

Enciclopedia de varillas de aleación de tungsteno

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

INTRODUCCIÓN A CTIA GROUP

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

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Tabla de contenido

Prefacio

- Antecedentes de la escritura y significado práctico
- La posición estratégica y el valor fundamental de las varillas de aleación de tungsteno
- Cómo utilizar este libro
- Público objetivo y propósito de referencia

Capítulo 1: Conceptos básicos y clasificación de las varillas de aleación de tungsteno

- 1.1 Definición y forma básica de las varillas de aleación de tungsteno
- 1.2 Introducción al sistema de aleación de tungsteno de alta gravedad específica (W-Ni-Fe / W-Ni-Cu)
- 1.3 Tamaños, formas y condiciones de superficie comunes de las varillas de aleación de tungsteno
- 1.4 Clasificación de las varillas de aleación de tungsteno (por composición, aplicación y método de procesamiento)
- 1.5 Comparación de las varillas de aleación de tungsteno con varillas de cobre-tungsteno, varillas de tungsteno puro y otros materiales

Capítulo 2: Propiedades físicas y mecánicas de las varillas de aleación de tungsteno

- 2.1 Control de densidad, gravedad específica y precisión dimensional
- 2.2 Resistencia a la tracción, límite elástico y alargamiento
- 2.3 Dureza y resistencia al impacto
- 2.4 Conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica y rendimiento a alta temperatura
- 2.5 Propiedades eléctricas, respuesta magnética y resistencia a la radiación
- 2.6 Análisis de resistencia a la corrosión y estabilidad química

Capítulo 3: Tecnología de preparación y conformación de varillas de aleación de tungsteno

- 3.1 Preparación de la materia prima y propiedades del polvo
- 3.2 Proceso de prensado en pulvimetalurgia (moldeo, prensado isostático)
- 3.3 Tecnología de sinterización y control de atmósfera
- 3.4 Optimización del proceso de tratamiento térmico y densificación
- 3.5 Tecnología de mecanizado y tratamiento de superficies (rectificado, pulido, torneado)
- 3.6 Nuevas tecnologías de preparación: extrusión, laminado y fabricación aditiva

Capítulo 4: Pruebas de rendimiento y evaluación de la calidad de las varillas de aleación de tungsteno

- 4.1 Inspección de apariencia y dimensión geométrica
- 4.2 Métodos de análisis de densidad y microestructura
- 4.3 Normas de prueba de propiedades mecánicas (ASTM, GB, ISO)
- 4.4 Análisis metalográfico y caracterización de la microestructura
- 4.5 Análisis de composición química (ICP, XRF, ONH)
- 4.6 Rugosidad superficial y detección de defectos (inspección visual, tomografía computada)
- 4.7 Tecnología de pruebas no destructivas (ultrasonido, rayos X, polvo magnético)

Capítulo 5: Campos de aplicación típicos de las varillas de aleación de tungsteno

- 5.1 Contrapesos aeroespaciales y componentes inerciales

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2 Varillas de aleación de tungsteno para equipos militares (núcleos perforantes, secciones de cola de misiles)

5.3 Aplicaciones en energía nuclear (varillas de protección contra la radiación, estructuras de absorción de neutrones)

5.4 Varillas estructurales de alta densidad para equipos médicos (dispositivos de radioterapia)

5.5 Varillas de equilibrio dinámico y piezas inerciales giratorias en instrumentos de alta precisión

5.6 Estructuras de soporte y disipación de calor en las industrias de electrónica y comunicaciones

Capítulo 6: Investigación, desarrollo y mejora de varillas de aleación especial de tungsteno

6.1 Varillas de aleación de tungsteno reforzadas con nanopartículas

6.2 Diseño y mejora del rendimiento de varillas de aleación de tungsteno microaleado

6.3 Regulación de la composición de varillas de aleación de tungsteno de alta resistencia y tenacidad

6.4 Estudios de tratamiento térmico de varillas de aleación de tungsteno resistentes a altas temperaturas

6.5 Recubrimiento de superficies y mejora de la resistencia al desgaste de varillas de aleación de tungsteno

6.6 Varillas de aleación de tungsteno funcionales: conductividad eléctrica, conductividad térmica y propiedades antimagnéticas

Capítulo 7: Sistema de cumplimiento para varillas de aleación de tungsteno

7.1 Normas nacionales e industriales chinas (GB/T, YS/T)

7.2 Sistema de normas estadounidense (ASTM, MIL)

7.3 Normas internacionales de la UE e ISO

7.4 Certificaciones de protección ambiental y seguridad de los materiales (RoHS, REACH, MSDS)

7.5 Requisitos del sistema de calidad en las industrias de aviación, militar y médica

Capítulo 8: Embalaje, almacenamiento y transporte de varillas de aleación de tungsteno

8.1 Métodos de embalaje y medidas de protección (embalaje al vacío, desecante)

8.2 Condiciones de almacenamiento y precauciones (control de temperatura y humedad, prevención de la corrosión)

8.3 Reglamento de transporte internacional y directrices de declaración de mercancías peligrosas

8.4 Supervisión aduanera y requisitos de licencia de exportación para varillas de aleación de tungsteno

Capítulo 9: Estructura del mercado y tendencia de desarrollo de las varillas de aleación de tungsteno

9.1 Descripción general de los recursos globales de tungsteno y la cadena industrial de varillas de aleación

9.2 Análisis del tamaño del mercado y tendencias de crecimiento de las varillas de aleación de tungsteno

9.3 Principales fabricantes y panorama competitivo (China, Europa, EE. UU., Japón, Corea del Sur)

9.4 Análisis de las fluctuaciones de los precios de las materias primas y la estructura de costos

9.5 Interpretación de las políticas industriales y la situación de las exportaciones

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.6 Pronóstico de la demanda de varillas de aleación de tungsteno en la futura fabricación de alta gama

Capítulo 10: Puntos de investigación y tecnologías de vanguardia de las varillas de aleación de tungsteno

10.1 Investigación sobre procesos de densificación de varillas de aleación de tungsteno de alta densidad

10.2 Fabricación inteligente y líneas de producción automatizadas

10.3 Integración de varillas de aleación de tungsteno y fabricación aditiva

10.4 Comparación y rutas de desarrollo de alternativas de aleación de alto rendimiento

10.5 Evolución del rendimiento de las aleaciones de tungsteno en condiciones de servicio extremas

Apéndice

Apéndice 1 : Resumen de los parámetros técnicos comunes de las varillas de aleación de tungsteno

Apéndice 2 : Tabla comparativa de grados de aleación de tungsteno y composiciones químicas

Apéndice 3 : Documentos estándar e índice de referencia de varillas de aleación de tungsteno

Apéndice 4 : Glosario de aleaciones de tungsteno y abreviaturas en inglés

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Prefacio

Con el desarrollo de nuevas tecnologías de materiales y el rápido auge de la industria manufacturera de alta gama, los materiales de aleación funcional de alto rendimiento se han convertido en una base fundamental para el progreso de la industria aeroespacial, la fabricación de precisión, los equipos de defensa nacional, los sistemas energéticos y los equipos médicos. El tungsteno, uno de los metales con el punto de fusión más alto de la tabla periódica, posee alta densidad, alta dureza, alto punto de fusión y excelente resistencia a la radiación, lo que le confiere ventajas únicas en entornos extremos. Entre los numerosos materiales a base de tungsteno, las varillas de aleación pesada de tungsteno se han convertido gradualmente en un componente clave del sistema estratégico de materiales funcionales gracias a sus propiedades físicas únicas, estabilidad de conformado y amplia adaptabilidad.

Las varillas de aleación de tungsteno suelen estar hechas de tungsteno (W) como elemento principal y se forman añadiendo níquel (Ni), hierro (Fe), cobre (Cu) y otros metales para formar aleaciones de tungsteno de alta densidad (aleación de tungsteno de alta densidad), que se preparan mediante pulvimetalurgia. Su densidad puede alcanzar entre 17,0 y 18,8 g/cm³, muy superior a la de metales comunes como el acero, el cobre y el aluminio. Es un material de ingeniería con alta resistencia, buena maquinabilidad y excelente estabilidad de servicio. Debido a la creciente demanda de estructuras compactas, precisión en el control de la energía y una larga vida útil de los equipos, el diseño y la aplicación de las varillas de aleación de tungsteno están en constante evolución hacia la alta densidad, uniformidad y pureza.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las varillas de aleación de tungsteno no solo se utilizan en contrapesos tradicionales, como el equilibrio de aeronaves, el ajuste de actitud aeroespacial y los módulos inerciales de a bordo, sino que también se emplean ampliamente en protección antibalas, protección radiológica, componentes de energía nuclear, armas cinéticas, módulos de radioterapia para equipos médicos, dispositivos de blindaje contra rayos X, rotores inerciales de giroscopios, estructuras anódicas para dispositivos de vacío eléctricos, componentes de control térmico para encapsulados electrónicos y otros campos tecnológicos estratégicos. Especialmente en municiones guiadas de precisión, proyectiles perforantes de blindaje a hipervelocidad, experimentos de física de altas energías y proyectos de exploración del espacio profundo, las varillas de aleación de tungsteno se han convertido en materiales irremplazables para componentes de alto rendimiento gracias a su estabilidad estructural y precisión de respuesta inercial.

Actualmente, los recursos mundiales de tungsteno están extremadamente concentrados. China, Rusia, Kazajistán, Portugal y otros países poseen los principales recursos minerales. Entre ellos, China ocupa el primer lugar a nivel mundial en términos de reservas probadas, producción de concentrados y capacidad de procesamiento a gran escala de mineral de tungsteno. Esto proporciona una sólida base de garantía de materia prima para el diseño, desarrollo e innovación de procesos de productos de varillas de aleación de tungsteno en China. Al mismo tiempo, con la rápida modernización de la industria de fabricación de equipos de gama media y alta, las varillas de aleación de tungsteno nacionales han reemplazado gradualmente a los productos importados, han logrado avances tecnológicos en campos clave como la aeroespacial, la ingeniería nuclear médica y las contramedidas electrónicas, y han desarrollado capacidades de suministro a gran escala.

Sin embargo, a pesar de la creciente madurez del sistema tecnológico de varillas de aleación de tungsteno, aún enfrenta varios desafíos, incluyendo: cómo mejorar aún más la densidad de sinterización y la uniformidad organizativa, cómo desarrollar una tecnología de preparación de varillas con formas especiales adecuada para requisitos estructurales complejos, cómo equilibrar la proporción de materiales de alta resistencia y maquinabilidad, y cómo reducir el consumo energético de fabricación y mejorar la tasa de reciclaje. Para resolver estos problemas, en los últimos años han surgido nuevas vías de proceso y métodos de fabricación avanzados, como la densificación por sinterización en fase líquida, la optimización de elementos de microaleación, la tecnología de prensado isostático en caliente (HIP), el diseño de simulación multiescala, la impresión 3D de piezas estructurales de aleación de tungsteno, etc., que han revitalizado el desarrollo de alta gama, funcional e inteligente de las varillas de aleación de tungsteno.

Este libro, "Enciclopedia de Varillas de Aleación de Tungsteno", se compiló en este contexto. El libro analiza sistemáticamente la base del material, el proceso de preparación, la evaluación del rendimiento, el sistema estándar, la expansión de aplicaciones y las tendencias futuras de las varillas de aleación de tungsteno, con el objetivo de proporcionar una referencia profesional detallada y práctica para ingenieros, investigadores, profesores y estudiantes universitarios, así como para el personal de compras estratégicas que se dedica a la investigación y el desarrollo de materiales de aleación de tungsteno, el diseño de productos, la optimización de procesos y la aplicación industrial.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Para la redacción de este libro, nos hemos basado en la bibliografía nacional e internacional, casos de aplicación empresarial, normas nacionales e industriales, y, en combinación con la experiencia práctica de CTIA GROUP LTD y sus socios en el campo de las aleaciones de tungsteno durante muchos años, nos hemos esforzado por lograr un contenido fiable, una estructura sistemática, un lenguaje accesible y textos e imágenes de gran calidad. El libro se divide en diez capítulos y varios apéndices que abarcan los conceptos básicos de las varillas de aleación de tungsteno, sus propiedades físicas y mecánicas, la pulvimetalurgia y la tecnología de conformado, los métodos de ensayo y control de calidad, los campos de aplicación típicos, el sistema de normas internacionales, las especificaciones de embalaje y transporte, el análisis de patrones de mercado y las tendencias tecnológicas de vanguardia. Además, incluye índices terminológicos y mapas de referencia para su consulta y aplicación en ingeniería.

Esperamos que este libro no solo sea un manual de referencia sobre tecnología de materiales, sino también un puente entre la aplicación de ingeniería y la investigación y el desarrollo científicos de varillas de aleación de tungsteno. Tanto si es investigador universitario, ingeniero en una empresa de productos de tungsteno como responsable de la toma de decisiones en diseño industrial, encontrará inspiración teórica, ejemplos prácticos y orientación práctica en él.

Debido a la amplia gama de contenido y la gran cantidad de información, es inevitable que el libro contenga deficiencias y omisiones. Pido sinceramente a los lectores que me critiquen y corrijan.

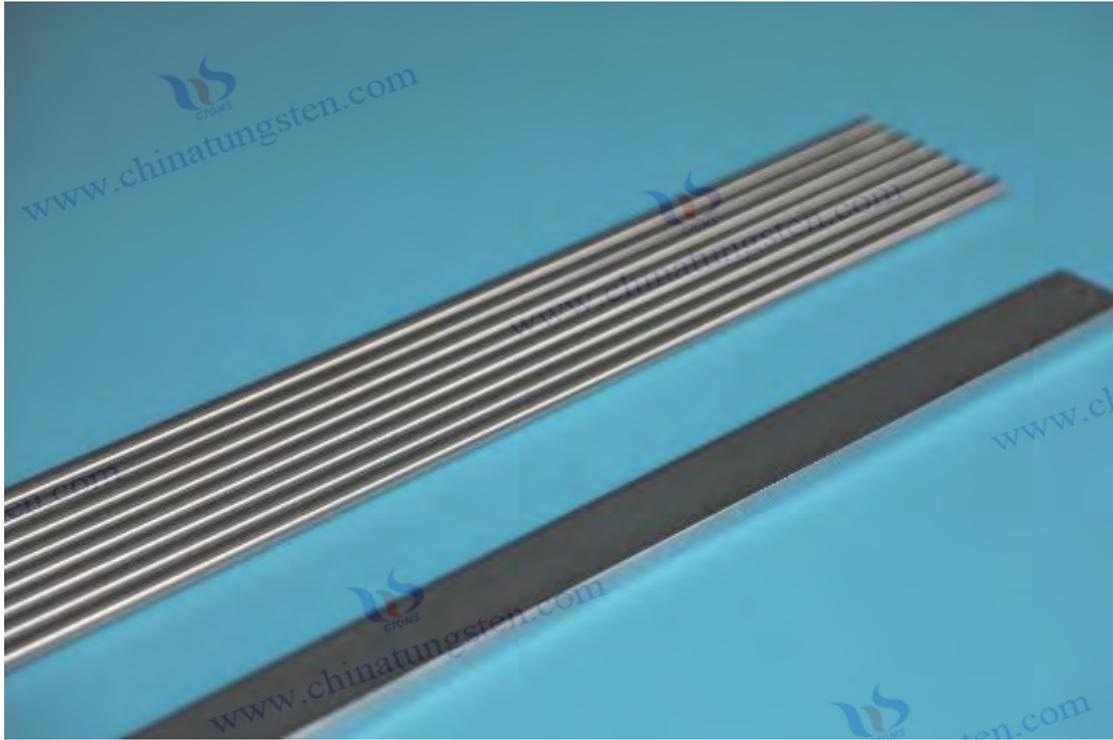
GRUPO CTIA LTD.

Julio de 2025

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Capítulo 1 Conceptos básicos y clasificación de las varillas de aleación de tungsteno

1.1 Definición y forma básica de la varilla de aleación de tungsteno

Las varillas de aleación de tungsteno generalmente se refieren a tiras largas de materiales metálicos hechas por pulvimetalurgia con tungsteno (W) como componente principal y una cierta proporción de metales de enlace como níquel (Ni), hierro (Fe), cobre (Cu), etc. Este tipo de varilla tiene una densidad extremadamente alta (generalmente entre 17,0-18,8 g/cm³), excelentes propiedades mecánicas (la resistencia a la tracción puede alcanzar los 700-1200 MPa), buena resistencia al calor y a la corrosión, y se usa ampliamente en la industria aeroespacial, equipos militares, ingeniería de energía nuclear, equipos médicos, electrónica y eléctrica y otros campos de alta gama.

Las varillas de aleación de tungsteno se caracterizan por su buena procesabilidad y estabilidad dimensional, a la vez que mantienen una alta resistencia. En comparación con materiales estructurales tradicionales como el plomo, el acero, el titanio y el cobre, entre otros, las varillas de aleación de tungsteno presentan mayor gravedad específica y durabilidad, y presentan un valor técnico insustituible en contrapesos inerciales, blindajes de protección y accesorios de precisión, entre otros.

En términos de forma básica, las varillas de aleación de tungsteno existen principalmente en los siguientes tipos:

- **Varilla redonda** : La forma más común, adecuada para diversos usos, como componentes de inercia rotativos, rotores giroscópicos, electrodos y contrapesos. Su diámetro varía de 1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm a 100 mm, y su longitud suele estar entre 50 mm y 1500 mm. Se puede cortar o tornearse según las necesidades.

- **Varilla cuadrada/ varilla rectangular** : se utiliza para procesar piezas con requisitos específicos en cuanto a la forma de la sección transversal, comúnmente encontradas en soportes de empaquetado electrónico, contactores eléctricos de alta temperatura , etc.
- **Varilla perfilada** : Varilla con una sección transversal compleja, como una ranura, un orificio o una forma escalonada, obtenida por extrusión, torneado o electromecanizado . Es adecuada para estructuras de conexión especiales o piezas estructurales compuestas multifuncionales.
- **Varilla tipo pasador** : se utiliza principalmente como pequeños contrapesos, componentes de posicionamiento o conductores en dispositivos de microprecisión, equipos médicos y componentes de vacío eléctricos, generalmente con un diámetro de <5 mm.
- **varilla de gran dimensión** : se utiliza para estructuras portantes y componentes de impacto de alta energía, como núcleos de perforación de blindaje supersónicos, módulos de prueba inerciales, etc., enfatizando la alta resistencia, alta uniformidad y densidad.

Además, con el desarrollo de la fabricación personalizada y la integración funcional, algunas varillas de aleación de tungsteno se han compuesto estructuralmente con cerámica, polímeros o recubrimientos funcionales, lo que les da múltiples funciones compuestas, como protección contra el calor, resistencia a la corrosión y blindaje electromagnético.

En cuanto al suministro de productos, las varillas de aleación de tungsteno suelen estar disponibles en tres tipos: varillas pulidas (superficie pulida), varillas de torno (terminadas) y varillas negras (sin procesar). La calidad de la superficie y las tolerancias dimensionales varían según las áreas de aplicación. Algunos productos de precisión requieren valores $R_a < 0,4 \mu\text{m}$ y una precisión dimensional de $\pm 0,01 \text{ mm}$, que se utilizan ampliamente en equipos de alta gama como imágenes médicas, comunicaciones por microondas e instrumentos inerciales.

Con el desarrollo de la ingeniería de materiales y la evolución de la tecnología de procesamiento, las formas de producto de las varillas de aleación de tungsteno también se enriquecen constantemente. Desde las tradicionales varillas sólidas con secciones transversales iguales hasta las varillas estructurales con gradiente funcional, las varillas estructurales co-cocidas multifásicas e incluso las varillas porosas impresas en 3D, se están adaptando gradualmente a nuevos escenarios de aplicación, como entornos de servicio extremos, control estructural inteligente e integración multifuncional, proporcionando soluciones de materiales más flexibles y eficientes para sistemas de fabricación avanzados.

1.2 Introducción al sistema de aleación pesada de tungsteno (W-Ni-Fe/W-Ni-Cu)

La aleación pesada de tungsteno (THA) es un tipo de pseudoaleación o sistema compuesto metálico basado en tungsteno (W) y formado mediante la adición de una cierta proporción de metales de enlace (como níquel-Ni, hierro-Fe, cobre-Cu, etc.). Sus características típicas son alta densidad, alta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistencia, buen rendimiento de procesamiento mecánico y estabilidad térmica a temperatura ambiente, así como bajo coeficiente de expansión térmica y buena resistencia a la corrosión. La aleación pesada de tungsteno se utiliza ampliamente en campos de alta tecnología, como componentes de contrapeso de alto rendimiento, componentes de protección radiológica, componentes militares antiblindaje, componentes inerciales, etc. Es uno de los materiales estructurales clave e irremplazables en la fabricación actual de equipos de alta gama.

Entre todos los sistemas de aleaciones de tungsteno de alta densidad, los dos más representativos y con mayor madurez industrial son:

- **Sistema de aleación de tungsteno-níquel-hierro (W-Ni-Fe)**
- **Sistema de aleación de tungsteno-níquel-cobre (W-Ni-Cu)**

La estructura básica de estos dos sistemas es una "estructura de dos fases", es decir, las partículas de tungsteno con una fracción de volumen de más del 90% son la fase principal y están estrechamente conectadas por una fase de enlace continua (matriz) compuesta de níquel y hierro o cobre, formando así una estructura de aleación con alta densidad y alta uniformidad.

Aleación de tungsteno W-Ni-Fe: tipo principal industrial de alta resistencia

El sistema W-Ni-Fe es el tipo de aleación de tungsteno con mayor rendimiento y aplicación. Su composición típica es:

- **Tungsteno (W)** : 90–97 % en peso
- **Níquel (Ni)** : 3–7 % en peso
- **Hierro (Fe)** : 1–3 % en peso
- **Rango de densidad** : 17,0–18,5 g/cm³

La aleación presenta una resistencia a la tracción extremadamente alta (generalmente de hasta 900-1200 MPa), buena ductilidad a la fractura (elongación puede alcanzar entre el 10 y el 30 %) y, gracias al contenido de hierro, sus propiedades magnéticas son ajustables. Es ideal para aplicaciones que requieren propiedades mecánicas excepcionales, como componentes inerciales, contrapesos sísmicos y piezas estructurales resistentes a cargas dinámicas.

ventaja :

- Alta resistencia y buena resistencia al desgaste.
- Tratable térmicamente
- Aplicable a piezas estructurales militares y dispositivos inerciales aeroespaciales.

deficiencia :

- El contenido de Fe lo hace magnético, lo que no es adecuado para pesar algunos dispositivos electrónicos.
- La resistencia a la corrosión es ligeramente inferior a la del sistema Ni-Cu.

Aleación de tungsteno W-Ni-Cu: bajas propiedades magnéticas y alta conductividad

La aleación W-Ni-Cu sustituye el hierro por cobre para formar una fase de enlace no magnética o poco magnética. Su composición típica es:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Tungsteno (W)** : 90–95 % en peso
- **Níquel (Ni)** : 2–5 % en peso
- **Cobre (Cu)** : 2–4 % en peso
- **Rango de densidad** : 17,0–18,0 g/cm³

Este tipo de aleación de tungsteno tiene una resistencia a la tracción ligeramente menor (alrededor de 700-900 MPa), pero tiene mejor conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión, y su permeabilidad magnética es cercana a 1. Es un material estructural no magnético típico y se usa ampliamente en electrónica, vacío, equipos de diagnóstico médico y otros equipos que tienen requisitos extremadamente altos para el control de interferencia electromagnética.

ventaja :

- No magnético o débilmente magnético, adecuado para instrumentos de precisión.
- La conductividad térmica y eléctrica son mejores que las del sistema W-Ni-Fe.
- Fuerte resistencia a la corrosión del agua de mar, adecuado para los campos marinos y médicos.

deficiencia :

- La resistencia a la tracción y la tenacidad son ligeramente bajas, no adecuadas para estructuras con carga dinámica elevada.
- Un poco más caro y un poco más difícil de fabricar.

