TZM se utiliza para la extensión de la boquilla, que puede mantener la estabilidad geométrica y reducir la deformación causada por el estrés térmico. Su bajo coeficiente de expansión térmica ($5,3 \times 10^{-6}/K$) garantiza que la boquilla no se agriete durante los cambios bruscos de temperatura.

Recubrimiento antioxidante: Para mejorar la durabilidad en entornos de combustión oxidantes, las boquillas de varilla de molibdeno TZM generalmente están recubiertas con siliciuro de molibdeno o recubrimiento de zirconio para prolongar su vida útil.

6.2.2 Aplicación en piezas estructurales de alta temperatura

Las varillas de molibdeno TZM se utilizan ampliamente en piezas estructurales aeroespaciales de alta temperatura, como álabes de turbinas, paredes de cámaras de combustión y componentes del sistema de propulsión. Su excelente resistencia a altas temperaturas (resistencia a la tracción 400-500 MPa a 1200 °C) y su resistencia a la fluencia le permiten soportar entornos de tensión complejos. Las aplicaciones específicas incluyen:

Palas de turbina: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan para hacer la estructura de soporte de las palas de turbina de motores aeronáuticos, que pueden mantener la resistencia y la estabilidad por encima de 1400 °C.

Pared de la cámara de combustión: la varilla de molibdeno TZM se utiliza para hacer la pared de la cámara de combustión, que puede soportar el desgaste y el choque térmico de los gases de combustión a alta temperatura. Por ejemplo, la cámara de combustión del transbordador espacial X-33 de la NASA utiliza componentes de aleación TZM.

Conectores: Las varillas de molibdeno TZM se procesan en pernos y conectores de alta temperatura, que son adecuados para el ensamblaje a alta temperatura de equipos aeroespaciales.

6.2.3 Aplicación en la protección térmica de los vehículos espaciales

Las naves espaciales se someten a temperaturas de miles de grados centígrados durante la reentrada, y las varillas de molibdeno TZM se utilizan en sistemas de protección térmica (TPS) debido a su alta conductividad térmica y resistencia al choque térmico. Las aplicaciones específicas incluyen:

Placa de protección térmica: la varilla de molibdeno TZM se procesa en una placa delgada, que se utiliza para la capa de protección térmica en el exterior de la nave espacial, que puede disipar rápidamente el calor y proteger la estructura interna.

Escudos térmicos: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan para fabricar escudos térmicos para naves espaciales con el fin de evitar la conducción a alta temperatura a componentes sensibles.

Copyright and Legal Liability Statement

Por ejemplo, algunos de los escudos térmicos de la Estación Espacial Internacional están hechos de aleación TZM.

Recubrimiento antiablaación: La superficie de las varillas de molibdeno TZM generalmente está recubierta con un material antiablativo (como compuestos de carbono / carbono) para mejorar la durabilidad en entornos térmicos extremos.

6.3 Industria nuclear

Las barras de molibdeno TZM tienen aplicaciones importantes en la industria nuclear debido a su baja sección transversal de absorción de neutrones térmicos, resistencia a altas temperaturas y resistencia a la radiación, cubriendo reactores nucleares, dispositivos de fusión nuclear y manejo de materiales radiactivos. A continuación se presenta un análisis detallado de estos tres aspectos.

6.3.1 Aplicaciones en reactores nucleares

Las barras de molibdeno TZM se utilizan en reactores nucleares para fabricar barras de control, piezas estructurales y revestimientos de combustible, y son capaces de soportar altas temperaturas y entornos de alta radiación. Las aplicaciones específicas incluyen:

Barras de control: Las barras de molibdeno TZM se utilizan para fabricar la estructura de soporte de las barras de control, que pueden mantener la estabilidad a altas temperaturas (800-1200 °C) y la irradiación de neutrones. Su sección transversal de baja absorción de neutrones térmicos (alrededor de 2,6 graneros) lo hace superior al acero inoxidable.

Piezas estructurales: Las barras de molibdeno TZM se utilizan en el marco de soporte y las tuberías dentro del reactor y son capaces de soportar la corrosión y el estrés mecánico de los refrigerantes a alta temperatura. Por ejemplo, los reactores rápidos, como el Reactor Rápido Experimental de China, utilizan piezas estructurales de aleación TZM.

Revestimiento de combustible: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan para hacer revestimiento de combustible nuclear, que es capaz de mantener la estanqueidad a altas temperaturas y alta radiación y evitar la fuga de materiales radiactivos.

6.3.2 Aplicaciones en dispositivos de fusión nuclear

Los dispositivos de fusión nuclear, como los tokamaks y los dispositivos de fusión por confinamiento inercial, son extremadamente exigentes con los materiales, y las varillas de molibdeno TZM se utilizan ampliamente debido a su resistencia al ataque del plasma y su alta conductividad térmica. Las aplicaciones específicas incluyen:

Material de revestimiento de plasma (PFM): Las varillas de molibdeno TZM se utilizan para fabricar deflectores y primeras paredes de dispositivos tokamak, que son capaces de soportar el bombardeo de plasma de alta energía y las cargas de calor instantáneas por encima de los 2000 °C. Por ejemplo, el Reactor Internacional Experimental de Fusión Termonuclear (ITER) utiliza la aleación TZM como material deflector.

Material del disipador de calor: La alta conductividad térmica de la varilla de molibdeno TZM la convierte en un material de disipador de calor que puede disipar rápidamente el calor y proteger las partes sensibles de los dispositivos de fusión.

Copyright and Legal Liability Statement

Soporte estructural: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan para fabricar la estructura de soporte de los dispositivos de fusión, que pueden mantener la estabilidad a altas temperaturas y fuertes campos magnéticos.

6.3.3 Aplicaciones en la manipulación de materiales radiactivos

Las varillas de molibdeno TZM se utilizan en el procesamiento de materiales radiactivos para fabricar contenedores, materiales de protección y herramientas operativas, y son resistentes a altos niveles de radiación y corrosión química. Las aplicaciones específicas incluyen:

Contenedores de residuos radiactivos: Las varillas de molibdeno TZM se procesan en contenedores para almacenar residuos altamente radiactivos, que pueden soportar la radiación y la corrosión a largo plazo.

Materiales de protección: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan en la fabricación de materiales de protección contra la radiación, que son superiores a los materiales de protección de plomo tradicionales debido a su alta densidad ($10,2 \text{ g/cm}^3$) y su baja sección transversal de absorción de neutrones térmicos.

Herramientas operativas: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan para fabricar herramientas operativas de alta temperatura, como manipuladores y plantillas, que pueden funcionar de manera segura en entornos de alta radiación.

6.4 Industria electrónica y de semiconductores

Las varillas de molibdeno TZM son ampliamente utilizadas en las industrias electrónica y de semiconductores debido a su alta conductividad térmica, bajo coeficiente de expansión térmica y resistencia a la corrosión, incluidos los dispositivos de implantación de iones, la deposición de película delgada y la fabricación de dispositivos electrónicos. A continuación se presenta un análisis detallado de estos tres aspectos.

6.4.1 Aplicaciones en dispositivos de implantación de iones

Los dispositivos de implantación de iones se utilizan en la fabricación de chips semiconductores, y las varillas de molibdeno TZM se utilizan como componentes clave debido a su alta resistencia y resistencia al ataque del plasma. Las aplicaciones específicas incluyen:

Componentes de la fuente de iones: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan para fabricar los electrodos y los componentes de guía del haz de la fuente de iones, que pueden soportar el bombardeo de haces de iones de alta energía. Su alta conductividad térmica ($139 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) garantiza una rápida disipación del calor y evita el sobrecalentamiento local.

Accesorios y objetivos: Las varillas de molibdeno TZM se procesan en accesorios para la fijación de obleas de silicio que pueden mantener la estabilidad dimensional en entornos de alta temperatura y alto vacío. Por ejemplo, el dispositivo de implantación de iones de TSMC utiliza un accesorio de varilla de molibdeno TZM.

Componentes de blindaje: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan en la fabricación de placas de blindaje en dispositivos de implantación de iones, que son resistentes a la radiación y a la corrosión de partículas de alta energía.

Copyright and Legal Liability Statement

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

High Melting Point: Suitable for extreme high-temperature environments.

Excellent High-Temperature Strength: Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

Good Thermal Stability and Creep Resistance: Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

Superior Corrosion and Oxidation Resistance: Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

Excellent Machinability: Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

High-Temperature Furnace Components: Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

Aerospace Industry: Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

Nuclear Industry: Used in reactor support structures and control rod guide systems.

Electronics Industry: Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

Mold Manufacturing: Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Copyright and Legal Liability Statement

6.4.2 Aplicaciones en la deposición de película delgada

La deposición de película delgada (por ejemplo, deposición física de vapor, PVD) es un proceso clave en la fabricación de semiconductores y dispositivos electrónicos, y las varillas de molibdeno TZM se utilizan como objetivos y accesorios de pulverización catódica debido a su alta conductividad térmica y resistencia a la corrosión. Las aplicaciones específicas incluyen:

Objetivos de pulverización catódica: Las varillas de molibdeno TZM se procesan en objetivos de pulverización catódica para depositar películas delgadas de alto rendimiento, como capas conductoras y aislantes de metales. Su microestructura homogénea garantiza la homogeneidad de la película pulverizada.

Plantillas y soportes: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan para hacer plantillas y soportes en equipos PVD, que pueden mantener la estabilidad a altas temperaturas y alto vacío. Por ejemplo, en la fabricación de pantallas OLED, se utilizan accesorios de varilla de molibdeno TZM para sujetar sustratos.

Elemento calefactor: la varilla de molibdeno TZM se utiliza para fabricar elementos calefactores para equipos PVD, que pueden proporcionar un campo térmico estable a 800-1200 °C.

6.4.3 Aplicaciones en la fabricación de dispositivos electrónicos

Las varillas de molibdeno TZM se utilizan en la fabricación de dispositivos electrónicos para fabricar accesorios, electrodos y conectores de alta temperatura. Las aplicaciones específicas incluyen:

Accesorios de alta temperatura: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan para fabricar accesorios en el procesamiento de obleas y pueden mantener la estabilidad en los procesos de recocido y difusión a alta temperatura. Por ejemplo, el equipo de fabricación de chips de Intel utiliza accesorios de varilla de molibdeno TZM.