Otros sistemas de aleación de tungsteno en desarrollo

En los últimos años se han desarrollado sistemas de aleación de tungsteno en dirección a la funcionalización y alta gama , tales como:

- **Sistema W-Ni-Co** : se utiliza para solucionar problemas magnéticos que contienen hierro y mejorar la resistencia al calor.
- **Sistema W-Cu** : adecuado para dispositivos con alto flujo de calor, como módulos de refrigeración microelectrónica.
- **Varilla compuesta estructural de polímero W** : una estructura compuesta de polímero de tungsteno desarrollada para resolver la contradicción entre peso y procesabilidad.
- **de aleación de nano-tungsteno : introducción de polvo de nano -tungsteno** o partículas de compuestos intermetálicos (como TiC , LaB₆) para mejorar la densidad del material y la resistencia y tenacidad

Características de la estructura organizacional y puntos de control del desempeño

Las aleaciones de tungsteno de alta densidad presentan una estructura compuesta de dos fases: partículas de tungsteno y fase aglutinante. La fracción volumétrica de partículas de tungsteno supera el 85 %, lo que desempeña la función principal de soporte de carga. La fase aglutinante de Ni-Fe o Ni-Cu determina la ductilidad y la procesabilidad generales. Su uniformidad organizativa, la distribución del tamaño de las partículas de tungsteno y la continuidad de la fase aglutinante determinan las propiedades mecánicas finales y la vida útil de la varilla.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Distribución de partículas de tungsteno** : El tamaño de partícula suele estar entre 10 y 50 μm . Cuanto menor sea el tamaño de partícula, mejor será la unión de la interfaz y mayores serán las propiedades mecánicas.
- **Densidad de sinterización** : controlar la porosidad $<0,5\%$ ayuda a mejorar la resistencia y la conductividad térmica;
- **Relación de aglutinante** : demasiado baja provocará una alta fragilidad y dificultad en el procesamiento; demasiado alta provocará una densidad reducida y una resistencia insuficiente, generalmente controlada entre 3 y 10 % en peso ;
- **Uniformidad de la composición** : evita la segregación o aglomeración de elementos y mejora la consistencia del producto;
- **Control de microestructura** : La sinterización en fase líquida y el tratamiento térmico pueden lograr un refinamiento del grano y una estructura uniforme, mejorando así la resistencia a la fatiga.

Conclusión

Las varillas de aleación de tungsteno, así como los sistemas W-Ni-Fe y W-Ni-Cu, se utilizan en dos aplicaciones principales: **estructuras de alta resistencia y electrónica de bajo magnetismo. Su flexibilidad en el control de la composición, la regulación de la organización y la adaptación del rendimiento garantizan su irremplazabilidad en los sectores aeroespacial, de defensa nacional, de electrónica de precisión, de ingeniería nuclear médica y otros. Con el progreso tecnológico, los límites de rendimiento y la profundidad de aplicación de las varillas de aleación de tungsteno en la fabricación de alta gama se ampliarán en el futuro mediante la microaleación, el nanorreforzamiento y los compuestos funcionales.**

1.3 Tamaños, formas y condiciones de superficie comunes de las varillas de aleación de tungsteno

Como material estructural de alto rendimiento, las varillas de aleación de tungsteno presentan diversos tamaños, formas y condiciones superficiales en diferentes industrias y entornos de uso. Su geometría y características superficiales no solo influyen en la precisión del ensamblaje y la vida útil, sino que también afectan directamente la eficiencia del procesamiento, la estabilidad estructural y la fiabilidad del servicio. Por lo tanto, un profundo conocimiento de las formas estandarizadas y personalizadas de las varillas de aleación de tungsteno es fundamental para el diseño de productos y la selección de materiales de ingeniería.

1. Dimensiones

Las varillas de aleación de tungsteno suelen dividirse en dos categorías: estandarizadas y personalizadas según sus usos. Las especificaciones comunes incluyen diámetro (o longitud lateral), longitud, redondez, rectitud y tolerancia dimensional.

- **Rango de diámetro** : 1 mm a 200 mm, las especificaciones más utilizadas son de 3 mm a 100 mm;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Rango de longitud** : 10 mm ~ 2000 mm, las barras procesadas convencionalmente se controlan principalmente a 50 mm ~ 1000 mm;
- **Tolerancia de longitud** : generalmente $\pm 0,5$ mm, el mecanizado de precisión puede alcanzar $\pm 0,1$ mm;
- **Error de rectitud** : los productos de grado industrial se controlan dentro de 0,5 mm/m y los productos de grado de precisión pueden alcanzar 0,1 mm/m;
- **Control de coaxialidad y verticalidad** : Las varillas de aleación de tungsteno utilizadas para piezas dinámicas requieren una mayor consistencia geométrica, generalmente controlada dentro del rango de $\pm 0,02$ mm.

Para las barras utilizadas en campos específicos (como armas balísticas, giroscopios de alta velocidad y sistemas ópticos de precisión), también es necesario considerar el control de la expansión térmica y la consistencia de las dimensiones de entrega. El control de calidad suele combinarse con modelado CAD y sistemas de detección tridimensional.

2. Clasificación de formas.

El diseño de la forma y la estructura de las varillas de aleación de tungsteno debe cumplir con los requisitos de integración de diferentes componentes mecánicos, unidades de control térmico, conexiones eléctricas o elementos inerciales. Las formas principales se pueden resumir de la siguiente manera:

1. **Varilla redonda sólida** : la estructura más común, adecuada para la mayoría de contrapesos industriales, electrodos y componentes inerciales.
2. **Varilla hueca** : tiene la función de reducción de peso o refrigeración líquida y se utiliza a menudo en los campos médico y aeroespacial.
3. **Varilla cuadrada / rectangular** : adecuada para estructuras de marcos, bases de contactos eléctricos, etc.
4. **Varilla perfilada** : con diseños especiales como ranuras, agujeros, huecos, chaflanes, etc., se utiliza principalmente para piezas de ensamblaje personalizadas y estructuras integradas complejas.
5. **Microvarilla** : El diámetro es inferior a 2 mm y se utiliza principalmente en componentes de microondas, medicina nuclear, giroscopios de precisión o sistemas MEMS .
6. **Varillas escalonadas/cónicas** : adecuadas para ocasiones de alta inercia o transmisión de potencia, satisfaciendo las necesidades de integración funcional y estructural.

3. Estado de la superficie

La varilla de aleación de tungsteno afecta directamente su resistencia a la fatiga, precisión de corte, protección contra la corrosión y vida útil del material. Las condiciones superficiales comunes incluyen:

1. **As-Sintered**
es una superficie sin procesar con una capa de película de óxido negro, que es adecuada para el mecanizado posterior o para piezas estructurales sin superficie expuesta.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. **La varilla torneada**

se procesa de forma tosca y la rugosidad es generalmente Ra 1,6-3,2 μm , lo que es adecuado para accesorios de precisión media.

3. **Las varillas de tierra**

están rectificadas cilíndricamente con precisión para tener una excelente calidad de superficie y consistencia dimensional, con Ra menor a 1,0 μm , y se utilizan ampliamente en equipos médicos y electrónicos.

4. **La varilla pulida**

se trata posteriormente para obtener un acabado de espejo, con un valor Ra de 0,2 a 0,4 μm . Se utiliza a menudo en dispositivos con altos requisitos de apariencia, baja fricción o dispositivos ópticos.

5. **La varilla recubierta**

utiliza galvanoplastia, recubrimiento químico o PVD para formar una superficie funcional, como recubrimiento de Ni, Cr, TiN , para mejorar la resistencia a la corrosión, el contacto eléctrico o la resistencia al desgaste.

6. **El tratamiento de superficie especial (electropulido/acabado con plasma)**

es adecuado para entornos muy limpios, ocasiones de alta radiación o equipos de tecnología médica/nuclear para mejorar la densidad de la superficie y eliminar microgrietas.

4. Nivel de precisión

Según la precisión del procesamiento y los requisitos de prueba, las varillas de aleación de tungsteno se pueden dividir en los siguientes tres grados:

- **Grado industrial (grado estándar)** : adecuado para protección general, soporte estructural, componentes de contrapeso, tolerancia dimensional $\pm 0,5$ mm;
- **Grado de precisión** : aplicable a componentes móviles, componentes de guía y sistemas inerciales, con tolerancia controlada a $\pm 0,1$ mm, $Ra < 1,6$ μm ;
- **Grado de ultraprecisión** : se utiliza en sistemas médicos, aeroespaciales y giroscópicos, con una tolerancia dimensional de hasta $\pm 0,01$ mm, $Ra < 0,4$ μm , y requiere pruebas NDT y estándares de calificación metalográfica .

Ante la creciente demanda del mercado de estructuras con formas especiales y piezas funcionales compuestas, las varillas de aleación de tungsteno muestran una tendencia creciente hacia la alta gama, la personalización y la inteligencia en cuanto a tamaño, estructura y procesamiento de superficies. En el futuro, gracias a tecnologías de fabricación de vanguardia como el procesamiento láser, el microfresado, el rectificado de ultraprecisión y el empaquetado por plasma, las varillas de aleación de tungsteno seguirán ampliando su potencial de ingeniería en aplicaciones clave como estructuras complejas, vibraciones de alta frecuencia, campos térmicos extremos y contrapesos de precisión.

1.4 Clasificación de las varillas de aleación de tungsteno (por composición, uso y método de procesamiento)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las varillas de aleación de tungsteno se utilizan ampliamente en numerosos sectores clave, como la industria aeroespacial, la energía nuclear, la medicina, la industria militar y la fabricación de alta gama. Existen diversos tipos y tienen diferentes usos. Para organizar el sistema de productos de forma más eficiente, orientar la selección de materiales y optimizar los procesos, suele ser necesario clasificar sistemáticamente las varillas de aleación de tungsteno según sus diferentes dimensiones. Los tres métodos de clasificación más comunes son: por composición, por uso y por método de procesamiento.

1. Clasificación por ingredientes

Las varillas de aleación de tungsteno se componen principalmente de tungsteno (W) y metales de enlace (como Ni, Fe, Cu, Co, etc.). Según las diferencias en los sistemas de aleación, se pueden clasificar en:

1. Varilla de aleación W-Ni-Fe

- Contenido: W 90–97%, Ni 2–7%, Fe 1–3%
- Características: Aleación magnética, alta resistencia, buena ductilidad.
- Aplicación: componentes inerciales, contrapesos militares, piezas estructurales de alta resistencia.

2. Varilla de aleación W-Ni-Cu

- Contenido: W 90–95%, Ni 2–5%, Cu 2–4%
- Características: no magnético o poco magnético, buena conductividad térmica, fuerte resistencia a la corrosión.
- Aplicación: equipos médicos, medicina nuclear, componentes de contramedidas electrónicas.

3. Varilla de aleación W-Cu

- Contenido: W 70–90%, Cu 10–30%
- Características: Excelente conductividad eléctrica y térmica, adecuado para dispositivos de alta potencia.
- Aplicación: electrodos, radiadores, contactos de vacío, etc.

4. Sistemas de aleaciones especiales (como W-Ni-Co, W-Re, W- TiC)

- Características: Rendimiento especial a altas temperaturas o resistencia a la radiación mejorada.
- Aplicación: componentes de control térmico aeroespacial, materiales nucleares, sistemas de contramedidas láser

5. Aleación modificada dopada

- tierra (Y_2O_3 , CeO_2) , carburo (TiC , ZrC) , etc.
- Función: Mejorar la microestructura, aumentar la resistencia a altas temperaturas o la resistencia a la corrosión.

2. Clasificación por finalidad

Según los escenarios de uso específicos de las varillas de aleación de tungsteno, se pueden dividir en las siguientes categorías:

1. Varilla de tungsteno para estructura

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Función: soporte de carga, soporte de estructura de alta temperatura, piezas del rotor
 - Aplicaciones típicas: estructuras inerciales de satélites, giroscopios, ejes de centrado de motores.
2. **Varilla de tungsteno para protección**
- Función: Protección contra rayos X, rayos gamma y radiación de neutrones.
 - Aplicaciones: TC médica, reactores nucleares, contenedores de transporte de isótopos.
3. **Varilla de tungsteno cinética militar**
- Función: impacto de alta densidad, perforación de blindaje, destrucción por energía cinética.
 - Aplicación: Núcleo APFSDS, material de núcleo de alto explosivo, contrapeso de aleta de cola
4. **Varillas de tungsteno para dispositivos electrónicos**
- Función: conductividad eléctrica y térmica, difusión térmica, absorción de microondas.
 - Aplicación: Empaquetado de chips, estructura de refrigeración, contacto eléctrico de electrodos.
5. **Varillas de tungsteno para dispositivos médicos**
- Función: aguja de radioterapia, componente de modulación de la intensidad tumoral, microcontrapeso
 - Requisitos: no magnético, ultra limpio, alta densidad.
6. **Varilla de tungsteno para investigación científica**
- Aplicaciones: aceleradores de partículas, objetivos de fuentes de neutrones, ánodos de vacío, instrumentos experimentales

3. Clasificación por método de procesamiento

Las varillas de aleación de tungsteno varían según el proceso de fabricación. Los métodos de procesamiento más comunes incluyen:

1. **Varillas prensadas de pulvimetalurgia (CIP/Moldeadas)**
 - Proceso: Prensado isostático en frío, prensado uniaxial seguido de sinterización a alta temperatura.
 - Características: organización densa, moldeo por lotes.
2. **Varilla prensada isostáticamente en caliente (varilla HIP)**
 - Proceso: Después de la encapsulación, el conjunto se densifica a alta temperatura y alta presión.
 - Ventajas: Densidad ultraalta, porosidad extremadamente baja, adecuado para requisitos de alta confiabilidad.
3. **Varillas extruidas**
 - Proceso: Se espera que la aleación de tungsteno se extruya en caliente en tiras largas.
 - Aplicación: Comunicación por microondas, componentes de control térmico.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. **Varillas de torneado/varillas de rectificado**
 - Proceso: Las varillas acabadas de alta precisión se obtienen mediante mecanizado.
 - Características: Ra < 1 μm , tolerancia dimensional de ±0,01 mm
5. **Varillas moldeadas por inyección (proceso MIM)**
 - Características: Adecuado para barras de estructuras pequeñas y complejas.
 - Aplicación: Piezas médicas de tungsteno, sistemas microinerciales.
6. **Varilla sinterizada en blanco (varilla de piel negra)**
 - Estado: Sin procesar o solo cortado preliminarmente, adecuado para un procesamiento personalizado posterior.
7. **Varillas de tungsteno impresas en 3D (aditivo) Fabricación)**
 - Estado: Aún en etapa exploratoria, adecuado para productos de lotes pequeños con estructuras complejas y requisitos flexibles.

Resumir

Como material estructural funcional, la clasificación de las varillas de aleación de tungsteno no solo es la base para la estandarización y serialización de productos, sino que también tiene una importante importancia para el diseño de rendimiento, la selección de procesos y la promoción del mercado. El sistema de materiales se puede definir por su composición, la función se puede definir con precisión según su propósito y el proceso permite lograr el mejor equilibrio entre calidad y eficiencia. En el futuro, a medida que la fabricación de alta gama se desarrolla hacia la inteligencia y la personalización, el sistema de clasificación multidimensional de las varillas de aleación de tungsteno se perfeccionará y tenderá a digitalizarse y modularizarse, proporcionando un soporte más científico y sistemático para la investigación y el desarrollo de materiales y las aplicaciones industriales.

1.5 Comparación entre varilla de aleación de tungsteno y varilla de cobre de tungsteno, varilla de tungsteno y otros materiales

Las varillas de aleación de tungsteno, las varillas de cobre-tungsteno y las varillas de tungsteno puro son materiales a base de tungsteno de uso común en la industria. Debido a sus diferentes propiedades físicas y campos de aplicación, desempeñan un papel importante en las industrias manufacturera y electrónica. Comprender sus diferencias le ayudará a tomar decisiones acertadas al diseñar y seleccionar materiales.

1.5.1 Comparación de composición y propiedades básicas

| Tipo de material | Ingredientes principales | Densidad (g/cm³) | dureza | Conductividad térmica | Conductividad | Resistencia mecánica | Características principales |
|----------------------------------|--|------------------|----------|-----------------------|---------------|----------------------|---|
| Varilla de aleación de tungsteno | Tungsteno + elementos de aleación como níquel, | 17.0 ~ 18.5 | Más alto | medio | Bajo a medio | excelente | Alta densidad, alta resistencia y propiedades mecánicas |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------|-------------|----------|----------|----------|--------|--|
| | hierro o cobre | | | | | | mejores que las de la varilla de tungsteno puro. |
| Varilla de cobre y tungsteno | Tungsteno + Cobre | 14.0 ~ 16.0 | medio | Muy alto | Más alto | mejor | Combinando la alta densidad del tungsteno con la buena conductividad eléctrica y térmica del cobre, proporciona un excelente rendimiento de gestión térmica. |
| Varilla de tungsteno puro | Tungsteno | 19.3 | Muy alto | Bajo | Bajo | Frágil | Máxima densidad, resistencia a altas temperaturas, alta dureza, pero relativamente frágil. |

1.5.2 Densidad y peso

- **Las varillas de tungsteno** tienen el mayor contenido de tungsteno y la mayor densidad (19,3 g/cm³), por lo que son adecuadas para aplicaciones con requisitos extremadamente altos de peso y densidad, como contrapesos, blindaje contra la radiación, etc.
- **Las varillas de aleación de tungsteno** tienen una densidad ligeramente menor, pero siguen siendo materiales de alta densidad y su resistencia es mejor que la del tungsteno puro, lo que las hace adecuadas para fabricar piezas de alta resistencia y alta densidad.
- **La varilla de cobre y tungsteno** tiene una densidad menor que el tungsteno y las aleaciones de tungsteno porque está dopado con cobre, pero el cobre tiene una excelente conductividad térmica, lo que lo hace más popular en situaciones donde se requiere gestión térmica.

1.5.3 Conductividad térmica y eléctrica

- **Las varillas de cobre-tungsteno** tienen un mayor contenido de cobre y su conductividad térmica y eléctrica es significativamente mejor que la de las varillas de aleación de tungsteno y las de tungsteno puro. Por lo tanto, se utilizan ampliamente en radiadores electrónicos, electrodos y dispositivos electrónicos de vacío.
- **Las varillas de aleación de tungsteno** son promedio y tienen una conductividad eléctrica menor que la del cobre de tungsteno, pero mejor que la del tungsteno puro, lo que las hace adecuadas para estructuras mecánicas y componentes de alta temperatura.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Las varillas de tungsteno puro tienen una conductividad térmica y eléctrica relativamente baja** y se utilizan más comúnmente en entornos que requieren resistencia a altas temperaturas y alta densidad.

1.5.4 Propiedades mecánicas y procesabilidad

- **Las varillas de aleación de tungsteno** presentan una tenacidad y resistencia mecánica significativamente mejoradas gracias a la adición de elementos de aleación. Su rendimiento de procesamiento es superior al del tungsteno puro y son adecuadas para el procesamiento de piezas complejas.
- **La varilla de cobre y tungsteno** combina la resistencia del tungsteno y la ductilidad del cobre, con buena tenacidad y resistencia a la fatiga térmica, pero el contenido de cobre limita su rendimiento a alta temperatura.
- **Las varillas de tungsteno puro** presentan alta dureza y fragilidad, son difíciles de procesar y propensas a agrietarse. Se utilizan principalmente en entornos de alta temperatura y en piezas estructurales.

1.5.5 Áreas de aplicación típicas

| Material | Ejemplos de aplicación |
|---|--|
| Varilla de aleación de tungsteno | Contrapesos, piezas estructurales de alta resistencia, núcleos perforantes, piezas aeroespaciales |
| Varilla de cobre y tungsteno | Electrodos, radiadores, componentes de tubos de vacío, dispositivos de microondas |
| Varilla de tungsteno puro | Piezas de hornos de alta temperatura, filamentos, protección contra la radiación, materiales para la industria nuclear |

Resumir

Las varillas de aleación de tungsteno, las de cobre-tungsteno y las de tungsteno puro presentan cada una sus propias ventajas. Las de aleación de tungsteno se utilizan ampliamente en el campo de las estructuras mecánicas debido a su alta densidad y resistencia mecánica; las de cobre-tungsteno se han convertido en un material indispensable en la industria electrónica gracias a su excelente conductividad térmica y eléctrica; y las de tungsteno puro son adecuadas para entornos especiales de alta temperatura y radiación gracias a su altísima densidad y resistencia a altas temperaturas. Una selección adecuada de materiales requiere una consideración exhaustiva de factores como la densidad, la resistencia, la conductividad térmica y el entorno de aplicación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

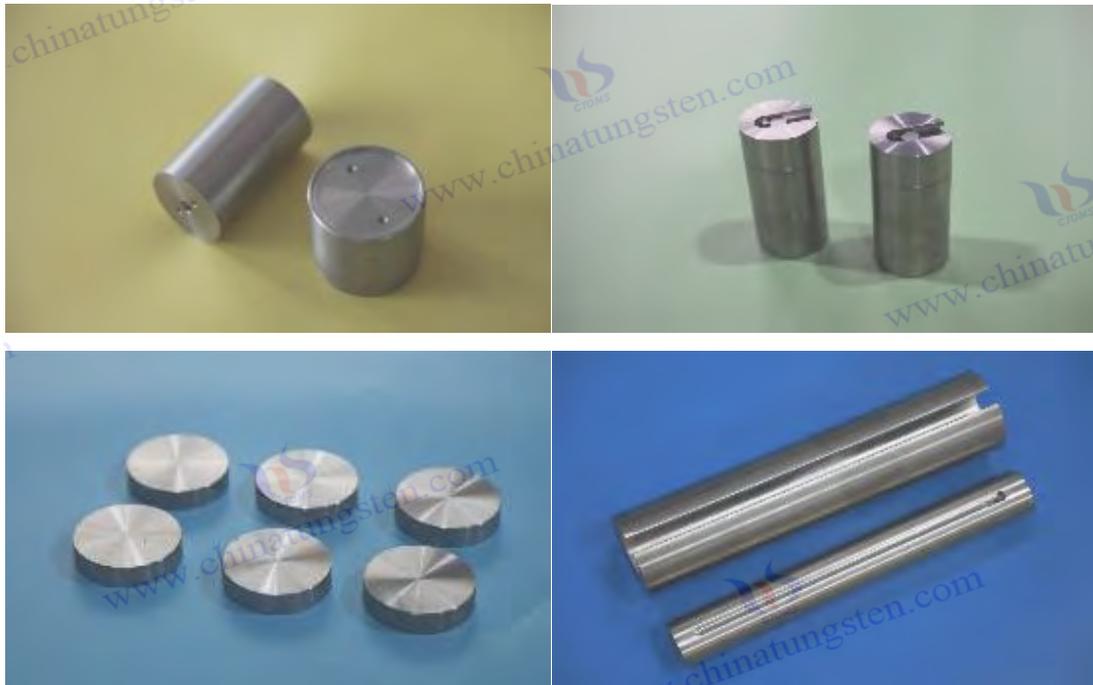
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Capítulo 2 Propiedades físicas y mecánicas de las varillas de aleación de tungsteno

2.1 Control de densidad, gravedad específica y precisión dimensional

Como material de alta densidad, el control de la densidad y el tamaño de las varillas de aleación de tungsteno está directamente relacionado con su rendimiento y los requisitos de calidad de las aplicaciones posteriores. Un control preciso de la densidad y el tamaño es clave para garantizar la estabilidad y la consistencia de las varillas de aleación de tungsteno.

2.1.1 Densidad y gravedad específica

- **La densidad** es la masa de un material por unidad de volumen y es el indicador principal para medir la calidad de las varillas de aleación de tungsteno. La densidad de las varillas de aleación de tungsteno suele estar entre 17,0 y 18,5 g/cm³, y el valor específico depende del contenido de tungsteno y de la proporción de elementos de aleación.
- **La gravedad específica** es la relación entre la densidad del material y la densidad del agua. Dado que la densidad del agua es de 1 g/cm³, la gravedad específica de la varilla de aleación de tungsteno es prácticamente igual a su densidad.

Un control preciso de la densidad puede garantizar que el material logre las propiedades físicas esperadas, como los requisitos de distribución precisa del peso, la resistencia mecánica y el efecto de protección electromagnética.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Una desviación de densidad demasiado grande provocará fluctuaciones en el rendimiento del producto y, en casos graves, afectará el ensamblaje y el ajuste de las piezas y la seguridad del producto final.

2.1.2 Factores clave del control de la densidad

- **los componentes de la materia prima** : A mayor contenido de tungsteno, mayor densidad. Una proporción adecuada de tungsteno y elementos de aleación (como níquel, hierro y cobre) es fundamental para controlar la densidad.
- **Parámetros del proceso de sinterización** : la temperatura, el tiempo y el control de la atmósfera influyen significativamente en la densidad. Una temperatura de sinterización demasiado baja puede provocar un aumento de la porosidad y una reducción de la densidad; una temperatura de sinterización demasiado alta puede causar sobrecalentamiento y reducir el rendimiento del material.
- **Tamaño y uniformidad de las partículas de polvo** : el polvo fino y la mezcla uniforme ayudan a mejorar la densidad, reducir la porosidad y aumentar la densidad del material.
- **Trabajo en frío y tratamiento térmico** : Los procesos adecuados de forjado, extrusión y tratamiento térmico pueden eliminar aún más la porosidad interna del material y mejorar la densidad.

Control de precisión dimensional

La varilla de aleación de tungsteno se refiere al rango de desviación entre su longitud, diámetro y dimensiones externas y el valor de diseño. El control dimensional de alta precisión garantiza la estabilidad y fiabilidad de las varillas de aleación de tungsteno durante el mecanizado, el ensamblaje y el uso.

- **La tolerancia dimensional** suele determinarse según los requisitos y estándares del cliente. Generalmente, la tolerancia del diámetro puede controlarse en un rango de $\pm 0,01$ mm a $\pm 0,05$ mm.
- **La rugosidad superficial** también forma parte de la precisión dimensional. Un buen estado de la superficie puede reducir la dificultad del mecanizado y mejorar el rendimiento de la pieza.
- Se utilizan equipos de procesamiento avanzados e instrumentos de medición (como máquinas de medición de tres coordenadas y medidores de diámetro láser) para garantizar una alta precisión y consistencia dimensional.

2.1.4 Medidas técnicas para el control de la precisión dimensional

- **Equipo de procesamiento CNC** : utilice tornos y rectificadoras CNC de alta precisión para el procesamiento para garantizar una precisión dimensional estable.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Detección en línea y control de retroalimentación** : se utiliza un sistema de medición automático durante el proceso de producción para monitorear las desviaciones dimensionales en tiempo real y realizar ajustes .
- **Optimización del proceso de tratamiento térmico** : controlar la deformación durante el tratamiento térmico para evitar la pérdida de control dimensional.
- **Especificaciones de proceso estrictas** : incluyen corte, rectificado, pulido y otros procesos para garantizar que cada paso del procesamiento cumpla con los requisitos dimensionales.

resumen

Las varillas de aleación de tungsteno son la base para garantizar su alto rendimiento. La precisión de la densidad afecta directamente las propiedades mecánicas y los efectos de aplicación del material. Un estricto control de la precisión dimensional garantiza el rendimiento del procesamiento del producto y la fiabilidad del ensamblaje final. Mediante la optimización de la proporción de materia prima, los parámetros del proceso y la tecnología avanzada de procesamiento y prueba, se puede garantizar eficazmente que las propiedades físicas y mecánicas de las varillas de aleación de tungsteno cumplan con los requisitos de diseño.

2.2 Resistencia a la tracción, límite elástico y alargamiento

Las varillas de aleación de tungsteno son indicadores importantes de su capacidad para soportar cargas en aplicaciones prácticas, entre las que la resistencia a la tracción, el límite elástico y la elongación son parámetros clave para evaluar la resistencia y la plasticidad del material. Comprender y controlar estos parámetros de rendimiento ayudará a garantizar la seguridad y la fiabilidad de las varillas de aleación de tungsteno durante su fabricación y uso.

2.2.1 Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción se refiere a la tensión máxima que un material puede soportar en un ensayo de tracción, lo que refleja su capacidad para resistir la fractura. La resistencia a la tracción de las varillas de aleación de tungsteno suele ser alta, oscilando típicamente entre 600 y 1200 MPa, y su valor específico depende de la composición de la aleación, el proceso de fabricación y el tratamiento térmico.

- Un alto contenido de tungsteno generalmente aumenta la resistencia a la tracción del material, pero una proporción de tungsteno demasiado alta puede resultar en una menor tenacidad.
- A través de un diseño de aleación razonable y un proceso de tratamiento térmico, se puede mejorar la plasticidad y tenacidad del material al tiempo que se garantiza una alta resistencia.
- Las varillas de aleación de tungsteno con alta resistencia a la tracción son adecuadas para piezas mecánicas y estructurales que soportan grandes cargas de tracción.

2.2.2 Límite elástico

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El límite elástico es el valor de tensión a partir del cual un material comienza a experimentar una deformación plástica permanente al ser sometido a tensión, lo que refleja su límite elastoplástico. El límite elástico de las varillas de aleación de tungsteno suele ser ligeramente inferior a la resistencia a la tracción, y oscila generalmente entre 400 y 900 MPa.

- El límite elástico afecta el margen de seguridad del material en aplicaciones prácticas.
- En el caso de las varillas de aleación de tungsteno, un mayor límite elástico significa que pueden soportar una mayor tensión de trabajo durante el uso sin deformación permanente.
- El límite elástico se puede mejorar eficazmente optimizando la temperatura de sinterización y el tratamiento termomecánico posterior.

2.2.3 Elongación

La elongación es la capacidad de un material para deformarse plásticamente antes de romperse, generalmente expresada como porcentaje, y es un indicador clave para medir la tenacidad y la plasticidad de un material. La elongación de las varillas de aleación de tungsteno es generalmente baja, oscilando típicamente entre el 1 % y el 10 %.

- Un alargamiento bajo indica que el material es frágil y propenso a romperse; un alargamiento alto indica que el material tiene una buena capacidad de deformación plástica.
- Los elementos de aleación como el níquel y el hierro agregados a la aleación de tungsteno ayudan a aumentar el alargamiento y hacen que el material sea menos propenso al agrietamiento por fragilidad.
- El aumento del alargamiento es beneficioso para la formación y el uso seguro de varillas de aleación de tungsteno en condiciones de trabajo complejas.

2.2.4 Factores que afectan el rendimiento mecánico

- **Relación de composición** : Cuanto mayor sea el contenido de tungsteno, mayor será la resistencia, pero el alargamiento puede disminuir; la adición de elementos de aleación como níquel y hierro puede mejorar la tenacidad.
- **Proceso de sinterización** : la temperatura, el tiempo y la atmósfera de sinterización afectan directamente la microestructura y la densidad del material, lo que afecta la resistencia y la plasticidad.
- **Tratamiento térmico y mecanizado** : Un tratamiento térmico adecuado, como el recocido, el envejecimiento y los procesos de mecanizado (forjado, extrusión), puede ajustar la estructura interna del material y mejorar las propiedades mecánicas.
- **Tamaño del grano** : Una estructura de grano fina y uniforme contribuye a mejorar la resistencia y la tenacidad.

resumen

La resistencia a la tracción, el límite elástico y la elongación de las varillas de aleación de tungsteno son indicadores importantes para medir sus propiedades mecánicas integrales. Al optimizar el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

diseño de la composición y el control del proceso, las varillas de aleación de tungsteno pueden obtener la plasticidad adecuada, garantizando a la vez una alta resistencia para cumplir con los requisitos de rendimiento del material en diversas aplicaciones industriales. El dominio y control de estos parámetros de rendimiento es crucial para el aseguramiento de la calidad y el desarrollo de aplicaciones de las varillas de aleación de tungsteno.

2.3 Dureza y resistencia al impacto

La dureza y la resistencia al impacto de las varillas de aleación de tungsteno son indicadores importantes para evaluar su resistencia al desgaste y a los daños, y desempeñan un papel fundamental para garantizar la estabilidad y la vida útil de los materiales en condiciones de trabajo complejas. Un control adecuado de la dureza y la resistencia al impacto es fundamental para lograr un rendimiento equilibrado de las varillas de aleación de tungsteno.

2.3.1 Dureza

La dureza refleja la capacidad de un material para resistir la deformación plástica local y el desgaste, y generalmente se mide utilizando métodos como la dureza Brinell (HB), la dureza Rockwell (HRC) o la dureza Vickers (HV).

- Las varillas de aleación de tungsteno generalmente están en el rango de **200 ~ 400 HB**, y el valor específico varía según el contenido de tungsteno y el tipo y proporción de elementos de aleación.
- Un alto contenido de tungsteno generalmente corresponde a una mayor dureza, y la adición de elementos de aleación como níquel y hierro puede ajustar el equilibrio entre dureza y tenacidad.
- Las aleaciones de tungsteno con mayor dureza son adecuadas para fabricar piezas resistentes al desgaste y componentes resistentes a los arañazos.
- La dureza se puede aumentar aún más mediante un tratamiento térmico (como el tratamiento de envejecimiento).

2.3.2 Resistencia al impacto

La resistencia al impacto es la capacidad de un material para resistir una fuerza externa repentina sin romperse y generalmente se evalúa mediante la prueba de impacto Charpy o la prueba de impacto Izod.

- Las varillas de aleación de tungsteno generalmente tienen una resistencia al impacto de moderada a buena, con una energía de absorción de impacto típica que varía de **5 a 20 J/cm²**.
- La resistencia al impacto se ve afectada significativamente por la estructura del grano del material, los elementos de aleación y el proceso de tratamiento térmico.
- La adición de elementos como níquel y hierro a la aleación puede mejorar significativamente la tenacidad y la resistencia al impacto del material y reducir el riesgo de fractura frágil.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- El procesamiento termomecánico optimizado (por ejemplo, forjado, extrusión) también puede ayudar a mejorar la resistencia al impacto.

2.3.3 Equilibrio entre dureza y resistencia al impacto

Las varillas de aleación de tungsteno generalmente requieren encontrar el mejor equilibrio entre dureza y resistencia al impacto:

- Aunque una dureza demasiado alta mejora la resistencia al desgaste, puede hacer que el material se vuelva quebradizo y reducir su resistencia al impacto.
- La dureza adecuada combinada con una buena tenacidad puede garantizar que el material sea resistente al desgaste y no se rompa fácilmente en entornos de uso de alta intensidad.
- Las varillas de aleación de tungsteno, como el diseño de la composición de la aleación, el control de los parámetros de sinterización y la optimización de los procedimientos de tratamiento térmico y trabajo en frío, son la clave para lograr un equilibrio de rendimiento.

resumen

La dureza y la resistencia al impacto son dos aspectos importantes de las propiedades físicas y mecánicas de las varillas de aleación de tungsteno. Mediante una proporción adecuada de materiales y un control de proceso adecuado, se pueden obtener varillas de aleación de tungsteno con alta dureza y buena resistencia al impacto, satisfaciendo así los requisitos de diferentes sectores industriales en cuanto a resistencia al desgaste y a los daños. Un equilibrio adecuado de rendimiento puede mejorar la fiabilidad de la aplicación y la vida útil de las varillas de aleación de tungsteno.

2.4 Conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica y rendimiento a alta temperatura

Las varillas de aleación de tungsteno se utilizan ampliamente en diversos sectores industriales, especialmente en entornos de alta temperatura y carga térmica. Su conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica y rendimiento a alta temperatura afectan directamente la estabilidad y la vida útil del material. Comprender y optimizar estas propiedades termofísicas es fundamental para diseñar productos de aleación de tungsteno de alto rendimiento.

2.4.1 Conductividad térmica

La conductividad térmica es la capacidad de un material para transferir calor. La conductividad térmica de la aleación de tungsteno se encuentra entre la del tungsteno puro y la de otros materiales de aleación, generalmente en el rango de **70 a 120 W / (m · K)**.

- El tungsteno en sí tiene una excelente conductividad térmica (alrededor de 170 W / (m · K)), pero agregar elementos de aleación como níquel y hierro reducirá la conductividad térmica general.
- La aleación de tungsteno cumple con muchas aplicaciones que requieren una rápida disipación del calor, como radiadores electrónicos, herramientas de alta temperatura y equipos de intercambio de calor.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La densidad y la estructura del grano del material tienen un impacto significativo en la conductividad térmica, y los procesos de sinterización y tratamiento térmico deben controlarse para mejorar la densidad y optimizar la conductividad térmica.

2.4.2 Coeficiente de expansión térmica (CTE)

El coeficiente de expansión térmica indica la capacidad de un material para expandirse con los cambios de temperatura. El coeficiente de expansión térmica de la aleación de tungsteno es relativamente bajo, de aproximadamente $4,5 \times 10^{-6}$ a $6,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

- El bajo coeficiente de expansión térmica hace que la aleación de tungsteno tenga pequeños cambios dimensionales y baja tensión térmica en entornos de alta temperatura, lo que la hace adecuada para su uso en equipos de precisión y piezas estructurales de alta temperatura.
- La adición de elementos de aleación aumentará ligeramente el coeficiente de expansión térmica, pero todavía es mucho menor que el de muchos materiales metálicos comúnmente utilizados (como el cobre y el aluminio).
- La estabilidad del coeficiente de expansión térmica es muy importante para evitar grietas por fatiga térmica durante la soldadura, el montaje y el uso.

2.4.3 Rendimiento a alta temperatura

Las varillas de aleación de tungsteno tienen excelentes propiedades de alta temperatura, incluido un alto punto de fusión, buena resistencia a altas temperaturas y resistencia a la fatiga térmica.

- El punto de fusión del tungsteno alcanza los 3422 °C. Aunque el punto de fusión de la aleación de tungsteno es ligeramente inferior, conserva buenas propiedades mecánicas en entornos superiores a 1500 °C.
- Su resistencia a la oxidación a alta temperatura es ligeramente peor que la del tungsteno puro, y es necesario recubrirlo en la superficie o usarlo en una atmósfera protectora para evitar daños por oxidación.
- La aleación de tungsteno hace que sea ampliamente utilizada en la industria aeroespacial, militar y en la fabricación de hornos de alta temperatura.
- El rendimiento frente a la fatiga térmica determina la vida útil del material en ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento. Optimizar la composición y la microestructura del material puede mejorar la resistencia a la fatiga térmica.

resumen

Las varillas de aleación de tungsteno presentan una buena conductividad térmica y un coeficiente de expansión térmica bajo y estable, lo que les confiere un excelente rendimiento en entornos de alta temperatura. Su resistencia a altas temperaturas y su rendimiento a la fatiga térmica garantizan su aplicación en condiciones de trabajo extremas. Mediante un diseño de materiales adecuado y la optimización de procesos, las propiedades termofísicas de las varillas de aleación de tungsteno pueden mejorarse aún más para satisfacer las necesidades de campos de alta gama.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.5 Propiedades eléctricas, respuesta magnética y resistencia a la radiación

Las varillas de aleación de tungsteno tienen importantes aplicaciones en campos específicos como dispositivos electrónicos, blindaje magnético e industria nuclear. Sus propiedades eléctricas, respuesta magnética y resistencia a la radiación son indicadores clave para evaluar la aplicabilidad de los materiales. El dominio de estas propiedades ayudará a optimizar el diseño del material y a ampliar su rango de aplicación.

2.5.1 Propiedades eléctricas

La aleación de tungsteno se ve afectada significativamente por la composición de la aleación y generalmente es más baja que el tungsteno puro pero más alta que otras aleaciones de metales pesados.

- La conductividad eléctrica del tungsteno puro es relativamente alta, alrededor de 18×10^6 S/m, pero la conductividad eléctrica de la aleación de tungsteno generalmente cae a $5 \sim 12 \times 10^6$ S/m debido a la presencia de elementos de aleación como níquel y hierro.
- La resistividad de la aleación de tungsteno es mayor que la del tungsteno puro y es adecuada para aplicaciones que requieren cierta resistencia pero también alta resistencia, como elementos de resistencia, materiales de electrodos, etc.
- Optimizar la relación de composición y el proceso de tratamiento térmico puede mejorar las propiedades eléctricas y lograr un equilibrio entre resistencia y conductividad.

2.5.2 Respuesta magnética

El tungsteno en sí es un material paramagnético. Las propiedades magnéticas de las aleaciones de tungsteno dependen principalmente del tipo y el contenido de los elementos de aleación.

- La adición de elementos del grupo del hierro (como hierro y níquel) mejorará la respuesta magnética de la aleación, que puede exhibir cierto ferromagnetismo o paramagnetismo .
- La aleación de tungsteno tiene un impacto en su estabilidad en materiales de protección magnética y entornos de campos magnéticos.
- En algunas aplicaciones, se prefieren las aleaciones de tungsteno con baja respuesta magnética para evitar la interferencia del campo magnético.

2.5.3 Resistencia a la radiación

El tungsteno y sus aleaciones se utilizan ampliamente en la industria nuclear y en la protección radiológica debido a su elevado número atómico y densidad, y tienen buena resistencia a la radiación.

- La aleación de tungsteno tiene un excelente efecto de protección contra la radiación electromagnética, como los neutrones y los rayos gamma, y se utiliza a menudo en materiales de protección de reactores nucleares y cubiertas protectoras de equipos radiactivos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La adición de elementos de aleación generalmente no reduce significativamente la resistencia a la radiación, pero se debe prestar atención a la uniformidad y densidad de la aleación para evitar la penetración de la radiación.
- La aleación de tungsteno exhibe buena estabilidad estructural y resistencia al daño por radiación en ambientes irradiados y es adecuada para uso a largo plazo.

resumen

Las varillas de aleación de tungsteno sientan las bases para su aplicación en los campos de la electrónica, el blindaje magnético y la industria nuclear. Ajustando la composición de la aleación y los parámetros del proceso, se puede optimizar y personalizar el rendimiento para satisfacer las necesidades de diferentes entornos industriales y aumentar el valor de uso integral del material.

2.6 Análisis de resistencia a la corrosión y estabilidad química

Las varillas de aleación de tungsteno se exponen a medios químicos y aire húmedo en diversos entornos industriales. Su resistencia a la corrosión y estabilidad química son propiedades clave para garantizar un uso confiable y a largo plazo del material. Un análisis exhaustivo de la resistencia a la corrosión de las aleaciones de tungsteno puede ayudar a orientar la selección de materiales y el diseño de medidas de protección.

2.6.1 Resistencia a la corrosión

La aleación de tungsteno tiene buena resistencia a la corrosión, que se manifiesta principalmente en:

- **Tiene una fuerte tolerancia a la mayoría de los medios ácidos y alcalinos**, especialmente un rendimiento excelente en entornos neutros o ácidos débiles y es adecuado para equipos químicos y componentes de instrumentos.
- **Se forma una película de óxido estable en la superficie del tungsteno**, que puede aislar eficazmente el medio corrosivo y retrasar una mayor corrosión del material.
- En presencia de ácidos oxidantes fuertes (como ácido nítrico o ácido perclórico), la resistencia a la corrosión de la aleación de tungsteno puede verse comprometida y se deben tomar medidas de protección.
- El contenido y la distribución de los elementos de aleación (como el níquel y el hierro) afectan la resistencia general a la corrosión de la aleación de tungsteno. Una estructura de aleación uniforme contribuye a mejorar la uniformidad y la resistencia a la corrosión.

2.6.2 Estabilidad química

La aleación de tungsteno se refleja en el hecho de que sus propiedades químicas no se alteran fácilmente en diversos entornos. Sus principales características incluyen:

- **El alto punto de fusión y la estabilidad térmica** hacen que la aleación de tungsteno sea estable en altas temperaturas y entornos hostiles, y no se descomponga ni deforme fácilmente.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Muestra buena estabilidad a la mayoría de los medios químicos comunes, como agua y soluciones alcalinas.
- En el aire y a temperatura ambiente, la película de óxido en la superficie de la aleación de tungsteno puede evitar una mayor oxidación y mejorar la durabilidad del material.
- Cuando se utiliza en entornos extremos, como ácidos o álcalis fuertes, se requiere una capa de protección del material o un proceso especial para mejorar la estabilidad.

2.6.3 Factores que afectan la resistencia a la corrosión y la estabilidad química

- **Composición y microestructura de la aleación** : el tipo y la distribución de los elementos de aleación afectan la formación y estabilidad de la película de óxido y, por lo tanto, el comportamiento frente a la corrosión.
- **Tratamiento de superficie** : El pulido, la pulverización o el tratamiento de recubrimiento pueden mejorar eficazmente la resistencia a la corrosión del material.
- **Condiciones ambientales** : temperatura, concentración del medio, valor de pH, etc. afectan directamente la tasa de corrosión y la vida útil del material.
- **Proceso de fabricación** : La alta densidad y la microestructura uniforme ayudan a reducir los puntos de corrosión y prolongar la vida útil.

resumen

Las varillas de aleación de tungsteno ofrecen una excelente resistencia a la corrosión y estabilidad química, y son aptas para su uso en diversos entornos hostiles. Mediante un diseño racional de la composición de la aleación, la optimización de los procesos de fabricación y la adopción de medidas de protección superficial, se puede mejorar aún más la resistencia a la corrosión y la vida útil de las varillas de aleación de tungsteno para satisfacer las necesidades de diferentes sectores industriales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

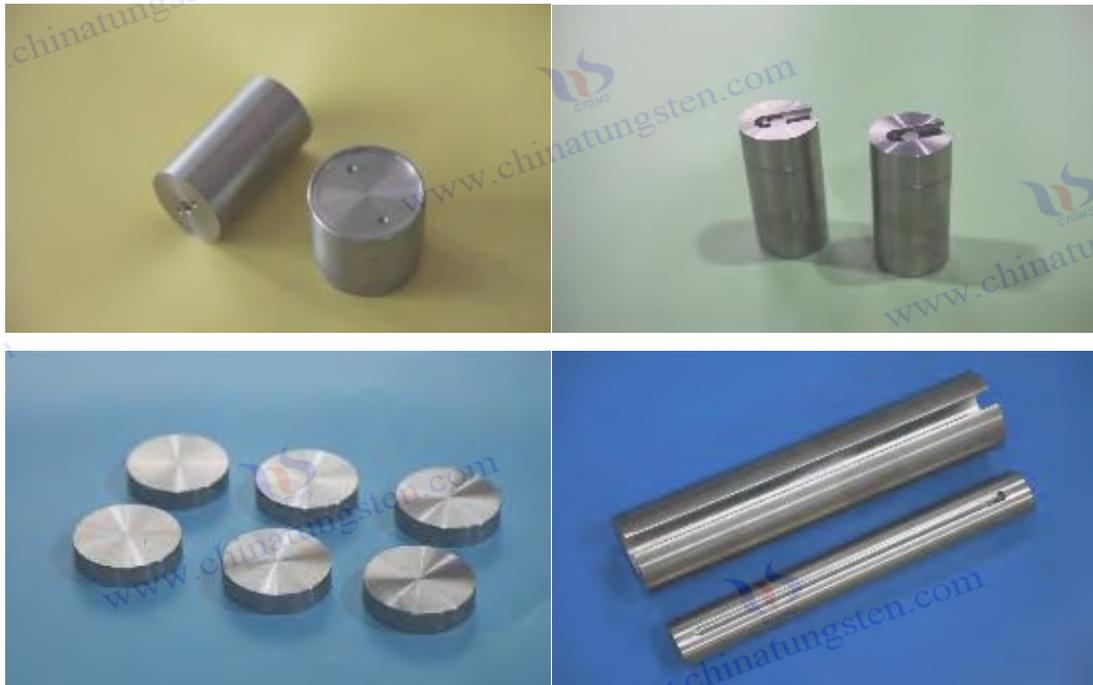
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

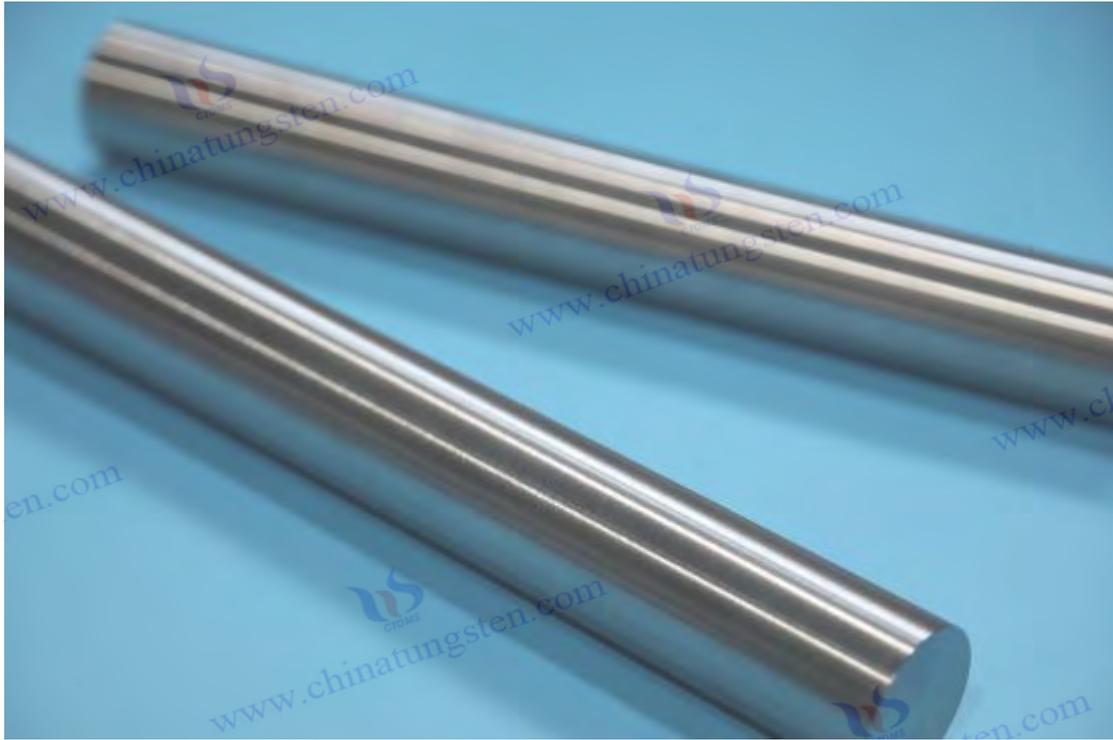
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Capítulo 3 Tecnología de preparación y conformación de varillas de aleación de tungsteno

3.1 Preparación de la materia prima y características del polvo

Las varillas de aleación de tungsteno dependen en gran medida de la pureza, la distribución granulométrica, la morfología y la uniformidad de la mezcla de las materias primas utilizadas. La preparación de alta calidad de las materias primas y el control de las propiedades del polvo son fundamentales para lograr excelentes propiedades físicas y mecánicas, así como la estabilidad de las varillas de aleación de tungsteno. Esta sección detallará la selección de las materias primas, el pretratamiento, la preparación del polvo y la influencia de sus propiedades en los procesos posteriores y el rendimiento del producto durante la preparación de las varillas de aleación de tungsteno.