Electrodos: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan en la fabricación de electrodos de molibdeno en dispositivos electrónicos, como electrodos en tubos de vacío y dispositivos de microondas, que pueden soportar altas temperaturas y altas corrientes.

Conectores: Las varillas de molibdeno TZM se mecanizan en conectores de alta temperatura para el ensamblaje de dispositivos electrónicos, que son capaces de soportar ciclos térmicos y tensiones mecánicas.

6.5 Otros campos de investigación industrial y científica

Las varillas de molibdeno TZM también se utilizan ampliamente en otros campos industriales y científicos, como equipos experimentales de alta temperatura, moldes y herramientas de alta temperatura y fabricación aditiva. A continuación se presenta un análisis detallado de estos tres aspectos.

6.5.1 Aplicación en equipos experimentales de alta temperatura

Las varillas de molibdeno TZM son ampliamente utilizadas en equipos experimentales de alta temperatura, como hornos de prueba de materiales, dispositivos experimentales de física de plasma y reactores de alta temperatura, debido a su estabilidad a alta temperatura y resistencia a la corrosión.

Copyright and Legal Liability Statement

Las aplicaciones específicas incluyen:

Hornos de prueba de materiales: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan para fabricar accesorios y elementos calefactores para hornos de prueba de tracción y compresión a alta temperatura, capaces de proporcionar un campo térmico estable por encima de 1600 °C. Por ejemplo, el equipo de prueba estándar ASTM E21 utiliza accesorios de varilla de molibdeno TZM.

Experimento de física de plasma: la varilla de molibdeno TZM se utiliza para fabricar electrodos y soportes para dispositivos experimentales de plasma, que pueden resistir la erosión del plasma de alta energía. Por ejemplo, la configuración experimental de plasma láser utiliza electrodos de aleación TZM.

Reactor de alta temperatura: La varilla de molibdeno TZM se utiliza para fabricar elementos calefactores y estructuras de soporte para reactores químicos, que pueden funcionar de manera estable a altas temperaturas y atmósferas corrosivas.

6.5.2 Aplicaciones en moldes y herramientas de alta temperatura

Las varillas de molibdeno TZM se utilizan en la fabricación de moldes y herramientas de alta temperatura debido a su alta dureza (250-300 HV) y propiedades antidesgaste. Las aplicaciones específicas incluyen:

Moldes de fundición a presión: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan para fabricar moldes de fundición a presión para aleaciones de aluminio y aleaciones de magnesio, que pueden soportar altas tensiones y desgaste a 800-1000 °C.

Matrices de forja en caliente: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan para fabricar matrices de forja en caliente para componentes aeroespaciales, que pueden mantener la resistencia y la estabilidad dimensional por encima de 1200 °C.

Herramientas de corte: Las varillas de molibdeno TZM se mecanizan en herramientas de corte a alta temperatura, que son adecuadas para el mecanizado de aleaciones de tungsteno y aleaciones de alta temperatura.

6.5.3 Aplicaciones en fabricación aditiva

La fabricación aditiva (impresión 3D) es un área de aplicación emergente para las varillas de molibdeno TZM, que pueden fabricar piezas de aleación TZM con formas complejas mediante tecnología de fusión selectiva por láser (SLM) o fusión por haz de electrones (EBM). Las aplicaciones específicas incluyen:

Componentes aeroespaciales: El polvo de varilla de molibdeno TZM se utiliza en la impresión 3D de boquillas de cohetes y álabes de turbinas, lo que permite geometrías complejas y reduce los costos de procesamiento. Por ejemplo, las boquillas de aleación TZM impresas en 3D de la NASA son un 30% más ligeras.

Dispositivos médicos: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan para imprimir en 3D piezas de equipos esterilizadas en autoclave que son capaces de mantener la estabilidad en entornos corrosivos y de alta temperatura.

Modelo de investigación científica: el polvo de varilla de molibdeno TZM se utiliza en modelos

Copyright and Legal Liability Statement

experimentales de alta temperatura de impresión 3D para satisfacer las necesidades de pruebas de materiales y experimentos físicos.



CTIA GROUP LTD TZM Varilla de molibdeno

7. Desafíos técnicos y desarrollo futuro de la varilla de molibdeno TZM

Como superaleación de alto rendimiento, la varilla de molibdeno TZM es ampliamente utilizada en la industria aeroespacial, nuclear, fabricación de semiconductores y otros campos debido a su excelente resistencia a altas temperaturas, resistencia a la fluencia y bajo coeficiente de expansión térmica. Sin embargo, con el entorno de aplicación cada vez más duro y el rápido desarrollo de la tecnología industrial, la preparación y aplicación de la varilla de molibdeno TZM enfrenta muchos desafíos técnicos, incluida la resistencia a la oxidación a alta temperatura, la fabricación de formas complejas y el control de costos de producción. Al mismo tiempo, los nuevos materiales, la fabricación inteligente y las tecnologías de producción ecológica brindan nuevas oportunidades para el desarrollo futuro de varillas de molibdeno TZM. Este capítulo analiza exhaustivamente la situación actual y el futuro de la varilla de molibdeno TZM desde cuatro aspectos: desafíos técnicos, nuevos materiales y tecnologías, fabricación inteligente y ecológica y tendencias de desarrollo futuras.

7.1 Desafíos técnicos

La preparación y aplicación de la varilla de molibdeno TZM enfrenta muchos desafíos técnicos, incluida la mejora de la resistencia a la oxidación a alta temperatura, la dificultad de fabricar formas complejas y tamaños grandes, y el control de los costos de producción. Estos desafíos tienen un impacto directo en el rendimiento y la economía de las varillas de molibdeno TZM en aplicaciones de alta gama. A continuación se presenta un análisis detallado desde tres aspectos.

Copyright and Legal Liability Statement

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

High Melting Point: Suitable for extreme high-temperature environments.

Excellent High-Temperature Strength: Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

Good Thermal Stability and Creep Resistance: Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

Superior Corrosion and Oxidation Resistance: Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

Excellent Machinability: Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

High-Temperature Furnace Components: Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

Aerospace Industry: Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

Nuclear Industry: Used in reactor support structures and control rod guide systems.

Electronics Industry: Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

Mold Manufacturing: Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Copyright and Legal Liability Statement

7.1.1 Mejora de la resistencia a la oxidación a alta temperatura

La resistencia a la oxidación de la varilla de molibdeno TZM en un entorno de alta temperatura (>1000 °C) es el principal cuello de botella de su aplicación. Aunque las varillas de molibdeno TZM mejoran la resistencia a la oxidación al agregar titanio (Ti), circonio (Zr) y carbono (C), todavía no funcionan tan bien como las cerámicas o algunas aleaciones a base de níquel en atmósferas oxidantes. Los desafíos específicos incluyen:

Volatilización de óxido: En el entorno oxidante por encima de 1200 °C, se formará trióxido de molibdeno volátil (MoO_3) en la superficie de la varilla de molibdeno TZM, lo que provocará una rápida pérdida de material. Los resultados muestran que la tasa de ganancia de peso oxidativo de la varilla de molibdeno TZM en el aire a 1200 °C es de aproximadamente 0,5-1 $\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$, que es mucho más alta que la de los materiales cerámicos (0,01 $\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$).

Estabilidad de la capa protectora: Las varillas de molibdeno TZM pueden mejorar la resistencia a la oxidación a través de recubrimientos de siliciuro de molibdeno (MoSi_2) o alúmina (Al_2O_3), pero estos recubrimientos son propensos a pelarse o agrietarse por encima de 1500 °C o durante ciclos térmicos a largo plazo. Por ejemplo, los recubrimientos de MoSi_2 pueden alcanzar una tasa de pelado del 20-30% después de 100 ciclos térmicos a 1600 °C.

Adaptabilidad ambiental compleja: En la industria aeroespacial (por ejemplo, toberas de cohetes) y dispositivos de fusión nuclear, las varillas de molibdeno TZM deben soportar altas temperaturas, oxidación y ataque de plasma al mismo tiempo, y un solo recubrimiento antioxidante es difícil cumplir con múltiples requisitos ambientales.

Las mejoras incluyen:

Desarrollo de nuevos recubrimientos: Investigación de recubrimientos compuestos multicapa (como $\text{MoSi}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$) para mejorar la fuerza de unión y la estabilidad del ciclo térmico del recubrimiento y el sustrato a través de la estructura de gradiente. Estudios recientes han demostrado que los recubrimientos nanocompuestos pueden prolongar la vida útil de las varillas de molibdeno TZM hasta en un 50% a 1500 °C.

Modificación de la superficie: Los elementos antioxidantes (como el silicio y el aluminio) se introducen en la superficie de las varillas de molibdeno TZM mediante tratamiento de superficie con láser o tecnología de infiltración de iones para formar una capa protectora in situ. Por ejemplo, las capas de siliciuro para revestimientos láser pueden reducir la ganancia de peso oxidativa a 0,1 $\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$.

Optimización de aleaciones: optimice la distribución y el tamaño de las partículas de carburo (TiC, ZrC) ajustando el contenido de titanio, circonio y carbono, y mejore la resistencia a la oxidación de la matriz. Los experimentos demostraron que aumentar el contenido de circonio al 0,15% podría reducir significativamente la tasa de oxidación.

7.1.2 Formas complejas y fabricación a gran escala

Las formas complejas y las grandes dimensiones de las varillas de molibdeno TZM enfrentan dificultades técnicas, especialmente en las industrias aeroespacial y nuclear, donde se deben fabricar geometrías complejas (por ejemplo, toberas curvas) o componentes a gran escala (por ejemplo, vigas

de soporte de reactores nucleares). Los desafíos específicos incluyen:

Limitaciones de la pulvimetalurgia: Las varillas de molibdeno TZM generalmente se preparan mediante un proceso de pulvimetalurgia, pero este proceso es difícil de lograr una forma casi neta de formas complejas. Aunque el prensado isostático (CIP) puede preparar piezas en bruto complejas, la precisión dimensional es de solo $\pm 0,5$ mm, lo que es difícil de cumplir con el \pm de 0,01 mm requerido por la industria aeroespacial.

Dificultad de mecanizado: La alta dureza (250-300 HV) y la baja tenacidad de las varillas de molibdeno TZM las hacen propensas a agrietarse durante el torneado, el fresado y el taladrado. Por ejemplo, el mecanizado de formas complejas, como roscas internas o microagujeros, puede provocar un desgaste rápido de la herramienta y un aumento del 30-50% en los costes de mecanizado.

Uniformidad a gran escala: La fabricación de varillas de molibdeno TZM de gran tamaño (diámetro > 100 mm y longitud > 1 m) debe garantizar la uniformidad de la microestructura y las propiedades. Los gradientes de temperatura y la contracción desigual durante el proceso de sinterización pueden provocar porosidad interna o grietas, con una tasa de rechazo de hasta el 10-15%.

Las mejoras incluyen:

Fabricación aditiva (impresión 3D): Impresión directa de piezas de varillas de molibdeno TZM con formas complejas mediante tecnología de fusión selectiva por láser (SLM) o fusión por haz de electrones (EBM). La tecnología SLM aumenta la precisión dimensional a $\pm 0,05$ mm y reduce las tasas de desperdicio a menos del 5%. El último estudio de la NASA muestra que las boquillas TZM preparadas por SLM son un 30% más ligeras y un 20% más eficientes.

Forja y laminación de precisión: Optimice la orientación y la densidad del grano de las varillas de molibdeno TZM de gran tamaño con equipos de forjado y laminación de precisión multieje. Por ejemplo, el molino de cuatro alturas del grupo alemán SMS aumenta la densidad de las barras de gran formato al 99,5% de la densidad teórica.

Prensado isostático en caliente (HIP): La tecnología de prensado isostático en caliente se utiliza después de la sinterización para eliminar los microporos en piezas en bruto de gran tamaño y mejorar la uniformidad. El proceso HIP (2000 °C, 200 MPa) reduce la tasa de rechazo a menos del 2%.

7.1.3 Control de costes de producción

El alto costo de producción de la varilla de molibdeno TZM limita su amplia aplicación en algunos campos. Las fuentes de costos incluyen las materias primas, la complejidad del proceso y el control de calidad. Los desafíos específicos incluyen:

Costo de la materia prima: El precio del polvo de molibdeno de alta pureza (pureza $\geq 99,95\%$) y los aditivos de titanio y circonio es más alto, representando el 40-50% del costo total. Por ejemplo, el informe en línea de Chinatungsten 2023 muestra que el precio del polvo de molibdeno de alta pureza ronda los 50-70 dólares/kg.

Complejidad del proceso: La pulvimetalurgia, la sinterización al vacío y el mecanizado a alta temperatura de varillas de molibdeno TZM requieren equipos costosos (por ejemplo, hornos de

Copyright and Legal Liability Statement

sinterización al vacío, trenes de laminación de precisión) con una sola inversión en equipo de hasta millones de dólares. Además, el desgaste de la herramienta y las tasas de desperdicio (alrededor del 10%) durante el mecanizado aumentan aún más los costes.

Costo de control de calidad: Las pruebas en línea (ultrasónicas, rayos X) y las pruebas de rendimiento (pruebas de tracción y fluencia a alta temperatura) requieren instrumentos y profesionales de alta precisión, lo que representa el 20-30% del costo de producción.

Las mejoras incluyen:

Optimización de la materia prima: Al mejorar el proceso de purificación del polvo de molibdeno (por ejemplo, reducción de plasma), se reduce el contenido de oxígeno y las impurezas, y se reduce la cantidad de aditivos. Por ejemplo, la tecnología de reducción por plasma de H.C. Starck puede reducir el costo del polvo de molibdeno en un 15%.

Simplificación del proceso: La tecnología de forma casi neta, como SLM o HIP, reduce los pasos de procesamiento posteriores, las tasas de desperdicio y los costes de procesamiento. Los estudios han demostrado que la forma casi neta puede reducir los costos de procesamiento en un 20-30%.

Producción automatizada: a través de líneas de producción inteligentes (como el control PLC y los sistemas de detección en línea), mejore la eficiencia de la producción y reduzca los costos de mano de obra.

7.2 Nuevos materiales y tecnologías

El desarrollo de nuevos materiales y tecnologías ofrece nuevas oportunidades para mejorar el rendimiento de las varillas de molibdeno TZM y la expansión de los campos de aplicación. El siguiente es un análisis detallado desde tres aspectos: diseño de aleaciones modificadas, nanoestructuras y materiales compuestos, y competencia con otros materiales de alta temperatura.

7.2.1 Diseño de aleación modificado

Al modificar el diseño de la aleación y optimizar la composición y la microestructura de las varillas de molibdeno TZM, sus propiedades se pueden mejorar aún más. Los métodos incluyen:

Agregue nuevos elementos: Introduzca pequeñas cantidades de elementos de tierras raras (como lantano, cerio) o renio (Re) en la aleación TZM para mejorar la resistencia a la oxidación y la resistencia a altas temperaturas. Por ejemplo, la adición de lantano al 0,1% aumenta la temperatura de recristalización de las varillas de molibdeno TZM a 1500 °C y la resistencia a la tracción en un 10-15%.

Optimización de carburo: Optimice el tamaño (0,5-2 micras) y la distribución de las partículas de carburo (TiC, ZrC) mediante un control preciso del contenido de carbono (0,02-0,05%) y el proceso de sinterización para mejorar la intensificación de la precipitación. Los estudios han demostrado que los carburos a nanoescala distribuidos uniformemente pueden reducir las tasas de fluencia hasta en un 20%.

Fortalecimiento de la solución: Al aumentar el contenido de solución sólida de titanio y circonio (Ti: 0.6-0.8%, Zr: 0.15-0.2%), se mejora la distorsión de la red de la matriz de molibdeno

Copyright and Legal Liability Statement

y se mejora la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la corrosión.

7.2.2 Nanoestructuras y materiales compuestos

La nanoestructura y la tecnología de materiales compuestos proporcionan una nueva dirección para la optimización del rendimiento de las varillas de molibdeno TZM. Los métodos incluyen:

Estructura nanocristalina: El tamaño de grano de la varilla de molibdeno TZM se controla a 50-100 nm mediante molienda de bolas de alta energía y tecnología de sinterización rápida. La estructura nanocristalina mejora significativamente la resistencia y tenacidad del material. Por ejemplo, la resistencia a la fractura de las varillas de molibdeno TZM nanocristalino puede alcanzar $25 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, que es mayor que la del TZM convencional ($15\text{-}20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Compuestos: Las varillas de molibdeno TZM se combinan con cerámica (por ejemplo, SiC, Al_2O_3) o materiales a base de carbono (por ejemplo, grafeno) para formar compuestos de matriz metálica (MMC). La resistencia a la oxidación de los compuestos de SiC/TZM es 2 veces mayor a $1500 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que es adecuado para los deflectores de los dispositivos de fusión nuclear.

Nano recubrimientos: Los recubrimientos antioxidantes a nanoescala (por ejemplo, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$) se depositan en la superficie de las varillas de molibdeno TZM mediante técnicas de deposición química de vapor (CVD) o deposición física de vapor (PVD). El coeficiente de expansión térmica del nano recubrimiento es más compatible con el sustrato y la tasa de pelado se reduce a menos del 5%.

7.2.3 Competencia con otros materiales de alta temperatura

Las varillas de molibdeno TZM se enfrentan a la competencia de otros materiales de alta temperatura, como las aleaciones de tungsteno, las aleaciones a base de níquel, las cerámicas y los compuestos a base de carbono. Las comparaciones específicas incluyen:

Aleaciones de tungsteno: Las aleaciones de tungsteno (densidad $19,3 \text{ g/cm}^3$) tienen un punto de fusión ($3422 \text{ }^\circ\text{C}$) y una resistencia más altos, pero una densidad mucho mayor que las varillas de molibdeno TZM ($10,2 \text{ g/cm}^3$), lo que las limita en aplicaciones aeroespaciales sensibles al peso. La varilla de molibdeno TZM puede reemplazar algunas aplicaciones de aleación de tungsteno por debajo de $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ optimizando la resistencia a la oxidación.

Aleaciones a base de níquel: Las aleaciones a base de níquel (por ejemplo, Inconel 718) tienen una excelente resistencia a la oxidación y tenacidad a $1000\text{-}1200 \text{ }^\circ\text{C}$, pero su resistencia a altas temperaturas ($200\text{-}300 \text{ MPa}$) es menor que la de las varillas de molibdeno TZM ($400\text{-}500 \text{ MPa}$). Las varillas de molibdeno TZM compiten a temperaturas más altas a través de la tecnología de nanorrecubrimiento.

Cerámicas y compuestos a base de carbono: las cerámicas (por ejemplo, SiC, ZrB_2) tienen una excelente resistencia a la oxidación pero una alta fragilidad; Los compuestos de carbono/carbono son ligeros, pero requieren una protección de recubrimiento compleja en entornos oxidantes. Las varillas de molibdeno TZM están diseñadas con compuestos (por ejemplo, TZM / SiC) para combinar la tenacidad del metal con la resistencia a la oxidación cerámica.

Las mejoras incluyen el desarrollo de compuestos de matriz TZM, la optimización de la tecnología

Copyright and Legal Liability Statement

de recubrimiento y la reducción de los costos de producción para mejorar la competitividad de las varillas de molibdeno TZM en el mercado de materiales de alta temperatura.

7.3 Fabricación inteligente y ecológica

La tecnología de fabricación inteligente y ecológica es la dirección de desarrollo de la producción de varillas de molibdeno TZM, que puede mejorar la eficiencia de la producción, reducir el consumo de energía y reducir la contaminación ambiental. A continuación, se presenta un análisis detallado desde tres aspectos: monitorización inteligente de la producción, producción respetuosa con el medio ambiente y ahorro de energía, y reciclaje de residuos.