3.1.1 Fuentes y tipos de polvo de tungsteno

El polvo de tungsteno es la materia prima principal para la producción de varillas de aleación de tungsteno. Los polvos de tungsteno más utilizados incluyen:

- **Polvo de tungsteno químicamente reducido** : obtenido por reducción de tungstato en hidrógeno, con alta pureza y buena morfología de partículas, adecuado para la preparación de aleaciones de tungsteno de alto rendimiento.
- **Polvo de tungsteno de reducción carbotérmica** : preparado mediante el método de reducción carbotérmica, con bajo costo, pero con un contenido de impurezas relativamente alto y una amplia distribución del tamaño de partícula.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Polvo de tungsteno secado por aspersión** : se utiliza para producir polvo de tungsteno de alta calidad con partículas uniformes y morfología de partículas regular, lo que es conveniente para el prensado y sinterización posteriores.
- **Polvo de tungsteno esférico** : preparado mediante esferoidización de plasma y otras tecnologías, con buena fluidez y densidad aparente, adecuado para aleaciones de tungsteno de alto rendimiento para pulvimetalurgia.

Al seleccionar polvo de tungsteno, se deben considerar integralmente factores como la pureza, el tamaño de partícula, la morfología y el precio para cumplir con los requisitos específicos del proceso y los estándares de rendimiento.

3.1.2 Selección del polvo del elemento de aleación

Las aleaciones de tungsteno suelen estar dopadas con elementos de aleación como níquel, hierro y cobre, que se mezclan con polvo de tungsteno en forma de polvo. El tamaño de partícula y la morfología del polvo de aleación influyen considerablemente en la uniformidad de la mezcla y las propiedades finales del material.

- **Polvo de níquel** : El polvo de níquel esférico se utiliza comúnmente con un tamaño de partícula uniforme, lo que es beneficioso para mejorar la uniformidad de la mezcla y la densidad de sinterización.
- **Polvo de hierro** : utilice polvo de hierro con alta pureza y bajo contenido de oxígeno para evitar que las impurezas afecten las propiedades del material.
- **Polvo de cobre** : El polvo de cobre esférico o en escamas se utiliza comúnmente. Una buena conductividad térmica es particularmente importante para la preparación de aleaciones de cobre-tungsteno.

El polvo del elemento de aleación debe mantener una distribución uniforme de partículas y evitar la aglomeración para garantizar la uniformidad de la composición de la aleación a escala microscópica.

3.1.3 Proceso de pretratamiento del polvo

El pretratamiento del polvo es crucial para mejorar el rendimiento de las partículas y los efectos de la mezcla. Los métodos de pretratamiento más comunes incluyen:

- **Tratamiento de secado** : elimina la humedad adsorbida en la superficie del polvo para evitar que se formen poros durante el proceso de sinterización.
- **Cribado y clasificación** : Los polvos de diferentes tamaños de partículas se separan mediante tamices para obtener polvos mixtos con una distribución uniforme del tamaño de partícula y mejorar la densidad de prensado.
- **Activación de la superficie** : activar mecánica o químicamente el polvo para mejorar la fuerza de unión entre las partículas y promover la densidad de sinterización.
- **Mezcla y homogeneización** : utilice molinos de bolas, mezcladores y otros equipos para mezclar uniformemente durante mucho tiempo para garantizar una distribución uniforme de los elementos de aleación y evitar un rendimiento desigual.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1.4 Distribución del tamaño de partículas y morfología de los polvos

La distribución del tamaño de partícula tiene una influencia importante en la densidad, las propiedades mecánicas y el rendimiento de procesamiento de las varillas de aleación de tungsteno:

- **El polvo fino** es beneficioso para mejorar la densidad de sinterización y las propiedades mecánicas, pero el polvo demasiado fino es fácil de aglomerar, lo que afecta la fluidez y el rendimiento del procesamiento.
- **El polvo grueso** tiene buena fluidez, pero presenta gran porosidad y poca densidad durante la sinterización.
- **La distribución ideal del tamaño de partícula** suele ser una distribución de amplio espectro, es decir, el polvo fino llena los espacios entre los polvos gruesos para obtener una alta densidad.

Apariencia:

- **El polvo esférico** tiene buena fluidez y densidad aparente, lo que favorece el proceso de prensado y sinterización.
- **Los polvos irregulares** son propensos a formar huecos entre ellos, pero a veces ayudan a mejorar la fuerza de bloqueo mecánico.

3.1.5 Control de la mezcla y proporción de polvos

Las aleaciones de tungsteno dependen en gran medida de la proporción precisa y la mezcla uniforme de tungsteno y elementos de aleación. En aleaciones de tungsteno típicas, como el sistema W-Ni-Fe, el contenido de tungsteno suele ser superior al 90% y la proporción de elementos de aleación es relativamente baja.

- Se utilizan equipos de pesaje de alta precisión para garantizar la exactitud de los ingredientes.
- Utilice equipos de homogeneización eficientes (como molinos de bolas o mezcladores de tambor) para lograr una mezcla completa. Es necesario optimizar el tiempo y la velocidad para evitar la aglomeración del polvo o la alteración de su morfología.
- Durante el proceso de mezcla, se puede agregar una cantidad adecuada de lubricante (como alcohol polivinílico, parafina) para mejorar la fluidez del polvo y el rendimiento de la compresión.

3.1.6 Fluidez del polvo y densidad aparente

- **La fluidez** afecta la uniformidad y la eficiencia de conformado del prensado de polvo. Un polvo con baja fluidez puede causar fácilmente una densidad de prensado desigual, lo que afecta la calidad de la sinterización posterior.
- **La densidad aparente** determina la cantidad de carga de polvo y la densidad de prensado durante el prensado, y es un factor clave para mejorar la densidad y las propiedades mecánicas del material.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La fluidez y la densidad aparente generalmente se ajustan y controlan mediante la morfología del polvo, la distribución del tamaño de partícula y el proceso de pretratamiento.

3.1.7 Control de pureza química y impurezas de polvos

- Los elementos de impureza como oxígeno, carbono, nitrógeno, azufre, etc. afectarán significativamente las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión de la aleación de tungsteno.
- Utilice materias primas de alta pureza y un entorno de producción limpio para controlar estrictamente la pureza química del polvo.
- Utilice un procesamiento en atmósfera protectora o al vacío para reducir la oxidación y la adsorción de impurezas.

resumen

La preparación de la materia prima y la optimización de las propiedades del polvo son la base para la fabricación de alto rendimiento de varillas de aleación de tungsteno. Mediante la selección racional de polvo de tungsteno y polvo de elementos de aleación de alta pureza, tamaño de partícula adecuado y buena morfología, junto con procesos científicos de pretratamiento y mezcla, se pueden mejorar eficazmente la densidad y las propiedades mecánicas de la aleación de tungsteno, sentando las bases para los procesos posteriores de conformado, sinterización y tratamiento térmico. Un sistema de polvo de alta calidad es clave para garantizar un rendimiento estable y una excelente calidad de las varillas de aleación de tungsteno.

3.2 Proceso de prensado de pulvimetalurgia (moldeo, prensado isostático)

Las varillas de aleación de tungsteno se fabrican mediante tecnología de prensado pulvimetalúrgico. Mediante la formación de polvo de aleación de tungsteno mezclado uniformemente bajo una presión determinada, se obtiene un cuerpo verde con una forma y densidad preliminares, que sirve de base para la sinterización y el tratamiento térmico posteriores. La selección del proceso de prensado y el control de parámetros influyen directamente en la densidad, la uniformidad y el rendimiento posterior del cuerpo verde, y son un componente importante del proceso de preparación de las varillas de aleación de tungsteno.

3.2.1 Principios básicos del prensado de polvo

El prensado pulvimetalúrgico consiste en utilizar presión mecánica para que las partículas de polvo entren en contacto y se entrelacen, reduciendo la porosidad y formando una palanquilla verde con cierta resistencia mecánica. Este proceso se logra principalmente mediante la reorganización, la deformación plástica y la compactación de las partículas de polvo.

- **Etapas de reordenamiento** : Las partículas de polvo se mueven y reorganizan a través de la compresión, reduciendo los espacios entre los polvos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Etapa de deformación plástica** : Las partículas se comprimen y deforman plásticamente, llenando aún más los huecos.
- **Etapa de compactación** : alcanza la máxima densidad y forma un cuerpo sólido.

La morfología, la distribución del tamaño de partícula y la fluidez del polvo tienen un impacto significativo en el efecto de prensado.

3.2.2 Prensado uniaxial

El moldeo por compresión es el método de prensado más común en la preparación de varillas de aleación de tungsteno. El polvo se prensa en el molde mediante presión uniaxial para formar la pieza en bruto deseada.

Características del proceso:

- **El equipo tiene una estructura simple** y un funcionamiento conveniente y es adecuado para la producción en masa.
- **La presión de formación es alta, generalmente alcanza entre 200 y 600 MPa**, lo que aumenta efectivamente la densidad del polvo.
- **El diseño del molde es flexible** y puede cumplir con varios requisitos de tamaño y forma de sección transversal.
- **La fuerza es unidireccional, la distribución de densidad es desigual** y la densidad en el centro del cuerpo verde es menor que en la superficie, lo que puede causar deformación durante la sinterización posterior.

Parámetros principales del proceso:

- **Presión de prensado** : Cuanto mayor sea la presión, mayor será la densidad, pero una presión demasiado alta puede provocar el desgaste de la matriz o la rotura del polvo.
- **Velocidad de prensado** : controlar la velocidad adecuada puede reducir la rotura de partículas de polvo y mejorar la uniformidad de la densidad.
- **Tiempo de retención** : Un tiempo de retención adecuado puede hacer que las partículas de polvo entren en contacto por completo y mejorar la resistencia del cuerpo verde.
- **Temperatura del molde** : Calentar adecuadamente el molde puede ayudar a mejorar la plasticidad del polvo y reducir las grietas y la deformación.

solicitud:

El moldeo por compresión es adecuado para producir varillas de aleación de tungsteno de mayor tamaño y sección transversal simple. También puede utilizarse para preformar palanquillas para su posterior procesamiento secundario.

3.2.3 Prensado isostático

El prensado isostático es un método de formación que logra una alta densidad y una distribución uniforme de la densidad mediante la aplicación de presión multidireccional uniforme al cuerpo del polvo en un medio hidráulico o neumático.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Características del proceso:

- **La presión se transmite uniformemente y la densidad se distribuye uniformemente**, evitando eficazmente el problema del gradiente de densidad durante el proceso de moldeo.
- **La dirección de presión es diversa, el tamaño y la forma de la pieza en bruto son flexibles** y es adecuado para formas complejas y piezas de aleación de tungsteno de alta precisión.
- **La inversión en equipos es alta, el proceso es relativamente complicado** y la eficiencia de producción es menor que la del moldeo.
- **Generalmente se divide en dos categorías: prensado isostático en frío (CIP) y prensado isostático en caliente (HIP)**.

Parámetros principales del proceso:

- **Rango de presión**: El prensado isostático en frío es generalmente de 100 a 400 MPa, y el prensado isostático en caliente puede alcanzar un entorno de alta temperatura y alta presión de más de 100 MPa.
- **Selección del medio**: a menudo se utiliza líquido (como agua, aceite) o gas (como nitrógeno) como medio de transmisión de presión.
- **Tiempo de retención**: asegúrese de que el polvo esté completamente compactado y deformado.
- **Control de temperatura**: El prensado isostático en caliente combinado con altas temperaturas promueve la sinterización del polvo, mejorando la densidad y el rendimiento.

solicitud:

El prensado isostático es adecuado para la preparación de varillas de aleación de tungsteno de alto rendimiento, especialmente componentes clave que requieren una densidad uniforme y propiedades mecánicas estables, como varillas de aleación para la industria militar aeroespacial y equipos médicos de alta gama.

3.2.4 Comparación de ventajas y desventajas entre el moldeo y el prensado isostático

| proyecto | Moldeo por compresión | Prensado isostático |
|---|--|---|
| Inversión en equipos | Más bajo | Más alto |
| Velocidad de prensado | Rápido, adecuado para producción en masa. | Eficiencia de producción lenta y relativamente baja |
| Uniformidad de densidad | El gradiente de densidad es obvio y la densidad en el centro es menor. | Densidad uniforme y pocos defectos |
| Formación de complejidad | Adecuado para secciones transversales simples. | Adecuado para formas complejas. |
| Propiedades mecánicas del producto terminado | Estable, dependiente del control del proceso posterior | Alta densidad, alto rendimiento. |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | |
|-------|------|------|
| costo | Bajo | alto |
|-------|------|------|

3.2.5 Tecnologías clave y optimización de procesos

- **Optimización del diseño del molde** : utilice tecnología de prensado multietapa o prensado progresivo para reducir el gradiente de densidad y mejorar la uniformidad del cuerpo verde.
- **Pretratamiento del polvo** : mejora la fluidez del polvo y las propiedades de lubricación para evitar la aglomeración de partículas de polvo o rayones en el molde durante el prensado.
- **Ajuste de los parámetros del proceso de prensado** : controle razonablemente la presión, la velocidad y el tiempo de retención para evitar la rotura del polvo y la tensión residual.
- **Actualización del equipo de prensado isostático** : adopte equipos integrados de alta presión y alta temperatura para lograr el prensado isostático (HIP) y mejorar aún más la densidad del cuerpo verde y las propiedades mecánicas.
- **Combinación de múltiples procesos** : Combinación de moldeo por compresión y prensado isostático para mejorar la eficiencia de producción y el rendimiento del producto.

3.2.6 Requisitos de supresión verde y protección del medio ambiente

La producción moderna de aleaciones de tungsteno enfatiza la protección y seguridad del medio ambiente, y el proceso de prensado de pulvimetalurgia también debe cumplir con los estándares de protección ambiental pertinentes:

- Recuperación y tratamiento de polvo para evitar la contaminación ambiental y riesgos para la salud de los operarios.
- Utilice lubricantes inofensivos o poco tóxicos para reducir la contaminación por residuos del proceso.
- Gestionar el consumo de energía en el proceso de producción y mejorar la eficiencia de la utilización de energía.

resumen

El proceso de prensado pulvimetalúrgico es clave en la formación de varillas de aleación de tungsteno. Tanto el moldeo por compresión como el prensado isostático ofrecen ventajas específicas para satisfacer las diferentes necesidades del producto. La selección y optimización adecuadas de los parámetros del proceso de prensado no solo garantizan la densidad y la uniformidad de la pieza bruta, sino que también proporcionan una base sólida para la sinterización y el tratamiento térmico posteriores. Con el progreso tecnológico, la combinación del prensado isostático y el moldeo por compresión, junto con el desarrollo de nuevos procesos ecológicos, impulsará la tecnología de preparación de varillas de aleación de tungsteno hacia una alta eficiencia, alta calidad y protección ambiental.

3.3 Tecnología de sinterización y control de atmósfera

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La sinterización es un proceso crucial en la preparación de varillas de aleación de tungsteno. Permite que las partículas de polvo se difundan y combinen mediante calentamiento a alta temperatura, logrando así la densificación del polvo y mejorando las propiedades mecánicas. Una tecnología de sinterización adecuada y el control de la atmósfera no solo afectan la densidad, la estructura y el rendimiento del material, sino también la estabilidad dimensional y la consistencia de la calidad del producto final.

3.3.1 Principios básicos y procesos de sinterización

La sinterización es el proceso de calentar el polvo hasta el rango de temperatura de difusión del material (generalmente entre el 70 % y el 90 % del punto de fusión) para permitir la difusión y la unión entre partículas y lograr la densificación. Los principales mecanismos incluyen:

- **Difusión en estado sólido** : los átomos de tungsteno y de elementos de aleación se difunden en la interfaz de las partículas para formar enlaces en los límites de grano.
- **Reducción de la energía de la superficie de las partículas** : reducción de la energía del sistema a través de la difusión interfacial, lo que impulsa el cierre de los poros y la densificación.
- **Crecimiento del grano** : un crecimiento de grano adecuado es beneficioso para la mejora de las propiedades mecánicas, pero un crecimiento excesivo provocará una degradación del rendimiento.

El proceso de sinterización suele dividirse en tres etapas: precalentamiento, aislamiento y enfriamiento. La curva de temperatura y el tiempo de aislamiento deben controlarse con precisión.

3.3.2 Tecnologías comunes de sinterización

3.3.2.1 Sinterización con protección atmosférica

La sinterización se lleva a cabo en una atmósfera protectora (como hidrógeno, argón o gas mixto) para evitar la oxidación de la aleación de tungsteno y promover la difusión y uniformidad de los elementos de la aleación.

- La atmósfera de hidrógeno puede reducir eficazmente los óxidos superficiales y mejorar la densidad de sinterización.
- Una atmósfera inerte de argón es adecuada para evitar los efectos adversos de los gases reductores sobre ciertos elementos de aleación.
- El requisito de pureza de la atmósfera es alto y el contenido de gases de impurezas (oxígeno, nitrógeno, vapor de agua) es inferior al nivel de ppm.

3.3.2.2 Sinterización al vacío

El entorno de alto vacío reduce la oxidación y mejora la pureza y las propiedades mecánicas del material. La sinterización al vacío es adecuada para la preparación de productos de aleaciones de tungsteno de alta calidad.

- El grado de vacío normalmente alcanza $10^{-3} \sim 10^{-5}$ Pa.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Previene eficazmente la introducción de gases de impurezas durante la sinterización y reduce los poros y las inclusiones de impurezas.
- Los costos de inversión en equipos y de operación son elevados.

3.3.2.3 Prensado isostático en caliente (HIP)

Combinando la sinterización a alta temperatura y la tecnología de prensado isostático de alta presión, se puede lograr una densificación ultra alta del polvo de aleación de tungsteno.

- Se aplican simultáneamente alta temperatura y alta presión isotrópica para promover la sinterización de celdas cerradas y la eliminación de poros del polvo.
- Mejora enormemente la densidad y las propiedades mecánicas del material, adecuado para la fabricación de componentes clave.
- El equipo es complejo y costoso, y es adecuado para productos de alto valor añadido.

3.3.3 Control de parámetros del proceso de sinterización

- **Temperatura de sinterización** : Generalmente se controla entre 1450 °C y 1600 °C. Si la temperatura es demasiado baja, la densidad será insuficiente, y si es demasiado alta, puede causar granos gruesos y segregación de componentes.
- **Tiempo de aislamiento** : depende de la composición del material y del tamaño del espacio en blanco, generalmente de 1 a 4 horas para garantizar una difusión y densificación suficientes.
- **Velocidad de calentamiento** : controle razonablemente la velocidad de calentamiento para evitar un estrés térmico excesivo en la pieza en bruto y evitar grietas.
- **Velocidad de enfriamiento** : Enfriamiento moderadamente lento para reducir el estrés térmico y la deformación estructural.

3.3.4 Tecnología de control y efectos de la atmósfera de sinterización

La atmósfera de sinterización juega un papel decisivo en la microestructura y las propiedades de las varillas de aleación de tungsteno.

- **Atmósfera reductora (hidrógeno)** : elimina la capa de óxido de la superficie del polvo y promueve la unión entre partículas.
- **Atmósfera inerte (argón)** : evita que la aleación de tungsteno se corra mediante atmósfera reductora a alta temperatura, adecuada para aleaciones sensibles a la composición.
- **Control de pureza de la atmósfera** : utilice gas de alta pureza y equípelo con un dispositivo de purificación de gas para garantizar un contenido de oxígeno extremadamente bajo y evitar la oxidación y la nitruración.
- **Flujo y presión de aire** : ajuste razonablemente el caudal y la presión del aire para garantizar una atmósfera uniforme y un efecto de conducción de calor.

3.3.5 Monitoreo y pruebas de calidad de sinterización

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- El análisis térmico (como el análisis térmico diferencial DTA y el análisis termogravimétrico TGA) se utiliza para monitorear la temperatura y las características de reacción del proceso de sinterización.
- El efecto de sinterización se evaluó mediante análisis de microestructura, determinación de porosidad y pruebas de propiedades mecánicas.
- Monitorizar la composición de la atmósfera en tiempo real para evitar la infiltración de gases impurezas.
- Se prueban el tamaño y la deformación del producto terminado para garantizar que el producto cumple con los requisitos de diseño.

resumen

La tecnología de sinterización y el control de atmósfera son elementos clave en la preparación de varillas de aleación de tungsteno, que afectan directamente la densidad, la microestructura y las propiedades mecánicas del material. La selección de un método de sinterización adecuado (protección atmosférica, vacío o prensado isostático en caliente), combinado con un control preciso de los parámetros del proceso y una tecnología de purificación de atmósfera, puede mejorar significativamente el rendimiento y la estabilidad integrales de las varillas de aleación de tungsteno. En el futuro, con el desarrollo de la tecnología de equipos y la ciencia de los materiales, el proceso de sinterización será más eficiente e inteligente, ofreciendo una sólida garantía para la fabricación de varillas de aleación de tungsteno de alta calidad.

3.4 Optimización del proceso de tratamiento térmico y densificación

Las varillas de aleación de tungsteno desempeñan un papel fundamental en la mejora de la densidad de los materiales, la optimización de la microestructura y la mejora de las propiedades mecánicas. Un diseño razonable y la optimización del proceso de tratamiento térmico no solo eliminan eficazmente la tensión residual durante la sinterización, sino que también promueven el refinamiento del grano y la distribución uniforme de los elementos de la aleación, mejorando así significativamente el rendimiento integral de la aleación de tungsteno.

3.4.1 Finalidad y función del tratamiento térmico

- **Alivio de tensión** : la tensión térmica generada durante la sinterización y el enfriamiento se libera a través del tratamiento térmico para evitar el agrietamiento y la deformación del cuerpo verde.
- **Promoción de la densificación** : el tratamiento térmico de alta temperatura promueve el proceso de difusión, llena los microporos y aumenta la densidad del material.
- **Control de grano** : controla el tamaño del grano, refina la estructura, mejora la tenacidad y la resistencia.
- **Homogeneización de elementos de aleación** : acelera la difusión de los elementos de aleación y evita la segregación de la composición.
- **Mejorar las propiedades mecánicas** : como aumentar la dureza, el límite elástico y la ductilidad.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.4.2 Principales tipos de procesos de tratamiento térmico

3.4.2.1 Tratamiento de la solución

- El calentamiento a alta temperatura hasta la temperatura de la solución (generalmente 1200~1400 °C) permite que los elementos de aleación se disuelvan completamente en la matriz.
- Después de mantenerlo caliente durante un cierto período de tiempo, enfríelo rápidamente para fijar una estructura de solución sólida uniforme.
- Mejora eficazmente la uniformidad y las propiedades mecánicas de los materiales.

3.4.2.2 Procesamiento oportuno

- La precipitación de los elementos de aleación y las fases de fortalecimiento se promueven manteniendo la aleación a temperaturas medias y bajas (500~800 °C).
- Mejorar la dureza y resistencia del material manteniendo la ductilidad adecuada.
- La selección razonable de la temperatura y el tiempo de envejecimiento es la clave para optimizar el rendimiento.

3.4.2.3 Recocido

- El recocido a baja temperatura se utiliza para eliminar la tensión interna y mejorar la tenacidad del material.
- La temperatura generalmente se controla entre 600 y 900 °C y el tiempo de aislamiento se ajusta según el espesor del material.
- Adecuado para mejorar el rendimiento del procesamiento posterior.

3.4.3 Optimización de los parámetros del proceso de tratamiento térmico

- **Control de temperatura** : controla con precisión la temperatura de calentamiento para evitar quemaduras excesivas o temperatura insuficiente.
- **Velocidad de calentamiento** : Calentamiento lento para evitar el choque térmico y reducir el riesgo de grietas.
- **Tiempo de retención** : asegúrese de que el efecto del tratamiento térmico sea suficiente y evite el crecimiento de granos debido a un tiempo demasiado prolongado.
- **Método de enfriamiento** : elija enfriamiento rápido o enfriamiento lento según los requisitos de rendimiento, lo que afecta la estructura y el rendimiento del material.

3.4.4 Tecnologías auxiliares para el proceso de densificación

- **Tratamiento térmico de prensado isostático en caliente (HIP)** : la sinterización y la densificación se completan simultáneamente bajo alta temperatura y alta presión, lo que mejora en gran medida la densidad del material.
- **Combinación de HIP + tratamiento térmico** : maximice el rendimiento mediante la densificación HIP seguida de un tratamiento térmico específico.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Tecnología de tratamiento térmico por pulsos** : utilice calentamiento por pulsos rápido para promover la difusión, reducir el tiempo de tratamiento térmico y mejorar la eficiencia de producción.