7.3.1 Tecnología inteligente de monitorización de la producción

La tecnología inteligente de monitoreo de producción optimiza el proceso de producción de varillas de molibdeno TZM a través de la recopilación y el análisis de datos en tiempo real, mejorando la consistencia de la calidad y la eficiencia. Las tecnologías específicas incluyen:

Sistema de inspección en línea: Utilizando tecnología de inspección ultrasónica, de rayos X y visual, monitoreo en tiempo real del tamaño, defectos y microestructura de las varillas de molibdeno TZM. Por ejemplo, los sistemas de imágenes de rayos X pueden detectar defectos internos de más de 0,1 mm y reducir la tasa de rechazo a menos del 0,5%.

Internet industrial de las cosas (IIoT): A través de sensores y sistemas PLC, la temperatura de sinterización, la presión de forja y los parámetros de procesamiento se recopilan en tiempo real y se transmiten a la nube para su análisis. Los sistemas IIoT pueden aumentar la productividad hasta en un 20% y reducir las tasas de fallos de los equipos en un 15%.

Optimización de IA: utiliza algoritmos de aprendizaje automático para predecir el impacto de los parámetros del proceso en el rendimiento, optimizando la temperatura de sinterización, la deformación por laminación y el espesor del recubrimiento. Por ejemplo, la optimización de IA puede controlar el tamaño de grano de las varillas de molibdeno TZM a 10-20 micras, mejorando la resistencia a la fluencia.

7.3.2 Tecnología de producción que ahorra energía y es respetuosa con el medio ambiente

El proceso de producción de varillas de molibdeno TZM (por ejemplo, sinterización al vacío, forja en caliente) es intensivo en energía y requiere tecnologías de ahorro de energía y respetuosas con el medio ambiente para reducir la huella de carbono. Las medidas específicas incluyen:

Horno de sinterización de alta eficiencia: Los hornos de sinterización al vacío de alta eficiencia (por ejemplo, calentador de tungsteno) se utilizan para reducir el consumo de energía en un 15-20% optimizando la curva de calentamiento y el tiempo de retención. Por ejemplo, el horno de sinterización de ALD en Alemania puede controlar el consumo de energía de una sola sinterización a menos de 500 kWh.

Energía renovable: Reduzca las emisiones de carbono cambiando la fuente de energía de su equipo de producción a solar o eólica. Por ejemplo, algunos productores de varillas de molibdeno TZM en Europa han logrado un suministro de energía renovable del 50%.

Tratamiento de gases de escape: En el proceso de pulvimetalurgia y tratamiento de superficies,

Copyright and Legal Liability Statement

se utilizan sistemas de filtración de alta eficiencia (como filtros HEPA) para tratar óxidos volátiles y gases residuales ácidos para garantizar que las emisiones cumplan con los estándares RoHS de la UE.

Los estudios han demostrado que las tecnologías de ahorro de energía y respetuosas con el medio ambiente pueden reducir las emisiones de carbono de la producción de varillas de molibdeno TZM en un 30%, lo que está en línea con la tendencia mundial de fabricación ecológica.

7.3.3 Reciclaje eficiente de materiales de desecho

La chatarra (por ejemplo, virutas de corte, residuos sinterizados) en la producción de varillas de molibdeno TZM contiene molibdeno, titanio y circonio de alto valor, y la tecnología de reciclaje eficiente reduce los costos y el impacto ambiental. Los métodos incluyen:

Reciclaje químico: El molibdeno, el titanio y el circonio se extraen de los materiales de desecho mediante técnicas de disolución ácida y separación electroquímica. La tasa de recuperación puede alcanzar el 95% y el costo se puede reducir en un 20%. Por ejemplo, el proceso de recuperación química de H.C. Starck aumenta la recuperación de molibdeno al 98%.

Reciclaje mecánico: La chatarra se reprocesa en barras de molibdeno TZM mediante tecnología de trituración, cribado y resinización. El reciclaje mecánico es adecuado para materiales de desecho de gran tamaño con una tasa de reciclaje de aproximadamente el 90%.

Sistema de reciclaje de circuito cerrado: Establezca un sistema de reciclaje de circuito cerrado de la línea de producción para reutilizar directamente los materiales de desecho en el proceso de pulvimetalurgia para reducir el desperdicio de recursos. Según Chinatungsten Online, el reciclaje de circuito cerrado puede reducir la tasa de desechos a menos del 5%.

La tecnología de reciclaje de residuos no solo reduce los costos de producción, sino que también cumple con los requisitos de la economía circular y promueve el desarrollo sostenible de la industria de varillas de molibdeno TZM.

7.4 Tendencias futuras

El desarrollo futuro de las varillas de molibdeno TZM se centrará en el diseño de alto rendimiento, la expansión de aplicaciones entre dominios y las aplicaciones en entornos extremos para satisfacer las necesidades de la industria aeroespacial, la fusión nuclear, las nuevas energías y otros campos. A continuación se presenta un análisis detallado desde tres aspectos.

7.4.1 Diseño y optimización de alto rendimiento

El diseño de alto rendimiento mejora aún más el rendimiento de las varillas de molibdeno TZM a través de la optimización del material, el proceso y la estructura. Las tendencias específicas incluyen:

Simulación multiescala: La dinámica molecular y el análisis de elementos finitos se utilizan para simular el rendimiento de las varillas de molibdeno TZM en entornos de alta temperatura y alta tensión, y optimizar la composición y la microestructura de la aleación. Por ejemplo, las simulaciones muestran que la adición de renio al 0,1% aumenta la resistencia a la tracción en un

Copyright and Legal Liability Statement

15%.

Diseño personalizado: La composición, el recubrimiento y la forma de la varilla de molibdeno TZM se pueden personalizar de acuerdo con las necesidades de la aplicación (por ejemplo, boquilla de cohete o deflector de fusión). Por ejemplo, los componentes aeroespaciales pueden equiparse con un alto contenido de titanio (0,8%) para mayor resistencia, y los dispositivos de fusión nuclear pueden equiparse con un alto contenido de circonio (0,2%) para mejorar la resistencia a la oxidación.

Materiales funcionalmente graduados (FGM): Los materiales de gradiente funcional basados en TZM se desarrollan para mejorar sus propiedades generales mediante la formación de gradientes de rendimiento (por ejemplo, capa de oxidación superficial, matriz interna de alta tenacidad) dentro del material. La mutilación genital femenina puede prolongar la vida útil de las varillas de molibdeno TZM a 1600 °C por un factor de 2.

7.4.2 Extensión de aplicación entre dominios

El campo de aplicación de la varilla de molibdeno TZM se está expandiendo de la industria tradicional de alta temperatura a los campos de nuevas energías, medicina y defensa nacional. Las tendencias específicas incluyen:

Nueva energía: la varilla de molibdeno TZM se utiliza para fabricar conectores y electrodos para celdas de combustible de óxido sólido (SOFC), que pueden funcionar de manera estable a 800-1000 °C. Por ejemplo, el SOFC de Bloom Energy utiliza conectores de aleación TZM.

Dispositivos médicos: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan en la fabricación de componentes para equipos de esterilización a alta temperatura y contenedores de radioisótopos, que pueden soportar altas temperaturas y alta radiación. Por ejemplo, los contenedores de cobalto-60 médico tienen una vida útil de los componentes TZM de hasta 20 años.

Industria de defensa: Las varillas de molibdeno TZM se utilizan en la fabricación de sistemas de protección térmica y toberas de misiles para vehículos hipersónicos, capaces de soportar cargas de calor instantáneas superiores a 3000 °C.

La expansión de las aplicaciones intersectoriales impulsará el crecimiento del mercado de varillas de molibdeno TZM, que se espera que crezca un 20% para 2030.

7.4.3 Aplicaciones en entornos extremos

La aplicación de la varilla de molibdeno TZM en entornos extremos (como temperaturas ultra altas, fuerte radiación y fuerte corrosión) es el foco del desarrollo futuro. Las tendencias específicas incluyen:

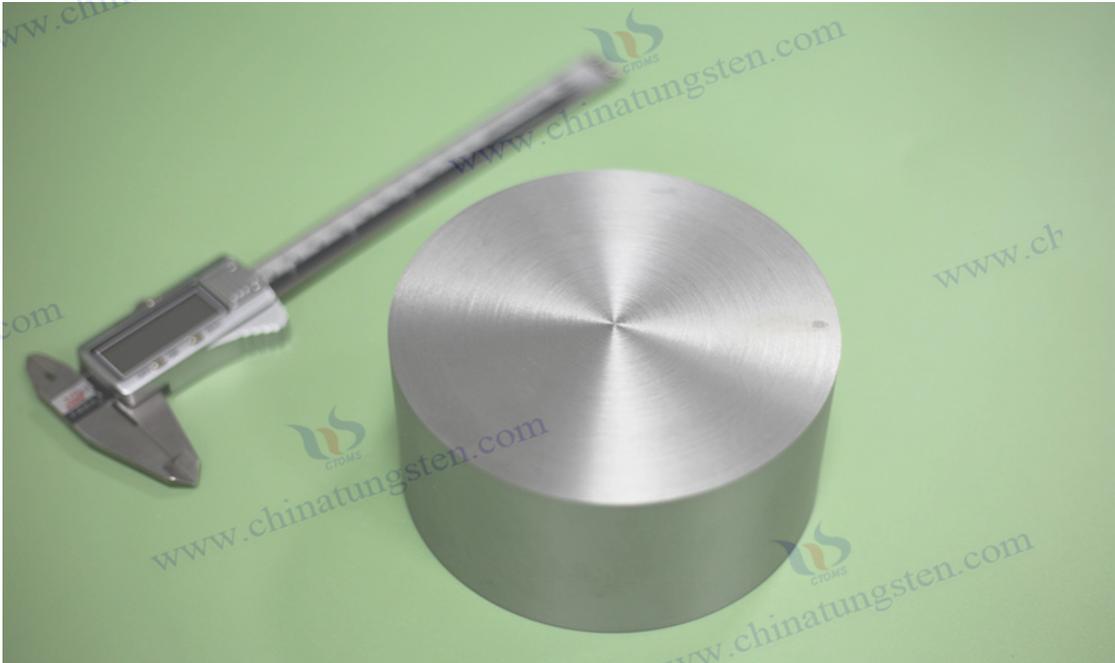
Entornos de temperatura ultra alta: A través del desarrollo de nuevos recubrimientos antioxidantes y materiales compuestos, las varillas de molibdeno TZM se pueden aplicar a entornos de temperatura ultra alta por encima de 2000 °C, como motores de cohetes de próxima generación y propulsores de plasma.

Entorno de fuerte radiación: En la fusión nuclear y la exploración espacial, las barras de molibdeno TZM deben exponerse a la irradiación de neutrones y rayos gamma de alta energía. La adición de elementos de tierras raras y la optimización de la microestructura pueden mejorar la

Copyright and Legal Liability Statement

resistencia a la radiación para satisfacer las necesidades del ITER y las bases lunares.

Entornos altamente corrosivos: En las industrias química y en alta mar, las varillas de molibdeno TZM deben ser resistentes a los gases ácidos y a la niebla salina. La tecnología de nitruración superficial y recubrimiento compuesto reduce la tasa de corrosión a 0,005 mm/año.



CTIA GROUP LTD TZM Varilla de molibdeno

8. Estándares y especificaciones de varillas de molibdeno TZM

Como superaleación de alto rendimiento, la varilla de molibdeno TZM es ampliamente utilizada en la industria aeroespacial, nuclear, fabricación de semiconductores y otros campos, y su producción, prueba y aplicación deben seguir estrictos estándares y especificaciones. Estas normas cubren la composición del material, las pruebas de rendimiento, el proceso de producción, el control de calidad y la gestión ambiental para garantizar la consistencia de la calidad, la seguridad y la competitividad en el mercado internacional de las varillas de molibdeno TZM. Este capítulo analiza exhaustivamente las normas y especificaciones relacionadas con la varilla de molibdeno TZM desde cinco aspectos: normas nacionales (normas nacionales), normas internacionales (ISO), normas americanas (normas americanas), otras normas internacionales y de la industria, e implementación y certificación de normas.

8.1 Normas nacionales (GB)

Como el mayor productor mundial de recursos de molibdeno y fabricante de varillas de molibdeno TZM, China ha formulado una serie de normas nacionales (GB/T) para regular la producción y aplicación de varillas de molibdeno TZM. Estas normas cubren las propiedades de los materiales, los métodos de prueba y los procesos de los equipos, y proporcionan una base unificada para las empresas nacionales y el comercio internacional. A continuación se presenta un análisis detallado desde tres aspectos.

Copyright and Legal Liability Statement

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

High Melting Point: Suitable for extreme high-temperature environments.

Excellent High-Temperature Strength: Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

Good Thermal Stability and Creep Resistance: Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

Superior Corrosion and Oxidation Resistance: Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

Excellent Machinability: Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

High-Temperature Furnace Components: Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

Aerospace Industry: Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

Nuclear Industry: Used in reactor support structures and control rod guide systems.

Electronics Industry: Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

Mold Manufacturing: Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Copyright and Legal Liability Statement

8.1.1 GB/T Estándares de materiales de molibdeno y aleaciones de molibdeno

Las Normas Nacionales Chinas (GB/T) especifican en detalle la composición química, las propiedades físicas y los requisitos de procesamiento del molibdeno y las aleaciones de molibdeno (como TZM), y las principales normas incluyen:

GB/T 3462-2017 Barras de molibdeno y aleaciones de molibdeno: Esta norma especifica la composición química de las varillas de molibdeno TZM (Mo \geq 99,38%, Ti: 0,4-0,55%, Zr: 0,06-0,12%, C: 0,01-0,04%), tolerancia dimensional (diámetro \pm 0,02 mm, longitud \pm 1 mm), calidad de la superficie (Ra \leq 3,2 micras) y propiedades mecánicas (resistencia a la tracción \geq 400 MPa, 1200 °C). La norma exige que las varillas de molibdeno TZM se preparen mediante sinterización al vacío o sinterización en atmósfera para garantizar que la densidad alcance más del 98% de la densidad teórica.

GB/T 4194-2015 Métodos de análisis químico para molibdeno y aleaciones de molibdeno: Esta norma especifica en detalle los métodos para el análisis de molibdeno, titanio, circonio, carbono y elementos de impurezas en varillas de molibdeno TZM, incluida la espectroscopia de emisión de plasma acoplada inductivamente (ICP-OES) y la espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF). Por ejemplo, el contenido de oxígeno debe controlarse en \leq 0,005%, y las impurezas como el hierro y el silicio deben \leq 0,01%.

GB/T 17792-2014 Condiciones técnicas generales para barras de molibdeno y aleaciones de molibdeno: Esta norma cubre los requisitos de microestructura, detección de defectos superficiales y requisitos de embalaje y transporte de varillas de molibdeno TZM. La norma hace hincapié en que no debe haber incrustaciones, arañazos o porosidad en la superficie de la barra.

8.1.2 Normas de ensayo y evaluación de superaleaciones

El estándar de prueba y evaluación de superaleaciones se utiliza para evaluar las propiedades mecánicas, la resistencia a la oxidación y la resistencia a la fluencia de las varillas de molibdeno TZM en un entorno de alta temperatura. Los criterios clave incluyen:

GB/T 4338-2015 Método de prueba de tracción a alta temperatura para materiales metálicos: Esta norma especifica el método de prueba de tracción para la varilla de molibdeno TZM a 1000-1600 °C, que requiere el uso de vacío o atmósfera inerte (como argón) para probar el entorno, y la precisión del control de temperatura es de \pm 5 °C. Los resultados de la prueba muestran que la resistencia a la tracción de la varilla de molibdeno TZM a 1200 °C es de 400-500 MPa y el alargamiento es del 5-10%.

GB/T 2039-2012 Métodos de prueba de resistencia a la fluencia y resistencia para materiales metálicos: Esta norma se utiliza para probar el rendimiento de fluencia de varillas de molibdeno TZM a 1400 °C y 20 MPa, que requieren una tasa de fluencia de menos de 10^{-6} / s y una vida útil de \geq 5000 horas. Las pruebas requieren un probador de fluencia de alta temperatura (por ejemplo, la serie Instron 5980).

GB/T 16878-1997 Método de prueba para la dureza a alta temperatura de materiales metálicos: Esta norma especifica el método de prueba de dureza Vickers (HV) para varillas de molibdeno TZM a 1000 °C, y se requiere que la dureza se mantenga a 200-250 HV. Los resultados de la prueba muestran que la dureza a alta temperatura de la varilla de molibdeno TZM es mejor que la del

Copyright and Legal Liability Statement

molibdeno puro (150-200 HV).

Estos estándares garantizan la confiabilidad de las barras de molibdeno TZM en aplicaciones de alta temperatura, como toberas de cohetes, componentes de reactores nucleares. Según el informe técnico de Chinatungsten Online, la implementación de GB/T 4338 y GB/T 2039 ha mejorado significativamente la calidad de aplicación de las varillas de molibdeno TZM en el campo aeroespacial.

8.1.3 Equipo de ejecución y especificaciones del proceso

Las especificaciones del equipo y del proceso garantizan la estandarización y la seguridad del proceso de producción de varillas de molibdeno TZM. Los criterios clave incluyen:

GB/T 15067-2016 Condiciones técnicas para equipos de procesamiento de molibdeno y aleaciones de molibdeno: Esta norma especifica los requisitos de rendimiento para hornos de sinterización al vacío, máquinas de forja y equipos de laminación. Por ejemplo, el horno de sinterización al vacío debe alcanzar un grado de vacío de 10^{-3} - 10^{-5} Pa y una uniformidad de temperatura de $\pm 5^{\circ}\text{C}$; El rango de presión de la máquina de forja es de 500-2000 toneladas.

GB 50828-2012 Especificación de seguridad para la producción de superaleaciones: Esta norma exige que el taller de producción de varillas de molibdeno TZM esté equipado con dispositivos a prueba de explosiones, sistemas de tratamiento de gases de escape (como filtros HEPA) y salas limpias (ISO clase 7, concentración de partículas < 10.000 partículas/ m^3). La norma también especifica medidas para prevenir el polvo y la oxidación en los procesos de pulvimetalurgia.

GB/T 29490-2013 Requisitos para sistemas de gestión de energía empresarial: Esta norma guía a los fabricantes de varillas de molibdeno TZM para optimizar el consumo de energía, como el uso de hornos de sinterización de alta eficiencia (consumo de energía < 500 kWh/hora) y el suministro de energía renovable.

Estas especificaciones garantizan la seguridad, la eficiencia y el respeto al medio ambiente de la producción de varillas de molibdeno TZM. Por ejemplo, un fabricante chino de varillas de molibdeno TZM ha aumentado la eficiencia de producción en un 20% y ha reducido la tasa de chatarra a menos del 5% mediante la implementación de GB/T 15067.

8.2 Normas Internacionales (ISO)

La norma de la Organización Internacional de Normalización (ISO) proporciona una especificación uniforme para la producción y aplicación global de varillas de molibdeno TZM, que abarca las pruebas de materiales, la gestión ambiental y las pruebas no destructivas. A continuación se presenta un análisis detallado desde tres aspectos.

8.2.1 ISO 6892 Ensayos de tracción de materiales metálicos

La serie de normas ISO 6892, incluidas ISO 6892-1:2019 e ISO 6892-2:2018, especifica el método de prueba de tracción para varillas de molibdeno TZM a temperatura ambiente y altas temperaturas:

ISO 6892-1:2019 (Tracción a temperatura ambiente): Requiere pruebas de resistencia a la

Copyright and Legal Liability Statement

tracción (600-700 MPa), límite elástico (500-600 MPa) y elongación (10-15%) de varillas de molibdeno TZM utilizando una máquina de prueba universal (por ejemplo, Instron 5982). El ensayo se realiza a una velocidad de deformación constante (10^{-3} /s) con una rugosidad superficial de $Ra \leq 0,4$ micras.