3.4.5 Relación entre la microestructura y el rendimiento

- El tratamiento térmico promueve la difusión de los límites de grano, reduce la porosidad y mejora la fuerza de unión.
- El refinamiento del grano ayuda a mejorar la tenacidad del material y la resistencia al impacto.
- La distribución uniforme de los elementos de aleación mejora las propiedades mecánicas generales y la resistencia a la corrosión.

3.4.6 Métodos de control de calidad y pruebas

- Se utilizó microscopía para analizar los cambios microestructurales antes y después del tratamiento térmico.
- El efecto de densificación se evaluó mediante medición de densidad y análisis de porosidad.
- Las pruebas de propiedades mecánicas verifican el efecto del tratamiento térmico sobre la resistencia, la dureza y la ductilidad.
- Las pruebas de estrés (como el análisis de estrés residual con rayos X) confirman el efecto de alivio del estrés.

resumen

El tratamiento térmico y la densificación son componentes técnicos clave en la fabricación de varillas de aleación de tungsteno. Mediante el diseño científico de los parámetros del proceso de tratamiento térmico y la combinación de tecnología de densificación avanzada, se puede mejorar eficazmente la uniformidad de la estructura interna y las propiedades mecánicas del material para cumplir con los estrictos requisitos de las aplicaciones de alta gama para el rendimiento de las varillas de aleación de tungsteno. En el futuro, con el desarrollo de nuevos equipos de tratamiento térmico y tecnología de control inteligente, el proceso de tratamiento térmico de las varillas de aleación de tungsteno se desarrollará de forma más precisa, eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

3.5 Tecnología de mecanizado y tratamiento de superficies (rectificado, pulido, torneado)

Las varillas de aleación de tungsteno suelen requerir mecanizado y tratamiento superficial para cumplir con los requisitos de tamaño y calidad de la superficie. Debido a su alta dureza y fragilidad, las aleaciones de tungsteno son difíciles de procesar. La selección y optimización adecuadas de los procesos de mecanizado y tratamiento superficial son cruciales para garantizar la precisión y el rendimiento del producto.

3.5.1 Características de mecanizado de la varilla de aleación de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Alta dureza y tenacidad** : la aleación de tungsteno tiene una dureza de HV300 o superior y tiene buena tenacidad, pero al mismo tiempo el material es frágil y propenso a agrietarse durante el procesamiento.
- **Fuerte resistencia al desgaste** : las herramientas se desgastan rápidamente al procesar aleación de tungsteno, por lo que se requieren herramientas de alta dureza y resistencia al desgaste.
- **conductividad térmica** : favorece la rápida disipación del calor del procesamiento, pero la alta dureza conduce a grandes fuerzas de corte.
- **Dificultades de procesamiento** : Es probable que se produzcan microgrietas, quemaduras y rugosidad en la superficie durante el proceso de corte, y los parámetros de procesamiento deben controlarse estrictamente.

3.5.2 Molienda

El rectificado es el método de acabado más comúnmente utilizado en el procesamiento de varillas de aleación de tungsteno, que se utiliza principalmente para mejorar la precisión dimensional y la rugosidad de la superficie.

- **Herramientas de rectificado** : Se utiliza una muela de diamante o una muela de CBN, que es adecuada para procesar aleaciones de tungsteno debido a su alta dureza y resistencia al desgaste.
- **Parámetros del proceso de molienda** :
 - Velocidad de la muela abrasiva: determinada por la dureza del material y el material de la muela abrasiva, generalmente entre 20 000 y 40 000 rpm.
 - Velocidad de alimentación: lenta y uniforme para evitar sobrecalentamiento y quemaduras.
 - Refrigeración y lubricación: utilice refrigerantes a base de agua o aceite para evitar daños al material causados por temperaturas de procesamiento excesivas.
- **Método de molienda** :
 - El rectificado cilíndrico externo se utiliza para el mecanizado del diámetro de varillas de aleación de tungsteno.
 - El rectificado de orificios internos se utiliza para ajustar el tamaño del orificio.
- **Nota** :
 - Controle el margen de molienda para evitar grietas causadas por un procesamiento excesivo.
 - Rectifique la muela de amolar periódicamente para mantener la eficiencia del rectificado y la calidad de la superficie.

3.5.3 Pulido

El pulido se utiliza principalmente para mejorar el acabado de la superficie de las varillas de aleación de tungsteno, reducir los defectos de la superficie y mejorar la resistencia a la corrosión y la estética.

- **Material de pulido** : utilice pasta de pulido de diamante o agente de pulido de alúmina y seleccione diferentes tamaños de partículas según los requisitos de pulido.
- **Método de pulido** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- El pulido manual es adecuado para lotes pequeños o piezas especiales.
- El equipo de pulido mecánico es adecuado para la producción a gran escala, mejorando la eficiencia y la consistencia.

- **Proceso de pulido :**

1. Pulido basto: elimina grandes arañazos y desniveles en la superficie.
2. Pulido fino: refina aún más la superficie y mejora la suavidad.
3. Pulido ultrafino: obtiene un efecto espejo, la rugosidad de la superficie Ra puede alcanzar menos de 0,01 μm .

- **Notas de pulido :**

- Mantenga limpia la superficie pulida para evitar rayones por impurezas.
- Controlar el tiempo y la presión del pulido para evitar un desgaste excesivo del material.

3.5.4 Torneado

El torneado es un proceso importante para el modelado y procesamiento de dimensiones de varillas de aleación de tungsteno, y es adecuado para el procesamiento de ejes, cilindros y otras formas.

- **Selección de herramientas :**

- Utilice herramientas de carburo o de diamante para garantizar un corte preciso y resistencia al desgaste.
- Los parámetros de geometría de la herramienta deben optimizarse de acuerdo con las características de la aleación de tungsteno para reducir las fuerzas de corte y las vibraciones.

- **Parámetros de procesamiento :**

- La velocidad de corte es generalmente baja, controlada entre 20 y 60 m/min.
- La velocidad de avance y la profundidad de corte se ajustan según la dureza de la pieza de trabajo y la vida útil de la herramienta.
- Se debe utilizar un enfriamiento adecuado para evitar daños térmicos.

- **Método de giro :**

- El torneado desbaste se utiliza para eliminar rápidamente el exceso de material.
- El torneado de acabado se utiliza para lograr las dimensiones diseñadas y la calidad de la superficie.

- **Dificultades de giro :**

- astillado durante el corte.
- Evite grietas o desprendimientos del material durante el procesamiento.

3.5.5 Función auxiliar de la tecnología de tratamiento de superficies

- **Mecanizado después del tratamiento térmico :** el tratamiento térmico a menudo provoca cambios dimensionales y el mecanizado puede corregir y mejorar la precisión dimensional.
- **Tratamiento de fortalecimiento de superficies :** mejora la dureza de la superficie y la resistencia al desgaste mediante granallado, tratamiento de superficies con láser y otras tecnologías.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Recubrimiento anticorrosión** : se aplica una capa protectora sobre la superficie de la varilla de aleación de tungsteno para mejorar la resistencia a la corrosión.

3.5.6 Control de calidad del mecanizado y tratamiento de superficies

- **Detección de dimensiones** : utilice una máquina de medición de tres coordenadas (CMM), un medidor de diámetro láser y otros equipos para garantizar la precisión dimensional.
- **Detección de rugosidad de la superficie** : utilice un medidor de rugosidad para medir y garantizar que se cumplan los indicadores de diseño.
- **Inspección de microestructura** : analiza los cambios en la estructura de la superficie después del procesamiento y detecta si se genera una zona afectada por el calor.
- **Pruebas de rendimiento** : pruebas de propiedades mecánicas y vida útil por fatiga para verificar el impacto de la tecnología de procesamiento en las propiedades del material.

resumen

La tecnología de mecanizado y tratamiento de superficies es fundamental en la fabricación de varillas de aleación de tungsteno. Dada la alta dureza y fragilidad de la aleación de tungsteno, la selección de procesos adecuados de rectificado, pulido y torneado, junto con parámetros de procesamiento optimizados y equipos avanzados, garantiza la precisión dimensional y la calidad superficial del producto, satisfaciendo así las necesidades de aplicaciones de alta gama. Asimismo, el refuerzo de superficies y el tratamiento anticorrosivo mejoran aún más el rendimiento y la vida útil de las varillas de aleación de tungsteno.

3.6 Nuevas tecnologías de fabricación: extrusión, laminación, fabricación aditiva

Con el progreso continuo de la ciencia de los materiales y la tecnología de fabricación, aunque el proceso tradicional de pulvimetalurgia ocupa una posición dominante en la producción de varillas de aleación de tungsteno, también tiene algunas limitaciones, como densidad limitada y uniformidad organizativa, baja complejidad de conformado, etc. Para satisfacer las necesidades de varillas de aleación de tungsteno de alto rendimiento en los campos aeroespacial, militar, médico y otros para formas complejas, alta densidad y excelentes propiedades mecánicas, nuevas tecnologías de preparación como extrusión, laminado y fabricación aditiva se han introducido gradualmente y desarrollado rápidamente en los últimos años, enriqueciendo enormemente los métodos de fabricación de varillas de aleación de tungsteno.

3.6.1 Tecnología de extrusión

La extrusión es un proceso de formación continua en el que las piezas de aleación de tungsteno se someten a presión a través de la abertura de la matriz a alta temperatura o temperatura ambiente para permitir que el material fluya plásticamente a lo largo de la abertura de la matriz para obtener la forma y el tamaño transversal deseados.

Características del proceso de extrusión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Alta deformación plástica** : a través de una gran deformación del procesamiento plástico, se refinan los granos y se mejoran las propiedades mecánicas del material.
- **Mejora de la densidad** : el proceso de extrusión promueve el cierre de los poros internos y la densificación del tejido.
- **Forma flexible** : se pueden procesar varias formas de sección transversal para cumplir con requisitos estructurales complejos.
- **Alta eficiencia de producción** : adecuado para la producción continua de lotes de barras largas.

Método de extrusión

- **Extrusión directa** : la dirección de la palanquilla y de la extrusión son las mismas, la estructura del equipo es simple y es adecuada para materiales de gran tamaño.
- **Extrusión indirecta** : la matriz se mueve y el tocho permanece estacionario, lo que reduce la fricción y la presión de extrusión.
- **Extrusión en caliente** : Extrusión a alta temperatura para mejorar la plasticidad del material y reducir la fuerza de procesamiento.
- **Extrusión en frío** : Extrusión a temperatura ambiente para mejorar la calidad superficial y las propiedades mecánicas del producto terminado.

Parámetros del proceso de extrusión

- La temperatura, la velocidad y el diseño de la matriz de extrusión tienen un impacto significativo en la calidad del producto terminado.
- Cuanto mayor sea la relación de extrusión (relación del área de la sección transversal), más completa será la deformación y mejor será la densidad y el rendimiento del material.
- Los lubricantes se utilizan para reducir la fricción y mejorar la calidad de la superficie.

Aplicación de la tecnología de extrusión

- Preparación de varillas de aleaciones de tungsteno de alta resistencia y alta densidad , especialmente aquellas de gran tamaño y sección transversal compleja.
- A través de múltiples procesos de extrusión, los granos se refinan aún más para mejorar la tenacidad y la resistencia al desgaste.

3.6.2 Tecnología de laminación

El laminado es un método de procesamiento que utiliza rodillos para aplicar presión a barras de aleación de tungsteno para provocar la deformación plástica del material, reducir el tamaño de la sección transversal y mejorar la estructura organizativa.

Características del proceso de laminación

- **Fuerte continuidad** : adecuado para la producción en masa de barras y tiras.
- **Refinamiento de grano** : la deformación plástica promueve la formación de límites de grano y mejora la tenacidad del material.
- **Alta precisión dimensional** : el tamaño se puede controlar con precisión a través de múltiples pasadas de laminación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Buena calidad de superficie** : la superficie después del laminado es relativamente lisa, lo que es conveniente para el procesamiento posterior.

Método de laminación

- **Laminado en caliente** : realizado a alta temperatura, el material tiene buena plasticidad y es fácil de deformar.
- **Laminación en frío** : procesamiento a temperatura ambiente para aumentar la dureza y resistencia de la superficie y mejorar las propiedades mecánicas.
- **Laminado inverso** : laminado en direcciones alternas para mejorar la uniformidad de la estructura.
- **Laminado de múltiples rodillos** : adecuado para el conformado de secciones transversales complejas.

Parámetros del proceso de laminación

- La temperatura y la velocidad de laminación afectan directamente la estructura y las propiedades del material.
- El diseño del esquema de laminación de múltiples pasadas debe ser científico para controlar la deformación y el espacio.
- Los materiales de los rodillos y la tecnología de lubricación garantizan la calidad de la superficie y la vida útil del equipo.

Aplicación de la tecnología de laminación

- Prepare varillas, tiras y láminas delgadas de aleación de tungsteno.
- Se utiliza para productos de aleación de tungsteno con altos requisitos de precisión dimensional y calidad de superficie.

3.6.3 Tecnología de fabricación aditiva (impresión 3D)

La tecnología de fabricación aditiva, especialmente las tecnologías de impresión 3D como la fusión por láser de polvo metálico (fusión selectiva por láser, SLM) y la fusión por haz de electrones (EBM), proporcionan un nuevo camino para la personalización y la fabricación de estructuras complejas de varillas de aleación de tungsteno.

Características de la fabricación aditiva

- **Fabricación de estructuras complejas** : se pueden fabricar formas geométricas complejas que son difíciles de formar mediante procesos tradicionales, como cavidades internas y estructuras de rejilla.
- **Alta tasa de utilización de material** : el polvo se forma directamente para reducir el desperdicio de material.
- **Gran libertad de diseño** : el diseño se puede ajustar rápidamente según la demanda, acortando el ciclo de desarrollo del producto.
- **Integración funcional** : puede realizar la fabricación de estructuras compuestas multifuncionales.

Desafíos del proceso de fabricación aditiva

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- El alto punto de fusión y la alta conductividad térmica de la aleación de tungsteno dificultan el control de la temperatura del baño fundido.
- La rápida fusión y enfriamiento del polvo mediante láser o haz de electrones puede provocar fácilmente estrés térmico y grietas.
- La fluidez y la uniformidad de distribución del polvo tienen un impacto significativo en la calidad del conformado.
- El costo del equipo es alto, los parámetros del proceso son complejos y se requiere un desarrollo especial para las aleaciones de tungsteno.

Progreso tecnológico

- Las nuevas fuentes de haz de alta energía y las estrategias de escaneo reducen el estrés térmico y mejoran la calidad del conformado.
- El pretratamiento del polvo y la optimización del control de la atmósfera pueden reducir los defectos.
- Los procesos de posprocesamiento (como el prensado isostático en caliente) se combinan con la impresión 3D para mejorar las propiedades del material.

Perspectivas de aplicación de la fabricación aditiva

- Producción personalizada de piezas de aleación de tungsteno de lotes pequeños y alta complejidad.
- Prototipado rápido y muestras de pruebas funcionales.
- La industria aeroespacial, la industria nuclear, etc. tienen demandas de estructuras complejas y piezas de aleación de tungsteno de alto rendimiento.

resumen

La extrusión, el laminado y la fabricación aditiva ofrecen diversas rutas técnicas para la producción de varillas de aleación de tungsteno. Las tecnologías de extrusión y laminado refinan los granos y aumentan la densidad mediante deformación plástica, lo que resulta adecuado para la producción en masa y el control de tamaño. Por otro lado, la fabricación aditiva se ha convertido en la tendencia futura para la fabricación de piezas complejas de aleación de tungsteno, gracias a su libertad de diseño estructural y al ahorro de material. En combinación con los procesos tradicionales de pulvimetalurgia, la aplicación coordinada de estas nuevas tecnologías impulsará el desarrollo de la fabricación de varillas de aleación de tungsteno hacia un alto rendimiento, multifuncionalidad e inteligencia.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 4 Pruebas de rendimiento y evaluación de la calidad de las varillas de aleación de tungsteno

4.1 Inspección de la apariencia y la dimensión geométrica

Como material funcional de alto rendimiento, las varillas de aleación de tungsteno se utilizan ampliamente en sectores clave como la industria aeroespacial, la energía nuclear, la medicina y la industria militar. Su calidad estética y precisión dimensional geométrica influyen directamente en su posterior procesamiento, ensamblaje y rendimiento. Por lo tanto, las pruebas estéticas y dimensionales son el primer paso en la evaluación de calidad de las varillas de aleación de tungsteno, y también un paso importante que debe superarse antes de que el producto salga de fábrica.

4.1.1 Requisitos básicos para la calidad de la apariencia

se evalúan principalmente para detectar defectos visibles en la superficie que afecten su uso o fiabilidad, y se evalúan según las normas nacionales pertinentes (como GB/T 21114 y ASTM B777) o las especificaciones definidas por el usuario. Los componentes comunes de la inspección incluyen:

- **Acabado de la superficie** : La superficie debe estar libre de rayones evidentes, picaduras, grietas de sinterización, rebabas de metal, incrustaciones de óxido y otros defectos.
- **Color y consistencia** : La superficie debe tener un brillo metálico uniforme y no debe presentar decoloración por oxidación, manchas, puntos, etc.
- **Inspección de defectos** : concéntrese en los siguientes defectos superficiales típicos:
 - Microgrietas y fisuras;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Rebabas y daños en los bordes;
 - Agujeros de sinterización o puntos sueltos;
 - Óxido, decoloración o manchas de aceite;
 - Abolladuras locales, deformaciones, dobleces y otras deformaciones.
- **Condición de la cara final** : Ambos extremos deben ser planos, sin bordes descascarados, grietas o faltantes evidentes de material, y la verticalidad de las caras finales debe cumplir con los requisitos estándar.

Herramientas y métodos de detección:

- **Inspección visual** : inspección visual o inspección asistida por lupa bajo luz natural o iluminación estándar.
- **Plataforma de observación iluminada** : utilice un fondo de luz fuerte para comprobar si hay pequeñas grietas en la superficie o diferencias de color.
- **Auxiliar de limpieza de superficies** : Observe la calidad real de la superficie del metal después de eliminar el aceite y la suciedad de la superficie.

La producción a nivel de fábrica a menudo utiliza una combinación de “inspección completa + inspección aleatoria” para realizar inspecciones de apariencia, mientras que la inspección visual del 100 % generalmente se implementa para componentes militares o aeroespaciales.

4.1.2 Elementos de medición de dimensiones geométricas

Las pruebas de dimensión geométrica garantizan que la varilla de aleación de tungsteno cumpla con los requisitos de precisión especificados en los planos de diseño o contratos. Los elementos de medición convencionales incluyen:

- **Longitud** : puede ser una longitud fija o una longitud arbitraria según el propósito de diseño de la barra, generalmente controlada con una precisión de $\pm 0,5$ mm o superior.
- **Diámetro** : Se requiere que la redondez y la tolerancia de la barra sean altas, y la aplicación de precisión se puede controlar dentro de $\pm 0,01$ mm.
- **Ovalidad** : controla la diferencia entre los dos diámetros de la sección transversal, generalmente no superando los 0,05 mm.
- **Verticalidad/ planitud del extremo** : La cara del extremo de la varilla de aleación de tungsteno debe ser perpendicular a la línea central de la varilla.
- **Rectitud (curvatura)** : Mide la desviación de rectitud de la varilla a lo largo de toda su longitud, generalmente expresada en "mm/m", por ejemplo $\leq 0,5$ mm/m.
- **Concentricidad (si aplica)** : Para barras huecas o barras estructurales torneadas, verifique la desviación de concentricidad interna y externa.

Instrumentos de prueba:

- **Calibradores Vernier y micrómetros** : se utilizan para medir rápidamente la longitud y el diámetro, adecuados para la confirmación preliminar del tamaño.
- **Micrómetro exterior, micrómetro interior** : se utiliza para medir diámetros con alta precisión.
- **Indicador de cuadrante + marco en V** : se utiliza para medir rectitud y curvatura.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Medidor de diámetro láser** : realiza mediciones en línea de alta precisión sin contacto, adecuado para líneas de producción automatizadas.
- **Máquina de medición de coordenadas (CMM)** : se utiliza para la inspección precisa de estructuras geométricas complejas y para proporcionar datos de coordenadas de tamaño completo.

4.1.3 Grados de tolerancia dimensional y base estándar

Las varillas de aleación de tungsteno varían según las aplicaciones del producto y las normas internacionales. Las especificaciones estándar típicas incluyen:

- **Norma Nacional China (GB/T 21114)** : especifica el diámetro, la longitud y el grado de tolerancia de las varillas de aleación de tungsteno de diferentes tamaños.
- **Norma americana (ASTM B777)** : Normativa detallada sobre el control dimensional de productos de aleación de tungsteno de alta densidad.
- **Estándares definidos por el usuario** : Los clientes de la industria aeroespacial y nuclear a menudo requieren dimensiones y tolerancias geométricas más estrictas que los estándares nacionales.

Referencia de tolerancia dimensional común:

| Rango de diámetro de varilla | Tolerancia normal (mm) | Tolerancia de precisión (mm) |
|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| ≤10 mm | ±0,10 | ±0,02 |
| 10–30 milímetros | ±0,15 | ±0,03 |
| >30 milímetros | ±0,20 | ±0,05 |

4.1.4 Pruebas automatizadas y registro de datos

Con el desarrollo de la Industria 4.0, cada vez más empresas están introduciendo tecnologías de pruebas automatizadas para mejorar la eficiencia del control de calidad:

- **Sistema de reconocimiento visual** : combina algoritmos de reconocimiento de vídeo e imágenes para lograr el reconocimiento de defectos de apariencia en línea.
- **Escáner de tamaño láser** : coopera con el estante de alimentación automático para lograr la detección automática completa de la longitud y el diámetro de la barra.
- **Sistema de base de datos de calidad** : registre los datos de prueba en tiempo real y cárguelos en la base de datos para lograr la gestión de trazabilidad de lotes.

4.1.5 Frecuencia de las pruebas y criterios de evaluación

La frecuencia de las pruebas se establece según el lote de producción, el uso y los requisitos del cliente:

- **Entrega por lotes** : Se adopta la inspección de muestreo, como la clasificación AQL según el estándar GB/T 2828.1.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Uso de energía militar/nuclear** : inspección completa + inspección aleatoria, las dimensiones clave y los indicadores clave deben probarse uno por uno.
- **Criterios de descarte y retrabajo** :
 - Los productos que presentan grietas penetrantes, rayones profundos, oxidación en áreas extensas y granallado en la superficie del extremo se consideran no calificados.
 - Las dimensiones que exceden el rango de tolerancia y no se pueden corregir mediante un procesamiento secundario también se consideran no calificadas.

resumen

La inspección de la apariencia y las dimensiones geométricas es fundamental en el control de calidad de las varillas de aleación de tungsteno. Esta inspección está relacionada con la calificación básica del producto y afecta la adaptación del ensamblaje y la fiabilidad en aplicaciones posteriores. Con la introducción de métodos de prueba automatizados y la mejora de los estándares de prueba, las empresas modernas de fabricación de varillas de aleación de tungsteno están avanzando hacia una mayor consistencia de calidad, una mayor eficiencia en las pruebas y una gestión de trazabilidad más completa.

4.2 Métodos de análisis de densidad y microestructura

La densidad y la microestructura son indicadores importantes para medir la uniformidad, la densidad y la madurez del proceso de las varillas de aleación de tungsteno, y tienen un impacto directo en sus propiedades mecánicas, térmicas y vida útil. Las pruebas de densidad pueden determinar indirectamente la densidad de sinterización y la distribución de poros; el análisis de microestructura puede revelar información clave como la estructura del grano, la distribución de fases y los defectos de poros. Por lo tanto, establecer un mecanismo sistemático de evaluación de la densidad y la organización es fundamental para garantizar una producción de alta calidad de varillas de aleación de tungsteno.

4.2.1 Importancia y métodos de detección de densidad

Las varillas de aleación de tungsteno se calculan generalmente en función de su composición química. Por ejemplo, en sistemas W-Ni-Fe o W-Ni-Cu, la densidad teórica puede alcanzar entre 17,0 y 18,5 g/cm³. La densidad, uniformidad y precisión reales del producto reflejan su calidad de sinterización, su nivel de densificación y la presencia de defectos (como poros cerrados, inclusiones, desprendimiento, etc.).

(1) Método de Arquímedes (método de drenaje de líquidos)

Principio : Según el principio de Arquímedes, la diferencia entre la muestra pesada en el aire y en el líquido se puede utilizar para calcular el volumen, y la densidad se puede obtener combinando las masas.

paso :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Utilice agua desionizada o etanol como líquido de inmersión;
- Pesar el peso seco (W1) y el peso en la solución de inmersión (W2);
- Calcular la densidad: $\rho = W1 / (W1 - W2) \times \rho_{\text{líquido}}$.

Ventajas : Fácil de operar, adecuado para la mayoría de muestras sólidas.

Limitaciones : Inexacto para muestras con poros cerrados o superficies imperfectas.

(2) Método del picnómetro de helio (método de sustitución de gas)

Principio : Midiendo la diferencia de presión entre la cámara de muestra y la cámara de referencia, se calculan el volumen y la densidad de la muestra.

Ventajas :

- Alta precisión (hasta $\pm 0,001 \text{ g/cm}^3$);
- Puede detectar materiales microporosos;
- Adecuado para productos de aleación de tungsteno de precisión de alta gama.

Equipo representativo : AccuPyc , Micromeritics y otros densitómetros de gas automáticos.

(3) Método de cálculo de rayos X (densidad de vóxeles)

Combinado con equipos de escaneo industrial por rayos X o TC, se calcula la densidad de vóxeles de la muestra a través de la reconstrucción de imágenes, lo cual es adecuado para piezas estructurales con formas complejas o que no se pueden tocar.

4.2.2 Propósito e indicadores clave del análisis de microestructura

La aleación de tungsteno refleja sus características evolutivas durante la sinterización, el tratamiento térmico y el procesamiento posterior. Los siguientes indicadores clave pueden evaluarse mediante análisis microscópico:

- Tamaño y distribución del grano;
- Distribución de fases de elementos de aleación (fase W, fase basada en Ni/Fe/Cu) y claridad de límites de fases;
- El número y la morfología de los poros o inclusiones;
- uniformidad y direccionalidad del tejido;
- Precipitación de segunda fase y características de la estructura eutéctica.

4.2.3 Técnicas de análisis de microestructura

(1) Microscopio metalográfico óptico (OM)

usar :

- Observar la morfología del grano, los poros y la estructura macroscópica;
- Los límites de fase se pueden visualizar con soluciones de grabado estándar.

Proceso de preparación de muestras :

- Incrustación, esmerilado y pulido;
- Grabado químico (reactivos comunes: solución de cloruro de hierro-ácido clorhídrico);
- Seleccione el aumento apropiado para la observación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Ventajas :

- Alta resolución, capaz de observar estructuras a nanoescala;
- Se puede combinar con un espectrómetro de energía dispersiva (EDS) para analizar la distribución de elementos;
- Detecta microdefectos como orificios de sinterización, fuentes de iniciación de grietas y uniones de interfaces.

Ámbito de aplicación :

- Investigación de interfaz de aleación, estructura de límite de grano e identificación de microfisuras;
- Análisis del comportamiento de segregación local y difusión de elementos de aleación.

(3) Microscopía electrónica de transmisión (MET)

usar :

- Estudiar la fase de precipitación, dislocación, límite de micrograno, etc. en aleación de tungsteno;
- Analizar mecanismos de fortalecimiento a nanoescala, fases amorfas y capas de reacción interfaciales.

límite :

- La preparación de muestras es compleja y es adecuada para la investigación científica o el desarrollo de materiales de alta gama.

(4) Espectroscopía de energía (EDS/WDS)

- **EDS** : Análisis elemental rápido, utilizado junto con SEM;
- **WDS** : se utiliza para la detección de elementos de bajo contenido y alta precisión (como impurezas de oxígeno y carbono);
- Se utiliza para analizar la composición de cada fase y la uniformidad de la distribución de elementos dentro de la organización.

(5) Difracción de rayos X (DRX)

Objetivo :

- Identificar la estructura cristalina y los tipos de fases presentes en las aleaciones de tungsteno;
- Detectar si existen impurezas como óxidos y carburos;
- La relación de contenido de la fase principal y la fase secundaria se puede analizar cuantitativamente.

4.2.4 Defectos organizativos y criterios de evaluación de la calidad

Los defectos microestructurales comunes incluyen:

- Agujeros de sinterización o poros residuales;
- Estructura "núcleo-capa" causada por la segregación de elementos;
- Partículas no unidas o interfaz de sinterización débilmente unida;
- La segunda fase está distribuida de forma desigual o está excesivamente precipitada;
- Engrosamiento de los granos debido al tratamiento térmico.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

criterios de juicio :

- GB/T 13298 (Reglas generales para el análisis de estructuras metalográficas);
- ASTM E1245 (Evaluación de inclusiones en metales);
- Normas de control interno de la empresa: normalmente establecen rangos aceptables para la porosidad, el tamaño de grano y el grado de inclusión.

4.2.5 Análisis de la relación entre densidad y organización

Las pruebas de densidad y la observación organizacional se verifican mutuamente y son medios importantes para evaluar la calidad de los productos de aleación de tungsteno.

- Una alta densidad corresponde a menudo a una sinterización suficiente y a una baja porosidad;
- La buena uniformidad de organización y los granos finos conducen a propiedades mecánicas superiores;
- Si la densidad es baja y la estructura muestra una gran cantidad de poros cerrados, puede deberse a una temperatura de sinterización insuficiente o a una mala compactación del polvo;
- Si la densidad está calificada pero hay segregación estructural, puede deberse a una distribución desigual de las materias primas o a un tratamiento térmico desigual.

resumen

El análisis de densidad y microestructura es fundamental para la evaluación de la calidad de las varillas de aleación de tungsteno, ya que refleja plenamente las características estructurales internas y la densidad del material. La medición precisa de la densidad se realiza mediante el método de Arquímedes, el método de gravedad específica de los gases, el método de rayos X, etc., y se lleva a cabo una investigación exhaustiva de la morfología y composición organizativa mediante la combinación de microscopía óptica, SEM, EDS, XRD y otros métodos. Esto no solo garantiza que el producto cumpla con los estándares técnicos, sino que también proporciona una base científica para la optimización de procesos y la investigación y el desarrollo de nuevos materiales. Con la popularización de los instrumentos de prueba de alta resolución y la introducción de plataformas de prueba automatizadas, el control organizativo y el aseguramiento de la calidad de las varillas de aleación de tungsteno están avanzando gradualmente hacia un nivel superior.

4.3 Normas de ensayo de propiedades mecánicas (ASTM, GB, ISO).

Como material estructural funcional con alta gravedad específica y excelente tenacidad, las propiedades mecánicas de las varillas de aleación de tungsteno determinan directamente su seguridad de servicio en entornos hostiles, como altas tensiones, cargas e impactos. Parámetros como la resistencia a la tracción, el límite elástico, la elongación, la dureza, la tenacidad al impacto y la resistencia a la fatiga son la base fundamental para medir su calidad y aplicabilidad en ingeniería. Para garantizar la científicidad y la comparabilidad de los resultados, las pruebas de propiedades

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mecánicas deben realizarse en estricta conformidad con el sistema de normas internacionalmente aceptado (ASTM, GB, ISO).

4.3.1 Ensayo de propiedades de tracción

El método más básico y común para probar las propiedades mecánicas de las varillas de aleación de tungsteno. Mediante la aplicación de tensión axial, se mide el comportamiento tensión-deformación antes de la fractura para obtener indicadores clave como la resistencia a la tracción, el límite elástico y la elongación.

Normas de prueba y ámbito de aplicación:

- **ASTM E8/E8M** "Método estándar para pruebas de tracción de materiales metálicos": aplicable a barras de metal, placas y muestras de tamaño pequeño;
- **GB/T 228.1** "Ensayo de tracción de materiales metálicos - Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente": Esta es la norma nacional general de China;
- **ISO 6892-1** "Ensayos de tracción en materiales metálicos - Parte 1: Métodos de ensayo a temperatura ambiente": norma aceptada internacionalmente, básicamente equivalente a GB.

Definiciones de parámetros clave:

- **Resistencia a la tracción (UTS)** : La tensión máxima que puede soportar un material, en MPa;
- **Límite elástico (YS)** : la tensión mínima a la que un material sufre deformación plástica;
- **Elongación (EI)** : Elongación de la muestra antes de la fractura, que mide la tenacidad del material;
- **Tasa de contracción seccional (Z)** : El grado de estrangulamiento en la fractura, que refleja plasticidad.

Preparación de muestras y control de condición:

- Forma de la muestra: barra redonda estándar (como $\Phi 6\sim\Phi 12$ mm) o barra plana;
- Control de velocidad de carga: como 0,5 ~ 2 mm/min;
- Condiciones de temperatura: generalmente temperatura ambiente (20 ± 5 °C), se puede realizar estiramiento a alta temperatura si es necesario.

Nota:

- aleación de tungsteno, la pieza de sujeción debe estar diseñada para evitar deslizamiento o concentración de tensión;
- Se debe utilizar una máquina de ensayos universal electrónica con alta rigidez y una precisión de carga de $\pm 1\%$;
- Después del estiramiento, se deben tomar fotografías de la fractura para analizar el mecanismo de fractura.

4.3.2 Prueba de dureza

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La dureza es un indicador importante para evaluar la capacidad de la aleación de tungsteno para resistir la deformación plástica local y se utiliza ampliamente en el control de procesos, la clasificación de productos y la clasificación de calidad.

Métodos y normas de prueba comunes:

- **Dureza Brinell (HB) :**
 - Adecuado para aleaciones de tungsteno de dureza media y baja;
 - Norma: ASTM E10 / GB/T 231.1;
 - Rango de carga: 5003000 kgf , diámetro de cabeza esférica 2.510 mm.
- **Dureza Rockwell (HRC/HRB) :**
 - Adecuado para pruebas de dureza superficial de barras terminadas;
 - Norma: ASTM E18 / GB/T 230.1;
 - La aleación de tungsteno suele estar entre 6080 HRB o hasta 2040 HRC (algunos estados de tratamiento térmico).
- **Dureza Vickers (HV) :**
 - Se utiliza para pruebas de microdureza de aleaciones de tungsteno de tamaño pequeño o microáreas;
 - Norma: ASTM E384 / GB/T 4340.1;
 - Aplicaciones: interfaz, refinamiento de grano, Evaluación de la estructura de microaleaciones .

Otras notas:

- Es necesario pulir la superficie hasta obtener un acabado de espejo antes de realizar la prueba para garantizar que la huella sea clara y medible;
- El punto de prueba debe estar alejado de bordes, grietas y poros;
- Para aleaciones de tungsteno de alta dureza, se recomienda utilizar un penetrador duro y una solución de prueba de carga baja.

4.3.3 Prueba de tenacidad al impacto

La prueba de impacto evalúa la capacidad del material para absorber energía bajo cargas dinámicas, lo que refleja su resistencia a la fractura frágil. Es un indicador fundamental de la aleación de tungsteno en aplicaciones de perforación de blindaje y cargas dinámicas.

Normas comunes:

- **ASTM E23 / GB/T 229** : Norma de prueba de impacto Charpy de metal;
- **ISO 148-1** : Norma de ensayo de impacto para materiales metálicos.

Requisitos de muestra:

- Tamaño estándar: 55 × 10 × 10 mm con muesca en forma de V o en forma de U;
- El tamaño de la muesca y la precisión del procesamiento deben controlarse estrictamente;
- Número de muestras: Generalmente se promedian 3 piezas por lote.

Instrucciones especiales:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Las aleaciones de tungsteno a menudo muestran una baja energía de absorción de impacto (<10 J) debido a su alta fragilidad;
- Para mejorar la tenacidad, generalmente se adopta un diseño de grano ultrafino o de microaleación;
- Después del impacto, la superficie de la fractura se puede analizar mediante metalografía o SEM para identificar modos de fractura frágiles/dúctiles.

4.3.4 Ensayo de fatiga y de fluencia (opcional)

En algunas condiciones de servicio extremas (como sistemas inerciales aeroespaciales y componentes de reactores nucleares), también se requiere que las varillas de aleación de tungsteno tengan una excelente resistencia a la fatiga y estabilidad a la fluencia a altas temperaturas.

Normas relacionadas:

- **ASTM E466 / GB/T 3075** : Método de prueba de fatiga de metal (fatiga de alto ciclo);
- **ASTM E139 / GB/T 2039** : Método de ensayo de fluencia de metales (tensión constante a alta temperatura).

Descripción de la aplicación:

- La prueba de fatiga se utiliza para evaluar la vida útil de los materiales bajo tensión cíclica;
- Las pruebas de fluencia a menudo se realizan a temperaturas altas (800-1000 °C) y cargas constantes;
- Ambos se utilizan a menudo en la energía nuclear, la exploración del espacio profundo y el desarrollo de materiales para armas hipersónicas.

4.3.5 Criterios para juzgar los resultados de las pruebas de propiedades mecánicas

Las distintas normas establecen requisitos diferentes para las propiedades mecánicas de las varillas de aleación de tungsteno. Por ejemplo:

| proyecto | Grado industrial general | Grado militar/aeroespacial | Grado médico/nuclear |
|---------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------|
| resistencia a la tracción | ≥700 MPa | ≥900 MPa | ≥1000 MPa |
| Alargamiento | ≥5% | ≥10% | ≥12% |
| Dureza (HRB) | 70~85 | 75~90 | 78~92 |
| Tenacidad al impacto (J) | ≥6 J | ≥8 J | ≥10 J |

La base de juicio específica deberá referirse a los planos de diseño del producto, los acuerdos técnicos o las especificaciones de licitación.

resumen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las varillas de aleación de tungsteno deben fabricarse estrictamente de acuerdo con el sistema de normas internacionales de referencia para garantizar la precisión, trazabilidad y universalidad de los datos en proyectos multinacionales. Las normas ASTM, GB, ISO y otras abarcan toda la cadena de ensayos, desde la tracción, la dureza y el impacto hasta la fatiga y la fluencia, entre otras, y constituyen la base fundamental para la inspección de calidad y la selección de materiales de las varillas de aleación de tungsteno. Con la continua expansión de los campos de aplicación de alta gama, también se imponen mayores requisitos para la automatización, la digitalización y la precisión de los métodos de detección.

4.4 Análisis metalográfico y caracterización microestructural

El análisis metalográfico y la caracterización microestructural son herramientas importantes para evaluar la estructura interna y el potencial de rendimiento de las varillas de aleación de tungsteno. Mediante la observación y medición de la morfología interna del grano, la distribución de fases, los poros, las inclusiones y otras características del material, se puede determinar el grado de densificación del proceso de pulvimetalurgia, la uniformidad de difusión de los elementos de aleación, el efecto del tratamiento térmico y los defectos de organización, además de predecir su comportamiento en servicio y fiabilidad. Es un elemento clave en el control de calidad, la optimización de procesos y la investigación y el desarrollo de nuevos materiales.

4.4.1 Propósito e importancia del análisis metalográfico

El análisis metalográfico no solo es un medio importante de investigación básica en ciencia de materiales, sino que también desempeña los siguientes roles clave en la práctica de producción de varillas de aleación de tungsteno:

- **Evaluar la calidad de la sinterización y la porosidad** : observar la distribución, el tamaño y la morfología de los poros para determinar el nivel de densificación;
- **Determinar el tamaño y la uniformidad del grano** : los granos pequeños y uniformes a menudo se asocian con propiedades de alta resistencia y tenacidad;
- **Identificar la estructura del límite de fase** : la claridad de la interfaz entre las partículas W y la fase de la matriz Ni-Fe/Cu afecta las propiedades mecánicas generales;
- **Descubra defectos microscópicos e inclusiones** : incluido el origen de grietas, áreas no fusionadas, acumulación de impurezas y otros problemas;
- **Estudiar la distribución de elementos y el comportamiento de la precipitación** : analizar cambios microestructurales como la difusión de elementos de aleación y la precipitación de segunda fase.

4.4.2 Proceso de preparación de muestras

La alta dureza y densidad de las aleaciones de tungsteno imponen altas exigencias a la preparación de muestras metalográficas. Los pasos estándar para la preparación de muestras son los siguientes:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **Corte** : utilice un cortador de diamante de baja velocidad para evitar el sobrecalentamiento y las microgrietas;
2. **Montaje** : utilice materiales de montaje fríos o calientes para fijar la muestra, lo que resulta conveniente para la operación de pulido;
3. **Lijado grueso** : comience con papel de lija de grano 120 y, gradualmente, lije hasta papel de lija de grano 800~1200 para mantenerlo suave;
4. **pulido fino** :
 - Utilice líquido de pulido de diamante de 3 μm , 1 μm y 0,25 μm ;
 - No debe haber rayones, manchas de oxidación ni líneas cepilladas después del pulido;
5. **Grabado químico** :
 - Fórmula común de solución de grabado (referencia):
 - Ácido fluorhídrico + ácido nítrico + agua (peligroso, preste atención a la seguridad);
 - Mezcla de cloruro de hierro + ácido clorhídrico + etanol;
 - El tiempo de grabado se controla entre unos pocos segundos y decenas de segundos para revelar la interfaz del grano y la distribución de fases.

4.4.3 Método de observación de la microestructura

(1) Microscopía óptica (OM)

- **Rango de resolución** : 0,5~1 μm ;
- **Aplicaciones principales** :
 - Observación de granos y medición del tamaño;
 - Distribución de porosidad e identificación de macrodefectos;
 - de la morfología del límite de fase y la distribución tisular;
- El tamaño del grano y la porosidad se pueden contar automáticamente **con el software de análisis de imágenes**.

(2) Microscopía electrónica de barrido (MEB)

- **La resolución es mejor que 10 nm** , que es la herramienta principal para el análisis de la estructura de la aleación de tungsteno;
- **Contenido aplicable** :
 - Observación de gran aumento de la interfaz entre las partículas de W y la matriz Ni-Fe/Cu;
 - Detectar microfisuras, microagujeros, inclusiones, falta de fusión y otros defectos;
 - Combinado con espectroscopia de energía dispersiva (EDS) para analizar la distribución espacial de elementos;
- **Análisis de fractura** : se utiliza para determinar características de fractura frágil o dúctil (plano de clivaje, hoyuelo, estructura de cuasi-clivaje, etc.).

(3) Microscopía electrónica de transmisión (MET)

- **Resolución ultraalta (<1 nm)** ;
- **Contenido de la investigación** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Estructura del límite de grano y distribución de dislocaciones;
- Capa de reacción interfacial o precipitación de segunda fase;
- Análisis estructural a nivel atómico e investigación de distorsión cristalina;
- **Ámbito de aplicación** : Se utiliza principalmente en investigación científica o en actualización y desarrollo de aleaciones de tungsteno.

(4) Espectroscopía de energía (EDS/WDS)

- EDS es adecuado para análisis cualitativos y semicuantitativos rápidos de múltiples elementos;
- La espectroscopia dispersiva de longitud de onda (WDS) es adecuada para el análisis de oligoelementos finos (como O, C);
- Combinado con SEM, se utiliza para estudiar la distribución y uniformidad de difusión de Ni, Fe, Cu, etc. en la matriz de tungsteno.

(5) Difracción de rayos X (DRX)

- Se utiliza para confirmar la estructura cristalina y los tipos de fase de cada metal;
- Puede detectar si hay impurezas como óxido de tungsteno y carburo;
- Admite la estimación del tamaño del grano y el análisis de la resistencia de la textura (con escaneo direccional).

4.4.4 Criterios de evaluación del tamaño del grano y la composición de las fases

Método de evaluación del tamaño de grano:

- **GB/T 6394** "Método para la determinación del tamaño medio de grano de los metales";
- **ASTM E 112** : Evaluación del grado de grano mediante tabla de comparación estándar o análisis de imágenes;
- Los granos finos suelen clasificarse por encima del grado 9 (que corresponde a un tamaño de grano medio inferior a 15 μm) ;
- La estructura desigual, los granos gruesos y las inclusiones en los límites de grano son elementos no calificados.

Análisis de fases y métodos cuantitativos:

- relación del área de cada fase después de dividir la imagen óptica o SEM;
- Medición de la distribución y segmentación en escala de grises de la fase W/ fase base Ni-Fe típica;
- La EDS combinada con el software de análisis de imágenes puede lograr la cuantificación de componentes regionales.

4.4.5 Análisis de la relación entre la microestructura y el rendimiento

| Características microscópicas | Impacto en el rendimiento |
|-------------------------------|--|
| Granos pequeños y uniformes | Mejora la resistencia y la tenacidad, reduce las fuentes de grietas. |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | |
|--|--|
| La distribución de partículas W es uniforme | Propicio para la resistencia al impacto y la transferencia de carga uniforme. |
| La interfaz W/Ni-Fe está firmemente unida | Mejorar la plasticidad general y la resistencia al impacto. |
| Alta porosidad o distribución desigual | Reducen la resistencia y la densidad, y se convierten fácilmente en el origen de las grietas. |
| Existen microgrietas/inclusiones | Puede provocar fracturas prematuras y reducir la vida útil por fatiga. |
| Precipitación de segunda fase gruesa | Puede convertirse en un punto de concentración de tensiones, lo que resulta en una disminución de las propiedades mecánicas. |

resumen

El análisis metalográfico y la caracterización microestructural son herramientas indispensables para las varillas de aleaciones de tungsteno, desde el control de la materia prima hasta la verificación del rendimiento del producto final. Mediante la combinación de microscopía óptica, SEM, TEM, XRD y otras tecnologías, no solo podemos comprender a fondo las leyes de evolución organizacional y los defectos microscópicos en las aleaciones de tungsteno, sino que también ofrecemos un sólido soporte técnico para la optimización de la producción y el diseño de nuevos productos. Con el desarrollo del reconocimiento de imágenes y la tecnología de análisis asistida por IA, el análisis metalográfico de las aleaciones de tungsteno está evolucionando hacia la automatización, la cuantificación y la inteligencia.

4.5 Análisis de composición química (ICP, XRF, ONH)

determinan directamente su fiabilidad. En aleaciones de tungsteno de alta densidad, como W-Ni-Fe y W-Ni-Cu, la proporción de elementos principales (como el tungsteno, que suele ser del 85 % al 98 %), el control de impurezas (como C, O, N, H, P, S) y los oligoelementos (como Cr, Co, Mo, etc.) influyen significativamente en las propiedades físicas, mecánicas, de procesamiento y de servicio de la aleación. Por lo tanto, establecer un sistema de análisis de la composición química preciso y completo es fundamental para garantizar la calidad del producto y cumplir con las especificaciones estándar y los requisitos del cliente.

4.5.1 Importancia del análisis de la composición química

Las varillas de aleación de tungsteno incluyen:

- **Confirme si el grado de aleación cumple con el estándar** (como A, B, C en el estándar ASTM B777);
- **Verificar la estabilidad de los ingredientes y el proceso de fundición ;**
- **Controlar el contenido de impurezas dañinas (como O, N, C, S, P) para evitar la fragilidad y la tendencia al agrietamiento ;**
- **Analizar la composición anormal de los productos fallidos ;**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Admite la trazabilidad del material y el control de calidad de los lotes .

4.5.2 Descripción general de los principales métodos de análisis químico

| Categoría del método | Objeto de análisis | Características |
|--|---|--|
| ICP-OES / ICP-MS | Elementos metálicos (componente principal + trazas) | Alta sensibilidad, adecuada para el análisis simultáneo de múltiples elementos. |
| XRF (espectroscopia de fluorescencia de rayos X) | Componente principal de metal | Rápido y no destructivo, adecuado para análisis en fábrica o por lotes. |
| Análisis de ONH | Oxígeno, nitrógeno, hidrógeno | Método de pirólisis de alta temperatura, adecuado para tungsteno y sus aleaciones. |
| Analizador CS | Carbono, azufre | Método de combustión por arco, rápido y eficiente. |
| Análisis químico húmedo | Elementos específicos | Alta precisión, pero baja eficiencia y alto riesgo de contaminación. |

Las normas específicas deberán referirse a:

- ASTM B777, B702;
- GB/T 21114, GB/T 38792;
- Estándares del cliente o militares/aeroespaciales.

resumen

Las varillas de aleación de tungsteno abarcan macroelementos principales, trazas de impurezas y elementos de gases traza, y constituyen el método principal para evaluar la estabilidad, pureza y consistencia de las aleaciones. Las tecnologías de detección modernas, como los analizadores ICP-OES, XRF y ONH, permiten lograr un control de composición automatizado de alta precisión y alto rendimiento, mejorando considerablemente la eficiencia del control de calidad. En el futuro, con el desarrollo de la fabricación inteligente, estas tecnologías también se utilizarán más ampliamente en la monitorización en línea, la trazabilidad de lotes y la optimización de procesos de circuito cerrado.

4.6 Rugosidad superficial y detección de defectos (inspección visual, TC)

En las varillas de aleación de tungsteno, la calidad de su superficie no solo afecta directamente la vida útil, la precisión de la pieza y el aspecto del material, sino que también está estrechamente relacionada con la disipación térmica, la concentración de tensiones, la formación de grietas por fatiga, etc., en aplicaciones posteriores. Por lo tanto, el control de la rugosidad superficial y la detección de defectos son elementos clave que no pueden ignorarse en la evaluación de la calidad de los productos terminados. Con el continuo desarrollo de la tecnología de detección, la inspección visual manual tradicional se ha combinado gradualmente con métodos de alta tecnología como la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

imagen digital, la tomografía computarizada 3D y el escaneo láser de contornos para lograr procesos de detección eficientes, automatizados y precisos.