ISO 6892-2:2018 (Tracción a alta temperatura): Especifica un método de ensayo de tracción a 1000-1600 °C, que requiere el uso de vacío o una atmósfera inerte (por ejemplo, argón, pureza $\geq 99,999\%$) y una precisión de control de temperatura de ± 5 °C. Los resultados de la prueba muestran que la resistencia a la tracción de la varilla de molibdeno TZM a 1200 °C es de 400-500 MPa, que es mejor que la del molibdeno puro a 200-300 MPa.

8.2.2 Sistema de Gestión Ambiental ISO 14001

La ISO 14001:2015 es una norma mundialmente aceptada para sistemas de gestión ambiental que guía a los fabricantes de varillas de molibdeno TZM para reducir su impacto ambiental. Los requisitos específicos incluyen:

Gestión de la energía: Es necesario optimizar el consumo de energía de los hornos de sinterización y los equipos de procesamiento, como el uso de elementos calefactores de alta eficiencia (calentadores de tungsteno) y fuentes de energía renovables. El consumo de energía de los fabricantes de varillas de molibdeno TZM debe controlarse por debajo de 500 kWh / tonelada.

Gestión de residuos: Los materiales de desecho generados durante la pulvimetalurgia y el tratamiento de superficies (por ejemplo, polvo de molibdeno, residuos ácidos) deben clasificarse y reciclarse. Por ejemplo, el reciclaje químico puede aumentar la recuperación de molibdeno hasta el 98%.

Control de emisiones: Requiere la instalación de sistemas de tratamiento de gases de escape de alta eficiencia (por ejemplo, filtros HEPA) para garantizar que las emisiones de óxidos volátiles (MoO_3) y gases ácidos cumplan con las regulaciones locales (por ejemplo, las normas RoHS de la UE).

Los principales productores mundiales de varillas de molibdeno TZM, como Plansee, cuentan con la certificación ISO 14001, lo que reduce las emisiones de carbono en un 30%, en línea con la tendencia de fabricación ecológica.

8.2.3 Norma ISO 3452 para ensayos no destructivos

La serie de normas ISO 3452, incluida la ISO 3452-1:2021, especifica un método de prueba de penetrantes para varillas de molibdeno TZM para la detección de grietas y defectos superficiales. Los requisitos específicos incluyen:

Pruebas de penetrantes (PT): Detecta grietas, poros y arañazos en la superficie de las varillas de molibdeno TZM utilizando permeado de tinte fluorescente o visible. Sensibilidad de detección de hasta 0,05 mm para componentes aeroespaciales como toberas de cohetes.

Proceso de inspección: incluida la limpieza de superficies, la aplicación de permeado, la aplicación de revelador y la observación de defectos. La norma requiere una iluminancia ambiental de 500-1000 lx y una temperatura de 20-25 °C.

Copyright and Legal Liability Statement

Criterios de aceptación: longitud de la grieta superficial $\leq 0,1$ mm, diámetro de poro $\leq 0,05$ mm. Las varillas de molibdeno TZM deben pasar pruebas 100% penetrantes para aplicaciones aeroespaciales.

8.3 Normas americanas (norma de EE. UU.)

Las normas estadounidenses (ASTM, ASME) tienen una influencia importante en la aplicación global de las varillas de molibdeno TZM, especialmente en las industrias aeroespacial y nuclear. A continuación se presenta un análisis detallado desde tres aspectos.

8.3.1 Norma ASTM B387 para molibdeno y barras de aleación de molibdeno

ASTM B387-18 es el estándar básico para varillas de molibdeno TZM, que especifica la composición del material, las propiedades y los requisitos de procesamiento:

Composición química: Mo $\geq 99.38\%$, Ti: 0.4-0.55%, Zr: 0.06-0.12%, C: 0.01-0.04%, impurezas (como Fe, Si) $\leq 0.01\%$.

Propiedades mecánicas: resistencia a la tracción 600-700 MPa a temperatura ambiente, alargamiento 10-15%; Resistencia a la tracción a 1200°C 400-500 MPa. La norma requiere pruebas de acuerdo con ASTM E8 (tracción a temperatura ambiente) y ASTM E21 (tracción a alta temperatura).

Dimensiones y superficie: Tolerancia de diámetro $\pm 0,02$ mm, rugosidad superficial Ra $\leq 0,4$ micras, sin grietas, incrustaciones de óxido o porosidad.

Microestructura: Tamaño de grano 10-30 micras, densidad $\geq 98\%$ de densidad teórica.

8.3.2 Prueba de microdureza ASTM E384

ASTM E384-17 especifica un método de prueba de microdureza para varillas de molibdeno TZM para evaluar la dureza del material y la uniformidad de la microestructura:

Método de prueba: se utiliza el probador de dureza Vickers (HV), la fuerza de carga es de 0,5-1 kg y el tiempo de indentación es de 10-15 segundos. Los resultados de la prueba muestran que la dureza de la varilla de molibdeno TZM es de 250-300 HV, y el área de partículas de carburo puede alcanzar 500 HV.

Dureza a alta temperatura: probada a 1000 °C, la dureza se mantiene a 200-250 HV, que es mejor que los 150-200 HV de molibdeno puro.

Análisis de microestructura: Se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM) para observar la microestructura alrededor de la hendidura para evaluar la distribución y el efecto de intensificación de las partículas de carburo.

ASTM E384 garantiza la confiabilidad de las varillas de molibdeno TZM en moldes de alta temperatura y componentes aeroespaciales. Por ejemplo, Boeing utiliza la norma ASTM E384 para probar la dureza de las varillas de molibdeno TZM y garantizar el rendimiento de los soportes de los álabes de las turbinas.

Copyright and Legal Liability Statement

CTIA GROUP LTD

TZM Molybdenum Rod Introduction

1. Overview of TZM Molybdenum Rod

TZM molybdenum rods are high-performance molybdenum-based alloy materials composed of a molybdenum (Mo) matrix with small additions of titanium (Ti), zirconium (Zr), and carbon (C). Compared to pure molybdenum, TZM alloy offers significantly higher high-temperature strength, excellent thermal stability, superior creep resistance, and outstanding oxidation resistance, making it an ideal material for high-temperature structural applications.

2. Characteristics of TZM Molybdenum Rod

High Melting Point: Suitable for extreme high-temperature environments.

Excellent High-Temperature Strength: Maintains mechanical strength and rigidity at 1200–1600°C.

Good Thermal Stability and Creep Resistance: Ideal for long-term use under high temperatures with minimal deformation and high reliability.

Superior Corrosion and Oxidation Resistance: Applicable in vacuum, high-temperature inert atmospheres, and oxidative conditions.

Excellent Machinability: Suitable for turning, milling, grinding, and welding processes.

3. Typical Applications of TZM Molybdenum Rod

High-Temperature Furnace Components: Supports, heat shields, heating elements, and electrode rods.

Aerospace Industry: Structural components in rocket nozzles and engine parts operating under high temperatures.

Nuclear Industry: Used in reactor support structures and control rod guide systems.

Electronics Industry: Structural materials in ion implantation, evaporation sources, and semiconductor processing equipment.

Mold Manufacturing: Hot extrusion dies, aluminum alloy die-casting molds with excellent high-temperature wear resistance.

4. Specifications of TZM Molybdenum Rod

Main Ingredients	Mo: ≥ 99%
	Ti: 0.40–0.55%
	Zr: 0.06–0.12%
	C: 0.01–0.04%
Size Range	Diameter φ6mm – φ120mm, length up to 2000mm (customizable)
Surface	Black(forged), bright (turned or ground)
Processing Method	Forging, rolling, drawing, or machining forming

5. Procurement Information

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

Website: www.molybdenum.com.cn

Copyright and Legal Liability Statement

8.3.3 Norma ASME para la fabricación de equipos de alta temperatura

La norma ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos) regula la fabricación y aplicación de barras de molibdeno TZM en equipos de alta temperatura como reactores nucleares, motores aeronáuticos. Los criterios clave incluyen:

ASME BPVC Sección II: Especifica las propiedades del material y los requisitos de certificación para las varillas de molibdeno TZM, como la resistencia a la tracción, las propiedades de fluencia y la resistencia a la oxidación. La norma requiere una tasa de fluencia de menos de 10^{-6} /s para las varillas de molibdeno TZM a 1400°C.

ASME BPVC Sección VIII: Especifica los procesos de fabricación como la soldadura, el tratamiento térmico y las pruebas no destructivas de varillas de molibdeno TZM en recipientes a presión de alta temperatura. La norma exige que el 100% de las pruebas ultrasónicas (UT) y las pruebas de rayos X (RT) sean 100%.

ASME Y14.5 Dimensiones y Tolerancias: Especifica las tolerancias geométricas (por ejemplo, redondez, rectitud) de las varillas de molibdeno TZM para garantizar la precisión de la instalación en equipos de alta temperatura.

8.4 Otras normas internacionales y de la industria

Además de las normas chinas y estadounidenses, las normas de Japón (JIS), Alemania (DIN) y Rusia (GOST) también proporcionan especificaciones para la producción y aplicación de varillas de molibdeno TZM. A continuación se presenta un análisis detallado desde tres aspectos.

8.4.1 Norma de ensayo JIS G 0571 para materiales de molibdeno

JIS G 0571:2012 es una norma industrial japonesa que especifica métodos para probar la composición química y las propiedades del molibdeno y las aleaciones de molibdeno (incluido el TZM):

Composición química: Mo \geq 99.38%, Ti: 0.4-0.55%, Zr: 0.06-0.12%, impurezas (como O, N) \leq 0.005% de varilla de molibdeno TZM.

Prueba de propiedades mecánicas: incluida la tracción a temperatura ambiente (resistencia a la tracción 600-700 MPa), la tracción a alta temperatura (1200 °C, 400-500 MPa) y la prueba de dureza (HV 250-300).