4.6.1 Significado y definición del índice de la prueba de rugosidad superficial

La rugosidad superficial es un parámetro importante que caracteriza el grado de irregularidad microscópica en la superficie de la pieza de trabajo. La rugosidad no solo afecta el ensamblaje, la fricción, el desgaste, la conductividad térmica y el rendimiento a la fatiga de las varillas de aleación de tungsteno, sino que también afecta la adhesión y la resistencia a la corrosión de los recubrimientos.

Parámetros de rugosidad comunes (según GB/T 3505, ISO 4287):

| Nombre del parámetro | significado | unidad |
|-------------------------------|---|--------|
| Real academia de bellas artes | Rugosidad media aritmética, el indicador más utilizado | micras |
| R | Altura máxima (promedio de cinco puntos) | micras |
| R | Altura total (la diferencia entre el pico más alto y el valle más bajo) | micras |
| R | Rugosidad RMS (más sensible a los picos) | micras |

4.6.2 Métodos y equipos de prueba de rugosidad superficial

(1) Probador de rugosidad de contacto

- **Principio** : La sonda se mueve a lo largo de la superficie para registrar los cambios de contorno;
- **Equipo representativo** : Japón Mitutoyo SJ-210, Alemania Mahr Perthómetro ;
- **Ventajas** : Medición precisa, adecuada para piezas estándar por lotes;
- **Limitaciones** : No apto para superficies blandas o muy reflectantes, requiere operación de contacto.

(2) Interferómetro confocal láser sin contacto o de luz blanca

- **Principio** : utilizar interferometría láser/luz blanca para construir un mapa de contorno 3D;
- **Ventajas** :
 - Pruebas sin contacto y no destructivas;
 - Alta precisión (nivel nanométrico);
 - Puede escanear rápidamente grandes áreas;
- **Dispositivos representativos** : Serie Keyence VK-X, Zygo Nexview , Sensofar .

(3) Escáner de perfil 3D/proyector de luz estructurada

- **Aplicación** : Se puede utilizar para detectar la consistencia general del perfil de la superficie, escalones, hoyos, etc. de la barra;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Adecuado para pruebas de lotes en sitio o inspección de calidad asistida visualmente.

4.6.3 Tecnología y aplicación de detección de defectos superficiales

Los defectos que pueden ocurrir durante la formación o el procesamiento de las varillas de aleación de tungsteno incluyen:

- Grietas, rayones y picaduras superficiales;
- Capa de óxido, manchas negras, residuos de carbón;
- Adherencias, descamación, poros;
- Deformación geométrica u ovalidad fuera de tolerancia.

(1) Inspección visual

- **Norma** : Descripción del estado de la superficie en GB/T 8170 / ASTM B777;
- **Método** : A simple vista + lupa (3X~10X);
- **Reglas de juicio típicas** :
 - No se permiten grietas ni descamaciones;
 - Se aceptan diferencias de color de la superficie y ligeras marcas de fricción (dependiendo del nivel de aplicación);
 - El tamaño del defecto en un área específica no excede un valor determinado (por ejemplo, $\leq 0,5$ mm).

(2) Cámara digital + sistema de reconocimiento de imágenes

- Aplicado a la detección en línea de líneas de montaje;
- Con la ayuda de algoritmos de aprendizaje automático, puede identificar automáticamente araños, agujeros y anomalías de color;
- La tasa de precisión puede alcanzar más del 95%, lo que es particularmente adecuado para la detección de apariencia a gran escala.

(3) Tomografía computarizada de rayos X tridimensional (TC)

- **Principio** : utilizar el escaneo multiángulo de rayos X para reconstruir una imagen de volumen tridimensional;
- **Contenido detectable** :
 - Poros internos, inclusiones, grietas y holgura;
 - Profundidad de grieta superficial y dirección de extensión;
 - Uniformidad del tejido en el centro y el borde de la varilla;
- **Equipo representativo** : Nikon, GE phoenix, Yxlon ;
- **Resolución** : hasta 1~5 μm , adecuado para el análisis de productos militares de alta gama, energía nuclear y varillas de aleación de tungsteno aeroespaciales .

4.6.4 Evaluación del nivel de defectos y determinación de la calidad

La evaluación de diversos defectos superficiales requiere la formulación de criterios de evaluación según los requisitos de los diferentes campos de aplicación. A continuación, se presenta una clasificación de referencia:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Tipo de defecto | Aleación de tungsteno militar/nuclear | Aleación de tungsteno para uso industrial |
|----------------------------|---------------------------------------|---|
| grieta | prohibir | prohibir |
| Pozos | ≤0,3 mm | ≤0,8 mm |
| Manchas de oxidación | No puede existir | Puede existir ligeramente |
| Rugosidad de la superficie | Ra ≤ 0,4 μm | Ra ≤ 1,6 μm |

Las normas de referencia pertinentes incluyen:

- **GB/T 13306** : Terminología de defectos superficiales de metales;
- **ASTM E45/E 1245** : Método de detección de inclusiones y defectos;
- **YS/T 582** : Especificación de inspección de calidad de productos de aleación de tungsteno (estándar de la industria).

4.6.5 Tendencias en automatización y pruebas inteligentes

Las empresas modernas de fabricación de varillas de aleación de tungsteno están introduciendo gradualmente:

- **Sistema de inspección visual en línea** : opera sincrónicamente con el centro de mecanizado CNC para lograr una inspección de calidad de apariencia 100% en tiempo real;
- **Plataforma de reconocimiento de imágenes de IA** : entrenamiento de modelos de características de defectos basados en aprendizaje profundo para mejorar la precisión del reconocimiento;
- **modelado de imágenes de tamaño completo** : escaneo láser o con luz blanca para obtener la topología completa de la superficie de la barra;
- **Análisis de big data de calidad** : seguimiento de defectos, asociación de equipos y optimización de la iteración de procesos.

Estas tecnologías han mejorado enormemente la eficiencia de detección y la estabilidad de la calidad, ayudando a que la fabricación de varillas de aleación de tungsteno de alta gama se desarrolle hacia una dirección de "cero defectos".

resumen

La rugosidad superficial y la detección de defectos son clave para la transición de las varillas de aleación de tungsteno de "materiales funcionales" a "componentes estructurales de precisión". Mediante la medición de la rugosidad con/sin contacto, la tomografía computarizada, el reconocimiento visual y otros medios técnicos, es posible comprender plenamente la calidad superficial y los defectos internos del material. En el futuro, la detección inteligente, el control de calidad automatizado y la predicción de defectos basada en datos se convertirán en una de las capacidades clave de la fabricación de alta gama de varillas de aleación de tungsteno.

4.7 Tecnología de ensayos no destructivos (ultrasonido, rayos X, partículas magnéticas)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las varillas de aleación de tungsteno se utilizan principalmente en sectores de alta fiabilidad, como la aviación, el sector militar, la energía nuclear y la medicina, que exigen una calidad interna e integridad estructural extremadamente altas. Los ensayos destructivos convencionales permiten obtener datos mecánicos y microscópicos, pero no permiten evaluar completamente los defectos internos de toda la varilla. Por lo tanto, el uso de **técnicas de ensayos no destructivos (END)** para identificar y evaluar defectos ocultos, como grietas, agujeros, inclusiones y holgura, en las varillas de aleación de tungsteno es fundamental para garantizar la seguridad, la fiabilidad y la estabilidad del producto.

Esta sección presentará sistemáticamente los tres métodos de prueba no destructivos típicos aplicables a las varillas de aleación de tungsteno: **prueba ultrasónica (UT), prueba radiográfica (RT) y prueba de partículas magnéticas (MT)** .

4.7.1 Pruebas ultrasónicas (UT)

Principios y ventajas:

Las pruebas ultrasónicas utilizan ondas sonoras de alta frecuencia (1-10 MHz) para propagarse en el material. Al detectar estructuras discontinuas, como interfaces, poros y grietas, se genera una señal reflejada que el transductor recibe y analiza para determinar si existen defectos.

- **Adecuado para la detección de defectos internos de aleación de tungsteno** , especialmente poros, inclusiones y áreas no densificadas ;
- **Fuerte penetración y gran profundidad de detección** , adecuado para barras de diámetro medio y grueso ($\Phi 6\sim\Phi 100$ mm);
- **realizar escaneo y detección automáticos** .

Método de detección:

- Utilice ondas longitudinales (sonda recta) u ondas transversales (sonda angular);
- El sistema multicanal logra una cobertura total de la superficie y de múltiples ángulos;
- Los equipos de alta gama están equipados con capacidades de ****A-scan (amplitud vs. tiempo) y C-scan (imagen 2D)**** .

Base estándar:

- **ASTM E114 / E 2375** : Norma para pruebas ultrasónicas de materiales metálicos;
- **GB/T 12604.1, GB/T 5777** : Método de prueba ultrasónico para piezas forjadas/barras de metal.

Puntos técnicos:

- La aleación de tungsteno tiene una gran atenuación acústica, por lo que se debe utilizar una sonda de alta energía (como 5 MHz);
- La sensibilidad de detección debe ajustarse para poder identificar defectos de 0,2 a 0,5 mm;
- Es necesario pulir la superficie para reducir el error de la capa de acoplamiento;
- Después de la detección, se debe registrar la posición, la profundidad y la amplitud de la onda de reflexión del defecto para determinar su nivel.

Diagrama de identificación de defectos:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Tipo de defecto | Características del ultrasonido |
|----------------------------|--|
| grieta | Señal altamente reflectante con límites claros |
| Porosidad | Moderadamente reflectante, forma irregular. |
| Falta de área densa | Eco en capas, múltiples reflexiones |

4.7.2 Pruebas radiográficas (RT)

Principio y aplicación:

Las pruebas radiográficas utilizan rayos X o rayos gamma para penetrar los materiales. Las áreas de diferente densidad o espesor tienen distinta capacidad de absorción de radiación. La imagen de transmisión de la radiación se registra mediante una placa de imagen (película o detector digital) para identificar defectos internos.

- **Aplicable a la detección de defectos de diferencia de densidad como poros, grietas, inclusiones, etc. en varillas de aleación de tungsteno ;**
- **defectos cercanos a la superficie o profundos ;**
- **A menudo se utiliza como medio de evaluación de calidad final o aceptación de alto nivel .**

Equipo de prueba:

- Máquina de rayos X industrial (voltaje del tubo 160~320 kV);
- Las fuentes de isótopos gamma (como Ir-192) se utilizan para barras de paredes gruesas;
- El sistema de radiografía digital (DR/CR) puede generar imágenes de alta definición en tiempo real.

Indicadores técnicos:

- Tamaño mínimo de defecto detectable: alrededor de 0,1~0,3 mm;
- La claridad de la imagen y la sensibilidad de detección dependen de la energía de la radiación, el tiempo de exposición y la distancia focal;
- A menudo es necesario verificar la resolución de la imagen utilizando un bloque de prueba de comparación (IQI).

Estándares de prueba:

- **ASTM E1742, E 1030 ;**
- **GB/T 3323, GB/T 19802 ;**
- El campo de la energía nuclear médica también debe cumplir estándares más elevados, como ISO 5579 y EN 462.

Ventajas y limitaciones:

| ventaja | límite |
|--|--|
| Las imágenes de detección son intuitivas y los registros se pueden guardar. | Alto costo del equipo y operación complicada |
| Se pueden identificar porosidad, grietas e inclusiones. | Insensible a defectos de diferencia de baja densidad |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | |
|---|--|
| Se puede utilizar para inspección final y análisis de fallas. | Penetración limitada en piezas gruesas y grandes |
|---|--|

4.7.3 Prueba de partículas magnéticas (MT)

principio:

Al magnetizar materiales ferromagnéticos, si existen defectos como grietas, inclusiones y materiales no fusionados en la superficie o cerca de ella, estas áreas generarán campos de fuga magnética. Tras la pulverización de polvo magnético, este se acumulará en los defectos, formando trazas visibles.

- **Adecuado para la detección rápida de defectos superficiales o cercanos a la superficie ;**
- Se utiliza principalmente para varillas de aleación de tungsteno que contienen hierro (como la serie W-Ni-Fe), pero no para la serie W-Ni-Cu.

Método de detección:

- La magnetización de CA se utiliza para detectar defectos superficiales;
- La magnetización de CC puede detectar defectos ligeramente más profundos (1~3 mm);
- Se puede utilizar polvo magnético por método húmedo (suspensión magnética) o por método seco;
- El líquido de contraste blanco y negro o el polvo magnético fluorescente combinado con luz ultravioleta mejoran el reconocimiento.

Normas aplicables:

- **ASTM E 709** : Principios generales para técnicas de prueba de partículas magnéticas;
- **GB/T 15822, JB/T 6063** : Método de prueba de partículas magnéticas y evaluación de calidad;

Análisis de características:

| Ventajas | Limitaciones |
|---|--|
| Bajo costo y rápida velocidad de detección | Solo materiales ferromagnéticos (sistema Ni-Fe) |
| El posicionamiento de defectos es intuitivo y muy sensible. | No se pueden detectar defectos profundos o que no se abren |
| Adecuado para operaciones por lotes en sitio | Es necesario limpiar los residuos de polvo y el riesgo de contaminación. |

4.7.4 Evaluación del grado de defecto y criterios de pruebas no destructivas

Para garantizar una evaluación uniforme de la calidad, es necesario determinar si los defectos superan el límite según las normas pertinentes, por ejemplo:

| Tipo de defecto | Tamaño máximo permitido (ejemplo, varilla de $\Phi 20$ mm) | ¿Esta permitido? |
|-----------------|--|------------------|
| grieta | No se permite existir | No |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| Agujeros | ≤0,3 mm, no denso | Sí |
| Capas | No permitido | No |
| Inclusiones no metálicas | ≤0,5 mm, distribuidos uniformemente | Dependiendo del nivel |

Estándares de calificación comunes:

- **ASTM B777/B 702** : Norma de referencia para pruebas no destructivas de aleaciones de tungsteno;
- **GB/T 38561, GB/T 31928** : Normas especiales para pruebas de aleaciones de tungsteno;
- **Acuerdo técnico con el cliente** : Los estándares personalizados para la aviación, la energía nuclear, etc. son más estrictos.

resumen

En las varillas de aleación de tungsteno, la tecnología de ensayos no destructivos permite identificar defectos internos y superficiales sin dañar el material. Las pruebas ultrasónicas son adecuadas para la evaluación interna de la calidad de la mayoría de las varillas; las pruebas de rayos X ofrecen ventajas evidentes en la visualización de imágenes y son un método necesario para productos de alta gama; las pruebas de partículas magnéticas ofrecen una capacidad de identificación altamente sensible de microfisuras superficiales. La combinación adecuada de estas tres técnicas permite lograr un aseguramiento de la calidad integral y de múltiples niveles para las varillas de aleación de tungsteno.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

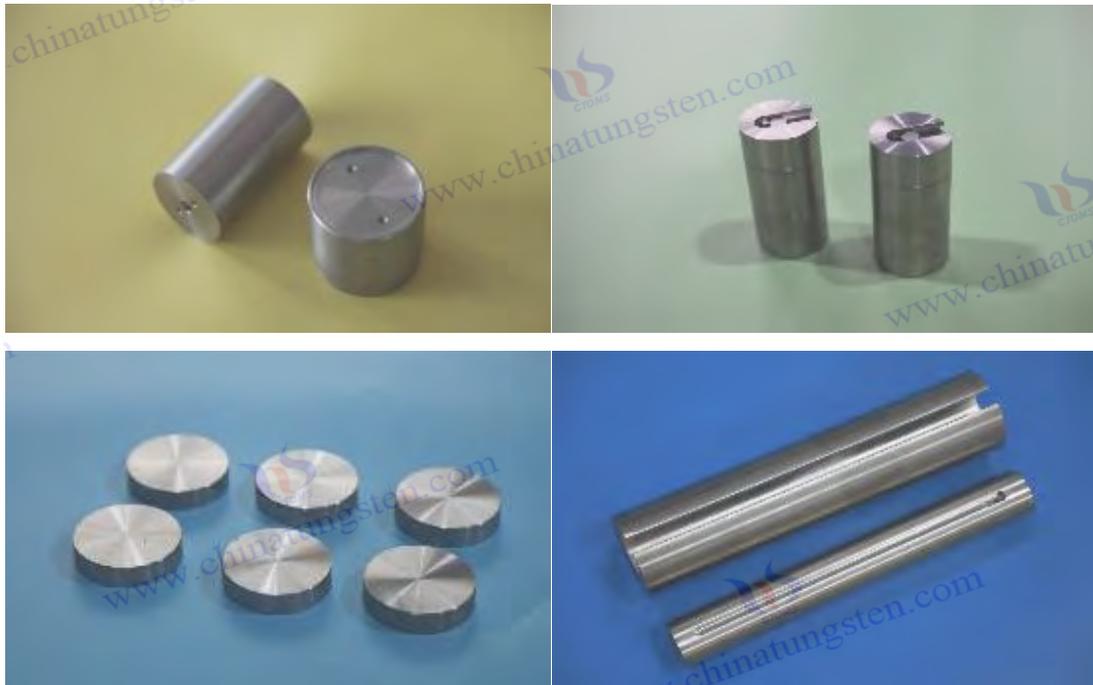
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

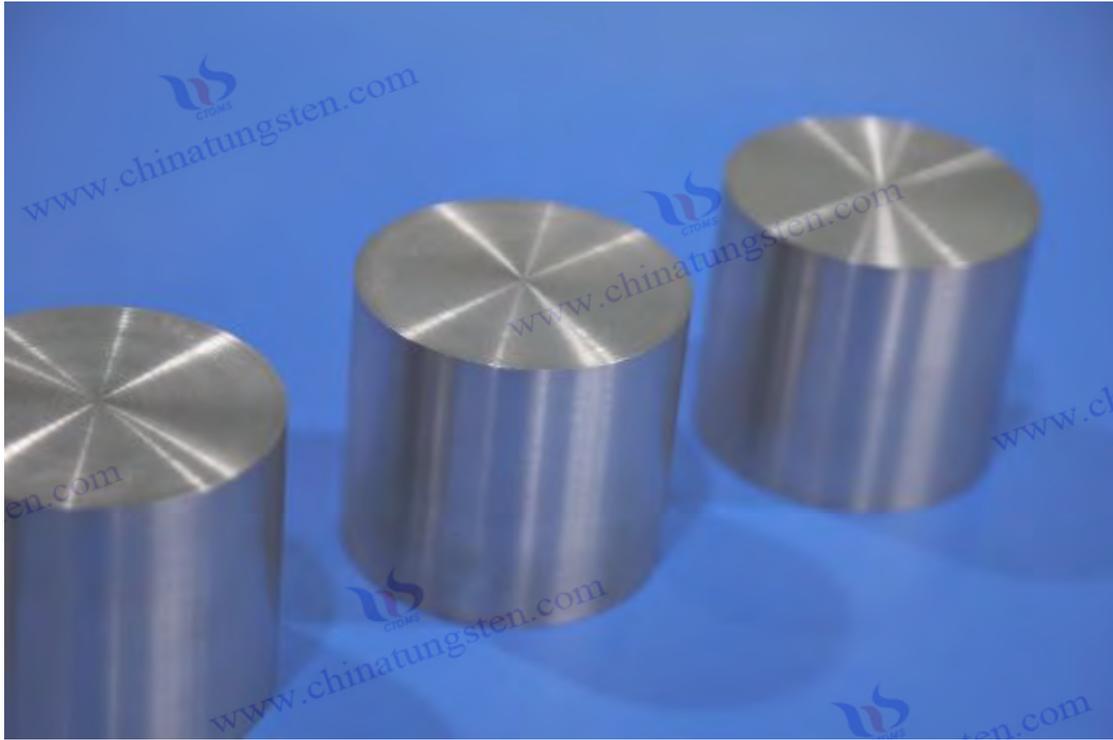
Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Capítulo 5 Campos de aplicación típicos de las varillas de aleación de tungsteno

5.1 Contrapesos aeroespaciales y componentes inerciales

Las varillas de aleación de tungsteno ocupan un lugar fundamental en el sector aeroespacial, siendo especialmente adecuadas para **sistemas de contrapeso** y **componentes inerciales**. Gracias a su altísima densidad, buena procesabilidad y excelente estabilidad estructural, se utilizan ampliamente en sistemas de balanceo de masa, regulación de energía cinética y control de actitud en aeronaves, satélites, misiles, drones y otras aeronaves, y son uno de los materiales metálicos de alto rendimiento más representativos de la industria aeroespacial actual.

5.1.1 Antecedentes y requisitos para los sistemas de contrapeso

En los sistemas aeroespaciales, los conjuntos de contrapeso se utilizan a menudo para los siguientes fines:

- **Control del centro de gravedad** : Para mantener la estabilidad de la actitud de la aeronave y la distribución razonable de su momento de inercia, es necesario configurar contrapesos de precisión en el área estructural o de compensación de potencia;
- **Equilibrio dinámico** : En estructuras giratorias de alta velocidad (como giroscopios, rotores de motores, volantes, etc.), se utilizan contrapesos para ajustar el par desequilibrado y evitar resonancia o fatiga;
- **Compensación del consumo de combustible** : a medida que disminuye el uso de combustible líquido, el centro de gravedad de la aeronave se desplaza y el equilibrio se mantiene mediante pesos dinámicos de aleación de tungsteno;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Ajuste de actitud** : algunos sistemas de satélite/misiles utilizan pesos de tungsteno deslizantes o móviles para una compensación fina del control de actitud.

Debido al espacio limitado, el diseño aeronáutico exige que el material de peso **sea lo más pesado posible por unidad de volumen**, con buena **resistencia a las vibraciones, estabilidad estructural y adaptabilidad ambiental**. La aparición de las varillas de aleación de tungsteno cumple con este exigente estándar.

5.1.2 Ventajas materiales de las varillas de aleación de tungsteno

Las varillas de aleación de tungsteno (normalmente sistemas W-Ni-Fe o W-Ni-Cu) tienen las siguientes ventajas significativas sobre otros materiales metálicos:

| Parámetros de rendimiento | de Varilla de aleación de tungsteno | de dirigir | Acero inoxidable | Aleación de titanio |
|---------------------------------|---|------------|------------------|---------------------|
| Densidad (g/cm ³) | 17,0–18,8 | 11.3 | ~7.8 | ~4.5 |
| Resistencia (MPa) | 700–1000 | 15–30 | 500–800 | 900–1100 |
| Estabilidad de temperatura | Excelente (>1200 °C sin reducción de plasticidad) | Diferencia | bien | excelente |
| Protección ambiental/toxicidad | No tóxico y respetuoso con el medio ambiente. | venenoso | No tóxico | No tóxico |
| Adaptabilidad del procesamiento | bien | fácil | medio | Difícil de procesar |

Por lo tanto, la aleación de tungsteno es una opción de actualización ideal para reemplazar materiales tradicionales como el plomo en los sistemas de contrapeso aeroespaciales.

Estructura típica de la varilla de contrapeso de aleación de tungsteno

Los contrapesos para uso aeroespacial suelen adoptar las siguientes formas:

1. **Barra redonda estándar/barra cuadrada**
 - Se utiliza para rotores giroscópicos, anillos de inercia o pesos centralizados en el fondo de los tanques de combustible;
2. **Varilla roscada/perno Varilla de tungsteno**
 - Fácil de instalar o quitar de la estructura, a menudo se utiliza para contrapesos de satélites o pruebas terrestres;
3. **Bloques/insertos procesables de formas especiales**
 - Las estructuras de ranurado, punzonado o escalonado personalizadas de acuerdo con la estructura de la aeronave se pueden integrar firmemente en la cabina;
4. **Varilla de tungsteno extraíble y deslizante**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Aplicado a los sistemas de control de actitud, el centro de gravedad se puede ajustar moviéndose a lo largo del riel guía;

5. Inserto de varilla corta/lámina fina de aleación de tungsteno

- Se utiliza para el ajuste de inercia de palas y estructuras de rotor.

5.1.4 Requisitos clave de rendimiento

Las varillas de aleación de tungsteno de grado aeroespacial deben cumplir con los siguientes indicadores:

- **Densidad** : $\geq 17,5 \text{ g/cm}^3$, controlada dentro de $\pm 0,05 \text{ g/cm}^3$;
- **Precisión dimensional** : $\pm 0,01 \sim \pm 0,05 \text{ mm}$, requiere torneado fino y rectificado;
- **Propiedades mecánicas** :
 - Resistencia a la tracción $\geq 750 \text{ MPa}$;
 - Alargamiento $\geq 10\%$, asegurando tenacidad al impacto;
- **Rugosidad de la superficie** : $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$ (requisito de superficie brillante);
- **Requisitos magnéticos** : algunos sistemas inerciales requieren **aleaciones de tungsteno poco magnéticas o no magnéticas** (W-Ni-Cu es mejor que W-Ni-Fe);
- **Estabilidad a altas temperaturas** : resistente al choque térmico y sin deformación estructural;
- **Confiabilidad** : Los defectos internos pueden detectarse mediante pruebas no destructivas (ultrasonido/radio).