Calidad de la superficie: Se requiere que la rugosidad de la superficie sea $Ra \leq 3.2$ micras, sin grietas ni incrustaciones de óxido. La norma también especifica un método para las pruebas penetrantes de defectos superficiales.

JIS G 0571 es ampliamente utilizado en las industrias de fabricación de semiconductores y hornos de alta temperatura en Japón. Por ejemplo, la empresa japonesa Toshiba Corporation utiliza JIS G 0571 para probar varillas de molibdeno TZM para su uso en dispositivos de implantación de iones.

8.4.2 Norma DIN EN 10228 para ensayos no destructivos

La serie de normas DIN EN 10228, incluida la DIN EN 10228-3:2016, especifica métodos de ensayo no destructivos para varillas de molibdeno TZM, centrándose en los ensayos ultrasónicos (UT):

Copyright and Legal Liability Statement

Pruebas ultrasónicas: utiliza una sonda de 5-10 MHz para detectar grietas, poros e inclusiones dentro de las varillas de molibdeno TZM. Con una sensibilidad de detección de hasta 0,1 mm, es adecuado para componentes de la industria aeroespacial y nuclear.

Criterios de aceptación: tamaño del defecto interno $\leq 0,1$ mm, longitud de la grieta superficial $\leq 0,05$ mm. La norma exige la inspección del 100% de los componentes de alta fiabilidad (por ejemplo, las barras de control de los reactores nucleares).

Equipo de prueba: Se requiere el uso de detectores ultrasónicos de alta precisión (como Krautkramer, Alemania) para garantizar la repetibilidad de los resultados de la prueba.

8.4.3 Estándar de aleación de molibdeno GOST 17431

GOST 17431-72 es un estándar ruso para aleaciones de molibdeno, que es adecuado para la producción y prueba de varillas de molibdeno TZM:

Composición química: Mo $\geq 99.38\%$, Ti: 0.4-0.55%, Zr: 0.06-0.12%, C: 0.01-0.04%, Impurezas $\leq 0.01\%$.

Propiedades mecánicas: resistencia a la tracción 600-700 MPa a temperatura ambiente, resistencia a la tracción 400-500 MPa a 1200 °C, vida útil ≥ 5000 horas (1400 °C, 20 MPa).

Requisitos de procesamiento: Se requiere que se prepare por sinterización al vacío o sinterización en atmósfera, con una densidad de $\geq 98\%$ de densidad teórica y una rugosidad superficial de Ra $\leq 0,8$ micras.

GOST 17431 es ampliamente utilizado en la industria nuclear rusa y los sectores aeroespaciales, por ejemplo, la empresa rusa Rosatom utiliza este estándar para producir barras de molibdeno TZM para reactores nucleares.

8.5 Implementación y certificación de normas

La implementación y certificación de normas es una parte clave para garantizar la calidad y competitividad de las varillas de molibdeno TZM en el mercado internacional, lo que implica pruebas de producción, sistema de gestión de calidad y cumplimiento de exportaciones. A continuación se presenta un análisis detallado desde tres aspectos.

8.5.1 Aplicaciones estándar en producción y pruebas

La producción y las pruebas de las varillas de molibdeno TZM deben seguir estrictamente los estándares nacionales, internacionales y de la industria mencionados anteriormente. Las implementaciones específicas incluyen:

Control de materias primas: De acuerdo con GB/T 4194 y ASTM B387, la composición del polvo de molibdeno, el polvo de titanio y el polvo de circonio se analizó utilizando ICP-OES y XRF para garantizar que el contenido de impurezas fuera $\leq 0.01\%$.

Control de procesos: procesos de sinterización, forja y mecanizado según GB/T 15067 y ASME BPVC Sección VIII. Por ejemplo, los hornos de sinterización al vacío deben mantener un nivel de vacío de 10^{-3} - 10^{-5} Pa y una uniformidad de temperatura de $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Prueba de rendimiento: Pruebe la resistencia a la tracción, las propiedades de fluencia y la

Copyright and Legal Liability Statement

dureza de las varillas de molibdeno TZM de acuerdo con ISO 6892, GB/T 4338 y ASTM E384. Por ejemplo, se realiza una prueba de tracción a alta temperatura a 1200 °C con una resistencia a la tracción de ≥ 400 MPa.

Ensayos no destructivos: inspección al 100% de las varillas de molibdeno TZM para la industria aeroespacial y nuclear según las normas ISO 3452 y DIN EN 10228 mediante ensayos de penetrantes y ultrasonidos para garantizar que no haya grietas ni poros.

8.5.2 Certificación del sistema de gestión de la calidad (e.g. ISO 9001)

ISO 9001:2015 es una norma de sistema de gestión de calidad aceptada a nivel mundial que guía el control de calidad y la mejora continua en los fabricantes de varillas de molibdeno TZM. Los requisitos específicos incluyen:

Gestión de procesos: Se requiere registrar y rastrear todo el proceso de adquisición de materias primas, proceso de producción, pruebas y empaque de varillas de molibdeno TZM. Por ejemplo, es necesario establecer un sistema de gestión de lotes para garantizar que cada lote de varillas de molibdeno TZM pueda rastrearse hasta la materia prima.

Satisfacción del cliente: Se requiere una mejora continua del rendimiento y la eficiencia de producción de la varilla de molibdeno TZM a través de los comentarios del cliente y la auditoría de calidad. Por ejemplo, los clientes aeroespaciales requieren varillas de molibdeno TZM con tolerancias dimensionales de $\leq \pm 0,01$ mm.

Mejora continua: Reducir los rechazos y los costes de producción mediante el análisis de datos y la optimización de procesos. Por ejemplo, Plansee cuenta con la certificación ISO 9001, lo que reduce el costo de producción de las varillas de molibdeno TZM en un 15%.

Además, los fabricantes de varillas de molibdeno TZM en el sector aeroespacial deben contar con la certificación AS9100 para garantizar que cumplan con los requisitos especiales de la industria aeroespacial, como las pruebas no destructivas al 100% y la transparencia de la cadena de suministro.

8.5.3 Exportación y cumplimiento de normas internacionales

La exportación de varillas de molibdeno TZM está sujeta a las normas y reglamentos del mercado objetivo, lo que implica la armonización y certificación de normas multinacionales. Los requisitos específicos incluyen:

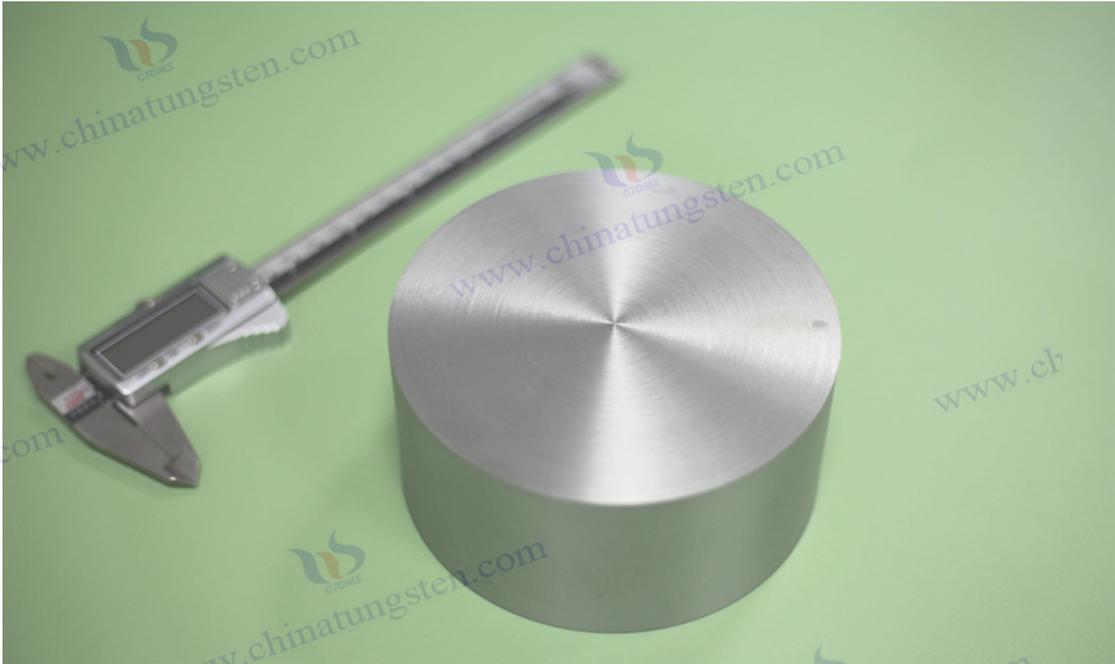
Armonización de las normas: las varillas de molibdeno TZM deben cumplir con las normas ASTM B387 y ASME para la exportación a los Estados Unidos, DIN EN 10228 e ISO 14001 para la exportación a Europa, y JIS G 0571 para la exportación a Japón.

Requisitos de certificación: Los productos de exportación deben obtener una certificación para el mercado objetivo, como la certificación CE en la Unión Europea, la certificación UL en los Estados Unidos o la certificación GOST-R en Rusia. El proceso de certificación incluye pruebas de materiales, auditorías de procesos y comprobaciones de cumplimiento medioambiental.

Gestión de cumplimiento: Es necesario establecer un sistema de gestión de cumplimiento y aceptar auditorías de terceros de forma regular. Por ejemplo, SGS y TÜV son organismos de certificación comunes para la exportación de varillas de molibdeno TZM, lo que garantiza que los

Copyright and Legal Liability Statement

productos cumplan con las normativas internacionales (por ejemplo, RoHS, REACH).



CTIA GROUP LTD TZM Varilla de molibdeno

Apéndice

A. Glosario

1. Términos relacionados

Aleación TZM

Definición: Una superaleación con molibdeno (Mo) como matriz, añadiendo titanio (Ti, 0,4-0,55%), circonio (Zr, 0,06-0,12%) y carbono (C, 0,01-0,04%), con excelente resistencia a altas temperaturas, resistencia a la fluencia y bajo coeficiente de expansión térmica.

Aleación a base de molibdeno

Definición: Una aleación con molibdeno como componente principal y otros elementos (como titanio, circonio, renio) añadidos para mejorar las propiedades. El TZM es un representante típico de las aleaciones a base de molibdeno.

Aleación de alta temperatura

Definición: Materiales metálicos que pueden soportar el estrés mecánico y la corrosión química durante mucho tiempo en un entorno de alta temperatura superior a 600 °C, incluidas las aleaciones a base de níquel, las aleaciones a base de tungsteno y las aleaciones a base de molibdeno.

Recubrimiento antioxidante

Definición: Una capa protectora (por ejemplo, siliciuro de molibdeno, Al_2O_3) aplicada a la superficie de la varilla de molibdeno TZM para reducir la oxidación a alta temperatura y la pérdida de material.

Coefficiente de Dilatación Térmica (CTE)

Copyright and Legal Liability Statement

Definición: La tasa de expansión por unidad de longitud del material bajo cambio de temperatura, el coeficiente de expansión térmica de la varilla de molibdeno TZM es $5.3 \times 10^{-6} / K$.

Resistencia a la fluencia

Definición: La capacidad de un material para resistir una deformación lenta a altas temperaturas y bajo tensión constante. La tasa de fluencia de la varilla de molibdeno TZM a 1400 °C es aproximadamente 1/10 de la del molibdeno puro.

Resistencia a la fractura

Definición: La capacidad del material para resistir la propagación de grietas, la tenacidad a la fractura de la varilla de molibdeno TZM es de $15-20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, que es mayor que la del molibdeno puro $10-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

2. Terminología de preparación y tratamiento

Pulvimetalurgia

Definición: Un método para preparar materiales metálicos mediante la mezcla de polvos metálicos, el moldeo por prensado y la sinterización a alta temperatura. La varilla de molibdeno TZM generalmente está hecha de un proceso de pulvimetalurgia y la temperatura de sinterización es de 1800-2000 °C.

Sinterización al vacío

Definición: El proceso de calentar una pieza en bruto de polvo metálico en el vacío ($10^{-3}-10^{-5} \text{ Pa}$) para combinarla en un material denso. La sinterización al vacío de varillas de molibdeno TZM puede aumentar la densidad a más del 98% de la densidad teórica.

Prensado isostático en caliente

Definición: Compresión isotrópica de materiales a altas temperaturas (1800-2000°C) y altas presiones (100-200 MPa) para eliminar la porosidad interna y los defectos.

Prensado isostático en frío

Definición: La presión isotrópica se aplica a un polvo por un medio líquido a temperatura ambiente para formar una palanquilla de alta densidad. La presión CIP de la varilla de molibdeno TZM suele ser de 200-300 MPa.

Forja de precisión

Definición: Deformación plástica de la varilla de molibdeno TZM mediante equipos de forja multieje a alta temperatura (1200-1400 °C) para mejorar la densidad y las propiedades mecánicas.

Mecanizado

Definición: Mecanizado de formas de varillas de molibdeno TZM mediante torneado, fresado, taladrado y otros procesos con tolerancias de hasta $\pm 0,01 \text{ mm}$.

Pulido de superficies

Copyright and Legal Liability Statement

Definición: Reducción de la rugosidad superficial de la varilla de molibdeno TZM ($Ra \leq 0,05$ micras) mediante métodos mecánicos, químicos o electroquímicos para reducir los puntos de inicio de grietas.

Ensayos no destructivos

Definición: Inspección de defectos internos y superficiales de varillas de molibdeno TZM mediante métodos de ensayo ultrasónicos, de rayos X o penetrantes con una sensibilidad de hasta 0,05 mm.

Conformado casi en forma de red

Definición: Optimización de los procesos de preparación (por ejemplo, SLM o HIP) para formar directamente piezas cercanas a la forma final, reduciendo el post-procesamiento.

3. Terminología de aplicación a alta temperatura

Resistencia a altas temperaturas

Definición: La capacidad de un material para resistir la deformación por tracción, compresión o cizallamiento a altas temperaturas (>1000 °C). La resistencia a la tracción de la varilla de molibdeno TZM a 1200 °C es de 400-500 MPa.

Resistencia al choque térmico

Definición: La capacidad de un material para resistir grietas o fracturas bajo cambios rápidos de temperatura. La varilla de molibdeno TZM tiene una excelente resistencia al choque térmico debido a su bajo coeficiente de expansión térmica (5.3×10^{-6} / K).

Conductividad térmica

Definición: La capacidad del material para conducir el calor, la conductividad térmica de la varilla de molibdeno TZM es de 139 W / m · K, que solo disminuye en un 10-15% a 1200 °C.

Resistencia a la oxidación

Definición: La capacidad de un material para resistir la formación y pérdida de óxido en un ambiente oxidante a alta temperatura. Las varillas de molibdeno TZM formaron una capa protectora de MoO_2 a 1000 °C, y la tasa de ganancia de peso oxidativa fue de $< 0,1$ mg/cm²·h.

Erosión por plasma

Definición: Fenómeno de pérdida de superficie de un material bajo bombardeo con plasma de alta energía. Las varillas de molibdeno TZM pueden soportar impactos de plasma de 10^6 , que es mejor que el molibdeno puro.

Sistema de protección térmica

Definición: Sistema utilizado para proteger una nave espacial de daños térmicos a altas temperaturas, como la reentrada. Las varillas de molibdeno TZM se utilizan en la fabricación de escudos térmicos y escudos térmicos.

Fatiga a alta temperatura

Copyright and Legal Liability Statement

Definición: La capacidad de un material para resistir el inicio y la propagación de grietas bajo tensión cíclica a alta temperatura. La vida útil a la fatiga de la varilla de molibdeno TZM a 1200 °C es de 10^5 ciclos.

Estabilidad del ciclo térmico

Definición: La capacidad de un material para mantener sus propiedades y estructura durante el calentamiento y enfriamiento repetidos. Las varillas de molibdeno TZM pueden soportar 1000 ciclos térmicos (temperatura ambiente -1600 °C).

4. Ciencia de los materiales y terminología metalúrgica

Fortalecimiento de soluciones sólidas

Definición: Al disolver átomos de titanio y circonio en la matriz de molibdeno, la distorsión de la red se produce para mejorar la resistencia y la dureza del material.

Fortalecimiento de la precipitación

Definición: Al formar partículas de carburo (por ejemplo, TiC, ZrC) en la matriz de molibdeno, se dificulta el movimiento de dislocación y se mejora la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la fluencia.

Tamaño de grano

Definición: El tamaño promedio de los cristales en el material, el tamaño de grano de las varillas de molibdeno TZM suele ser de 10 a 30 micras, lo que afecta la resistencia y la tenacidad.

Temperatura de recristalización

Definición: La temperatura a la que los granos de un material se reorganizan para formar nuevos granos a altas temperaturas. La temperatura de recristalización de la varilla de molibdeno TZM es de 1400-1500 °C, que es más alta que la del molibdeno puro a 1100 °C.

Dislocación

Definición: Un defecto lineal dentro de un cristal que afecta la deformación plástica y la resistencia de un material. Las varillas de molibdeno TZM están fijadas a las dislocaciones por partículas de carburo para mejorar la resistencia a la fluencia.

Límites de grano

Definición: La interfaz entre granos que afecta la resistencia, tenacidad y propiedades de corrosión de un material. Los límites de grano de las varillas de molibdeno TZM están reforzados con circonio para reducir el deslizamiento a alta temperatura.

Microscopio electrónico de barrido

Definición: Un microscopio para observar la topografía de la superficie y las características de fractura de las varillas de molibdeno TZM con una resolución de hasta 1 nanómetro.

Microscopio electrónico de transmisión

Copyright and Legal Liability Statement

Definición: Microscopio para observar la microestructura interna (por ejemplo, dislocaciones, partículas de carburo) de varillas de molibdeno TZM con una resolución de hasta 0,1 nm.

Difracción de rayos X

Definición: Análisis de rayos X de la estructura cristalina, la composición de fases y el estado de tensión de las varillas de molibdeno TZM.

Análisis de elementos finitos

Definición: Prediga la distribución de la tensión y el riesgo de falla mediante la simulación por computadora del rendimiento de la varilla de molibdeno TZM a alta temperatura y alta tensión.

B. Referencias

- [1] Chinatungsten Online, "Proceso de producción y tecnología de aleación de molibdeno TZM", www.chinatungsten.com
- [2] Chinatungsten Online, Tecnología de purificación y aleación de polvo de molibdeno, www.ctia.com.cn
- [3] Chinatungsten Online, cuenta oficial de WeChat, "Optimización del proceso de producción de varillas de molibdeno TZM", 2023
- [4] 《Pulvimetalurgia: Ciencia, Tecnología y Aplicaciones》, C. Suryanarayana
- [5] 《Avances en el procesamiento de metales refractarios》, Revista de tecnología de procesamiento de materiales
- [6] 《Sinterización al vacío de aleaciones TZM》, Revista Internacional de Metales Refractarios y Materiales Duros
- [7] Chinatungsten Online, "Tecnología de producción automatizada de varilla de molibdeno TZM", news.chinatungsten.com
- [8] 《Ingeniería de superficies de metales refractarios》, Tecnología de superficies y recubrimientos
- [9] Chinatungsten Online, "Equipo de producción y control de calidad de varillas de molibdeno TZM", baike.ctia.com.cn
- [10] 《Ciencia e ingeniería de materiales: una introducción》, William D. Callister Jr.
- [11] 《Avances en metales refractarios y aleaciones》, Revista de Ciencia de los Materiales
- [12] 《Metalurgia en polvo de aleaciones TZM》, Revista Internacional de Metales Refractarios y Materiales Duros
- [13] 《Aleación TZM en aplicaciones de alta temperatura》, Materiales y diseño
- [14] 《Metalurgia en polvo de aleaciones TZM》, Revista Internacional de Metales Refractarios y Materiales Duros

Copyright and Legal Liability Statement