5.1.5 Casos de aplicación práctica

(1) Rueda de inercia del satélite y controlador de actitud

- La varilla de aleación de tungsteno se utiliza como **núcleo de rueda de impulso o anillo de inercia giroscópica** ;
- Aumentar la inercia a través de alta densidad y mejorar la precisión del ajuste de actitud;
- Muchos tipos de satélites en Estados Unidos y Europa utilizan varillas de alta densidad W-Ni-Fe.

(2) Contrapesos de equilibrio dinámico para aeronaves/UAV

- Se utiliza para corregir el equilibrio de las alas, el ala de cola y las palas de la hélice;
- Se pueden insertar pequeñas varillas de tungsteno en las hojas para ajustar el peso;
- El mercado de vehículos aéreos no tripulados (UAV) se está expandiendo y la demanda de varillas de tungsteno de precisión de tamaño pequeño está aumentando.

(3) Contrapeso del compartimento de cola del misil y de la sección de guía

- Para garantizar una actitud de vuelo estable, a menudo se instala una varilla de tungsteno en la sección de cola para equilibrar el centro de masa;
- En la estructura del riel deslizante se realiza una ponderación adaptativa;
- Requiere alta densidad, fuerte unión y resistencia a la vibración.

(4) Componentes del giroscopio del motor de aeronave

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Se colocan pesos de tungsteno en ambos extremos del eje para mejorar la estabilidad y la velocidad de respuesta;
- Combinado con la carcasa de aleación de alta temperatura, constituye una unidad de inercia dinámica.

5.1.6 Análisis de alternativas con otros materiales

Con la actualización de las regulaciones ambientales y la creciente demanda de reducción de peso en la aviación, las varillas de aleación de tungsteno están reemplazando gradualmente los siguientes materiales de peso tradicionales:

| Material | Motivo del reemplazo |
|-------------------|--|
| dirigir | Altamente tóxico, prohibido o restringido en uso. |
| acero | Baja densidad, requiriendo un mayor volumen para cumplir con el estándar |
| Aleación de cobre | Alta conductividad, puede introducir interferencias electromagnéticas. |
| Cerámica | Muy frágil, incapaz de soportar vibraciones y cargas de impacto. |

La aleación de tungsteno tiene ventajas significativas en cuanto a precisión de peso, seguridad, control de volumen y reciclabilidad, y se ha convertido en la opción principal para materiales de peso de aviación de alta gama.

resumen

Las varillas de aleación de tungsteno ofrecen amplias ventajas en contrapesos aeroespaciales y componentes inerciales, como alta densidad, estructura estable, resistencia a altas temperaturas y gran adaptabilidad al procesamiento. No solo cumplen con los estrictos requisitos de las aeronaves modernas para el control del centro de gravedad de masas, sino que también admiten diversos diseños integrados. Son la primera opción como material de contrapeso de alto rendimiento. En el futuro, con el desarrollo de aeronaves inteligentes, satélites pequeños y plataformas de alta dinámica, las varillas de aleación de tungsteno desempeñarán un papel fundamental en estructuras más importantes.

5.2 Varilla de aleación de tungsteno para equipo militar (núcleo perforante, compartimento de cola de misiles)

La aleación de tungsteno desempeña un papel fundamental en el equipamiento militar debido a su alta densidad, alta resistencia, alta retención de energía cinética y excelente capacidad de penetración. Las varillas de aleación de tungsteno se utilizan principalmente en el ámbito militar para fabricar **núcleos de proyectiles perforantes de energía cinética**, **contrapesos del compartimento de cola del misil**, **componentes estructurales de bombas de penetración profunda**, **proyectiles de alto poder explosivo** y **contrapesos del sistema de vuelo inercial**, etc. Su rendimiento afecta directamente la capacidad de ataque, la estabilidad del vuelo y la eficiencia de combate del sistema de armas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2.1 Principales ventajas de los materiales de aleación de tungsteno para aplicaciones militares

Las aleaciones de tungsteno en el ámbito militar se reflejan en los siguientes aspectos:

| Indicadores de desempeño | Aleación de tungsteno (W-Ni-Fe) | dirigir | acero | Aleación de uranio (DU) |
|---------------------------------|---|-------------------|-----------|---------------------------------|
| Densidad (g/cm ³) | 17,0 ~ 18,8 | ~11.3 | ~7.8 | ~19.1 |
| Resistencia a la tracción (MPa) | 700 ~ 1000 | Muy bajo | 500 ~ 800 | 800 ~ 900 |
| Estabilidad térmica | Excelente (>1200°C sin ablandamiento) | Diferencia | medio | excelente |
| Toxicidad/Seguridad ambiental | No tóxico y respetuoso con el medio ambiente. | venenoso | Seguridad | Fuerte radiactividad |
| Maquinabilidad | bien | Fácil de procesar | bien | Muy malo (oxidado y quebradizo) |

Por lo tanto, la aleación de tungsteno se conoce como un " **material alternativo de uranio empobrecido no tóxico** " y es una base material importante para las armas cinéticas convencionales contemporáneas de alto rendimiento.

5.2.2 Varilla de aleación de tungsteno en proyectil perforante

(1) Antecedentes de la aplicación

El Penetrador de Energía Cinética (KEP) utiliza energía cinética de alta velocidad para penetrar objetivos blindados. Su componente principal, el "núcleo", debe tener:

- Densidad extremadamente alta para aumentar la energía cinética;
- Resistencia y dureza extremadamente altas para mantener la capacidad de penetración;
- Buena tenacidad para evitar que se rompa en vuelo o se desintegre al penetrar una armadura;
- Excelente estabilidad dinámica para reducir la deformación y la deflexión.

El núcleo de aleación de tungsteno generalmente está hecho de una varilla de aleación pesada W-Ni-Fe, que se transforma en una estructura de cono de cola o núcleo de aguja a través de conformado de precisión, tratamiento térmico y mecanizado.

(2) Parámetros de tipo y tamaño del núcleo

| Tipo de munición | Diámetro típico de varilla de aleación de tungsteno | Relación de aspecto | Estructura de núcleo elástico |
|-----------------------------------|---|---------------------|--|
| Cañón principal del tanque APFSDS | Φ18 ~ Φ30 mm | 15 ~ 25 | Varilla larga de aleación de tungsteno + carcasa de aluminio |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | | |
|--|--------------|---------|--|
| Proyectil perforante de pequeño calibre | Φ5 ~ Φ15 mm | 10 ~ 15 | Varilla de tungsteno sólida o carcasa de acero con núcleo de tungsteno |
| Núcleo de munición de penetración profunda | Φ20 ~ Φ60 mm | 5 ~ 10 | Cabezal cónico de aleación de tungsteno macizo y pesado |

(3) Requisitos técnicos materiales

- **Densidad** : $\geq 17,5 \text{ g/cm}^3$, preferiblemente 18,0 ~ 18,5;
- **Resistencia a la tracción** : $\geq 950 \text{ MPa}$;
- **Dureza** : HRC ≥ 35 ;
- **Alargamiento** : $\geq 10\%$;
- **Microestructura** : densa y uniforme, sin poros, tamaño de grano controlado $\leq 10 \mu\text{m}$;
- **No magnético o poco magnético** (requisitos especiales del sistema de guía);
- **Las pruebas no destructivas han verificado que no existen defectos como grietas internas y delaminación entre capas .**

(4) Descripción general del proceso de fabricación

1. Preparación de materia prima: mezcla de polvo de tungsteno de alta pureza + polvo de aleación de Ni/Fe;
2. Prensado de pulvimetalurgia → sinterización en fase líquida a alta temperatura;
3. Tratamiento térmico de revenido → torneado de precisión → pulido;
4. Recubrimiento de superficie (Mo/Cr) o tratamiento de capa de óxido (protección térmica, resistencia al desgaste);
5. Prueba de ultrasonido y examen de TC.

5.2.3 Varillas de aleación de tungsteno en la estructura de contrapeso del compartimento de cola del misil

Descripción de la aplicación:

- En misiles tácticos de largo y medio alcance o misiles de defensa aérea, el compartimento de cola (sección del cono de cola) se utiliza a menudo para instalar contrapesos para equilibrar la distribución del centro de masa entre el dispositivo de propulsión y la ojiva;
- La varilla de aleación de tungsteno en el compartimento de cola también juega un papel en **el aumento de la estabilidad inercial del vuelo, mejorando la precisión de la guía y reduciendo la desviación del proyectil** ;
- Algunos sistemas de misiles de alta precisión utilizan **módulos de contrapeso de varilla de tungsteno ajustables** para ajustar la desviación del algoritmo de guía.

Estructura:

- Varilla cilíndrica/escalonada de aleación de tungsteno sólido;
- Recubierto con material aislante o revestimiento cerámico para evitar interferencias electromagnéticas;
- Las estructuras de orificio pasante tienen cables o ejes deslizantes incorporados.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Requisitos y características:

- **Precisión de control de consistencia de alta densidad (dentro de $\pm 0,03 \text{ g/cm}^3$) ;**
- **Requisitos de alta precisión de mecanizado** (adaptación de precisión con el mecanismo de la cabina de cola) ;
- Resistente a la corrosión, resistente a los impactos y de larga vida útil;
- La relación de peso y la posición se pueden preconfigurar de acuerdo con los datos de simulación de vuelo.

5.2.4 Otras aplicaciones militares de las varillas de tungsteno

- **Bujes de aleación de tungsteno para municiones formadas explosivamente (EFP) ;**
- **Varillas de aleación de tungsteno para proyectiles de alto poder explosivo** (para mejorar la energía direccional de la explosión);
- **Pesas giroscópicas del sistema inercial militar ;**
- **Piezas estructurales de varilla de tungsteno resistentes a alta presión para cargas de profundidad ;**
- **Varillas de aleación de tungsteno en estructuras militares que absorben/bloquean el calor** (como la protección EMP).

5.2.5 Normas y sistema de cumplimiento para productos militares de aleación de tungsteno

Las varillas de aleación de tungsteno de uso militar generalmente deben cumplir con los siguientes estándares y certificaciones del sistema:

| Estándar/Sistema | Contenido |
|---|--|
| GJB/T 3765 | Requisitos técnicos para aleaciones de tungsteno de uso militar |
| MIL-T-21014 | Especificaciones técnicas de las varillas de aleación de tungsteno para el Ejército de EE. UU. |
| ASTM B777 Clase IV | Especificaciones de la aleación de tungsteno de ultra alta densidad |
| Norma militar nacional GJB 9001C | Sistema de Gestión de Calidad de Defensa |
| ISO 10204 3.2 | Informe de certificación de calidad de terceros de grado militar |
| NADCAP / ITAR / AS9100 | Requisitos para los materiales utilizados en productos militares de aviación |

Además, los productos de alta calidad deben proporcionar: trazabilidad del número de horno, informe del lote de polvo original, informe completo de pruebas no destructivas del proceso y datos completos de inspección de propiedades mecánicas.

resumen

Las varillas de aleación de tungsteno cumplen la doble función de penetrar el núcleo y actuar como anclaje de estabilización estructural en equipos militares, especialmente en la aplicación de núcleos de proyectiles cinéticos y la estructura del compartimento de cola de misiles, aprovechando al máximo las ventajas de su material, como alta densidad, alta resistencia y estabilidad térmica.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Impulsada por la tendencia hacia la sustitución del uranio empobrecido, su fabricación ecológica, no tóxica y de precisión controlable, la aleación de tungsteno se ha convertido en un importante material estratégico para los sistemas modernos de ataque de precisión militar y de vuelo de alta movilidad.

5.3 Campo de la energía nuclear (barras de protección radiológica, estructuras de absorción de neutrones)

Las aleaciones de tungsteno desempeñan un papel fundamental en el campo de la energía nuclear gracias a su ultraalta densidad, excelente estabilidad a altas temperaturas y buena capacidad de protección radiológica. Especialmente en centrales nucleares, reactores de investigación, centrales nucleares y sistemas de tratamiento de residuos nucleares, las varillas de aleación de tungsteno se utilizan ampliamente para fabricar **componentes de protección radiológica**, **estructuras de absorción de neutrones**, **Componentes de protección de embalaje de combustible nuclear**, etc. Su rendimiento integral es muy superior al de los materiales tradicionales de plomo, acero y uranio.

5.3.1 Antecedentes y necesidades de aplicación en el campo de la energía nuclear

En los sistemas de energía nuclear, las principales funciones de las varillas de aleación de tungsteno incluyen:

- **Blindaje contra rayos gamma y rayos X** : el alto número atómico del tungsteno ($Z=74$) le otorga excelentes capacidades de absorción de rayos de alta energía;
- **Absorción de neutrones y blindaje de neutrones térmicos** : aunque el tungsteno en sí no tiene una sección transversal de captura de neutrones tan buena como el boro o el cadmio, las varillas de aleación de tungsteno pueden transportar absorbentes de neutrones en estructuras compuestas, cumpliendo una doble función de estructura + blindaje;
- **Estabilidad estructural y retención de resistencia a altas temperaturas** : la aleación de tungsteno mantiene la estabilidad dimensional y la resistencia mecánica en el entorno de alta temperatura y fuerte radiación del reactor nuclear, lo que es una base importante para los componentes estructurales del sistema de energía nuclear;
- **La alta conductividad térmica facilita la gestión térmica** : la buena conductividad térmica del tungsteno puede conducir el calor de manera eficiente durante las reacciones nucleares, evitando la concentración de tensión térmica que causa fatiga estructural.

5.3.2 Análisis de las ventajas de las varillas de protección radiológica de aleación de tungsteno

| Proyecto de performance | de Varilla de aleación de tungsteno | Materiales de protección contra el plomo | de Aleación de uranio (DU) |
|-------------------------------|-------------------------------------|--|----------------------------|
| Densidad (g/cm ³) | 17,0–18,5 | ~11.3 | ~19.1 |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | | |
|---|---|---------------------------------|--|
| Capacidad de protección contra rayos gamma | Excelente (alto Z, alta densidad) | generalmente | Excelente (ligeramente mejor que el tungsteno) |
| Capacidad de blindaje contra neutrones | Medio (se pueden agregar B/Cd en combinación) | Diferencia | Normal (parcialmente absorbido) |
| Estabilidad térmica | Excelente (estable a >1200 °C) | Pobre (ablandamiento a 100°C) | excelente |
| Toxicidad y radiactividad | No tóxico y no radiactivo. | venenoso | Radiactivo y difícil de reciclar |
| Capacidades de procesamiento y reciclaje | bien | Fácil de deformar y contaminar. | Procesamiento difícil, grandes restricciones de seguridad. |

Las varillas de aleación de tungsteno se han convertido en una solución ideal para reemplazar las aleaciones de uranio y los materiales de plomo debido a sus **ventajas en materia de protección ambiental, seguridad** y resistencia **mecánica/radiación**.

5.3.3 Formas estructurales típicas de varillas de aleación de tungsteno para energía nuclear

1. Varilla de protección

- Las varillas de aleación de tungsteno sólidas o huecas se utilizan para la periferia del núcleo, el blindaje del canal, etc. según el espesor requerido;
- Se utiliza en combinación con carcasas de acero inoxidable y cobre-berilio;
- El requisito de densidad general es $\geq 17,8 \text{ g/cm}^3$.

2. Barra de estructura de absorción compuesta de neutrones

- materiales B_4C , Gd_2O_3 , Cd ;
- Absorción integrada de neutrones térmicos + bloqueo de rayos gamma;
- Se utiliza para barras de control de seguridad de reactores, barras de parada rápida, etc.

3. Varillas estructurales de alta carga térmica

- El fluido refrigerante fluye a través de la estructura hueca de la aleación de tungsteno;
- Se utiliza en sistemas de apoyo a la disipación de calor de centrales nucleares;
- Los requisitos incluyen alta conductividad térmica, estabilidad dimensional y resistencia a la corrosión.

4. Barras de protección para el transporte y almacenamiento de combustible nuclear

- La varilla de aleación de tungsteno se instala en la capa interior del barril/contenedor de embalaje;
- Desempeña la doble función de protección contra rayos gamma y resistencia al impacto mecánico;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Cumple con las normas de seguridad del transporte del OIEA.

5.3.4 Requisitos de rendimiento del material

Las varillas de aleación de tungsteno para energía nuclear no solo requieren alta densidad y capacidad de absorción de radiación, sino que también deben mantener la integridad estructural y la estabilidad física en entornos extremos:

- **Control de densidad** : $\geq 17,5 \text{ g/cm}^3$, se requiere buena uniformidad;
- **Estabilidad dimensional** : Sin deformación en servicio continuo a $300 \text{ }^\circ\text{C} \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$;
- **Resistencia a la corrosión** : resistente al agua desionizada, solución de ácido bórico, vapor, etc.
- **Conductividad térmica** : $> 90 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, reduciendo el estrés del gradiente térmico;
- **Requisitos de resistencia** : resistencia a la tracción $\geq 700 \text{ MPa}$, buena tenacidad al impacto;
- **Estabilidad a la irradiación** : No se produce destrucción de la estructura reticular después de la irradiación;
- **Diseño de captura de neutrones** : se requiere una alta uniformidad cuando se dopa con compuestos con Gd, B y Cd;
- **Vida útil y rendimiento frente a la fatiga** : admite un uso continuo a largo plazo > 10 años.

5.3.5 Casos prácticos de aplicación

(1) Módulo de protección del núcleo de la central nuclear

- Las varillas de aleación de tungsteno forman la capa de protección contra rayos gamma alrededor de la estructura del núcleo del reactor;
- Se utiliza en combinación con grafito, refrigeración por agua, aleación de circonio, etc.
- Un proyecto nacional de energía nuclear de tercera generación ha adoptado un blindaje de aleación de tungsteno para sustituir la capa de plomo.

(2) Barras de control y barras de seguridad del reactor de investigación

- Se utiliza una varilla hueca de aleación de tungsteno recubierta con una estructura de polvo B_4C como barra de control;
- Cuando es necesario detener rápidamente la reacción nuclear, se puede insertar una varilla de aleación de tungsteno en el núcleo para absorber energía y bloquear los rayos gamma;
- La mayoría de los reactores nucleares de investigación científica utilizan materiales compuestos "W-Ni-Fe/ B_4C " como componentes terminales de seguridad.

(3) Estructura de revestimiento del contenedor de almacenamiento en seco de residuos nucleares

- Las varillas de protección de aleación de tungsteno se colocan en la capa exterior del tanque seco de desechos nucleares;
- En comparación con el revestimiento de plomo, proporciona una protección más fuerte sin riesgo de fugas;
- Tiene la capacidad de soportar fuertes terremotos y fuertes impactos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3.6 Normas y sistemas de certificación pertinentes

Las varillas de aleación de tungsteno se utilizan en el campo de la energía nuclear y deben cumplir las siguientes normas internacionales/industriales:

| Estándar/Sistema | contenido |
|--|---|
| ASTM B777 | Clasificación y requisitos de rendimiento de la aleación de tungsteno de alta densidad |
| ISO 12749/BS EN 61331 | Norma de evaluación del desempeño de los materiales de protección nuclear |
| OIEA TS-G-1.1 | Directrices de seguridad para el embalaje y transporte de materiales nucleares |
| GB/T 24298 | Propiedades y métodos de prueba de materiales de aleación de tungsteno para energía nuclear |
| Norma interna de la CNNC/Corporación Nuclear Nacional de China | Normas del proceso de adquisición y aceptación de materiales de grado nuclear |

Además, la exportación de productos para fines nucleares también debe cumplir con las disposiciones de control del Grupo de Suministradores Nucleares (NSG) y declarar **una Declaración de Uso Final para fines nucleares**.

5.3.7 Tendencias de desarrollo y perspectivas tecnológicas

- **Estructura de aleación de tungsteno compuesta** : integra aleación de tungsteno con B, Gd y otros materiales mediante co-sinterización, prensado en caliente, nano-recubrimiento, etc. para mejorar la capacidad de protección coordinada de neutrones y rayos gamma;
- **Aplicación de estructura de blindaje nuclear modular** : Las varillas de aleación de tungsteno se procesan con precisión y se conectan mecánicamente para formar módulos de blindaje desmontables y reconstruibles, que son adecuados para plantas de energía nuclear móviles y reactores a bordo;
- **Mejora del rendimiento del servicio de alta temperatura y alta presión** : desarrollar una fórmula de aleación de tungsteno resistente a altas temperaturas y un proceso de tratamiento térmico para cumplir con las condiciones de alta energía de los futuros reactores nucleares avanzados (como reactores rápidos, sistemas ADS);
- **Componentes nucleares de aleación de tungsteno impresos en 3D** : se utilizará la fabricación aditiva para fabricar componentes nucleares de aleación de tungsteno con geometría compleja y estructura de cavidad para reducir el peso y mejorar el rendimiento de disipación de calor.

resumen

Las varillas de aleación de tungsteno cumplen múltiples funciones en el campo de la energía nuclear, como soporte estructural, protección radiológica y gestión térmica. Gracias a su alta densidad, protección ambiental y seguridad, se han convertido en uno de los materiales esenciales indispensables en el sistema de energía nuclear. Con la creciente demanda mundial de energía

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nuclear limpia e instalaciones nucleares seguras, las perspectivas de aplicación de las aleaciones de tungsteno en componentes de protección y elementos de control de neutrones serán cada vez mayores.

5.4 Varillas estructurales de alta densidad para equipos médicos (dispositivos de radioterapia)

Con el rápido desarrollo de la tecnología moderna de radioterapia, la aleación de tungsteno se ha convertido en un material clave para la protección contra la radiación y el ajuste de dosis en equipos médicos gracias a su alta densidad, alto rendimiento de absorción y buenas propiedades mecánicas. El uso de varillas de aleación de tungsteno en equipos de radioterapia (como aceleradores lineales, bisturí de rayos gamma, CyberKnife, etc.) no solo garantiza un control preciso de la radiación, sino que también protege eficazmente al personal médico y a los pacientes de daños innecesarios por radiación.

5.4.1 Antecedentes de la aplicación de la aleación de tungsteno en equipos de radioterapia

La radioterapia se basa en rayos X de alta energía, rayos gamma o haces de electrones para irradiar con precisión la zona tumoral. Las estructuras de protección y ajuste del equipo deben cumplir los siguientes requisitos:

- **Absorber eficientemente la radiación** para evitar fugas de radiación;
- **El material tiene una alta densidad**, logrando el máximo efecto de protección dentro de un volumen limitado;
- **Fuerte estabilidad mecánica**, capaz de soportar el movimiento y la vibración del equipo;
- **La alta precisión de procesamiento** garantiza una guía precisa del haz de radiación;
- **Bioseguro**, no tóxico e inofensivo, conforme a los estándares médicos y sanitarios.

La aleación de tungsteno (17,0-18,8 g/cm³) lo convierte en un material ideal para proteger de los rayos gamma y los rayos X, superior a los materiales de plomo tradicionales y más respetuoso con el medio ambiente.

5.4.2 Ubicaciones de aplicación típicas de las varillas de aleación de tungsteno

1. Protectores y bujes para equipos de radioterapia

- Se utiliza alrededor del tubo acelerador lineal para bloquear los rayos dispersos;
- El mecanizado de precisión garantiza la uniformidad de la forma y la dosis del haz de radiación.

2. Contrapeso y estructura de palas en álabes reguladores (diafragma multilámina, MLC)

- Las hojas MLC generalmente están hechas de aleación de tungsteno debido a su alta densidad, que puede bloquear eficazmente la radiación y controlar la forma del área de tratamiento;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Se pueden utilizar varillas de aleación de tungsteno para hacer el esqueleto de la hoja y el contrapeso para garantizar un movimiento suave y preciso de la hoja.
- 3. **Muro de protección radiológica y revestimiento de panel de protección móvil**
 - Las varillas o placas de aleación de tungsteno de alta densidad forman una estructura protectora para bloquear la penetración de la radiación;
 - Diseño ligero, reduciendo el peso y mejorando la seguridad.
- 4. **Estructura de peso interno del dispositivo de ajuste de dosis**
 - Ajustar la dosis y la dirección de la radiación para garantizar un control preciso del tratamiento;
 - Las varillas de aleación de tungsteno cumplen con los altos requisitos de diseño mecánico debido a su tamaño estable y buena procesabilidad.

5.4.3 Requisitos clave de rendimiento

Las varillas de aleación de tungsteno para equipos de radioterapia médica deben cumplir los siguientes indicadores técnicos:

- **Densidad** : $\geq 17,5 \text{ g/cm}^3$, garantizando una capacidad de absorción de radiación suficiente;
- **Precisión dimensional** : $\pm 0,01 \sim 0,03 \text{ mm}$, lo que garantiza la correspondencia estructural y la precisión de radiación;
- **Propiedades mecánicas** :
 - Resistencia a la tracción $\geq 700 \text{ MPa}$, capaz de resistir la tensión generada durante el funcionamiento del equipo;
 - Dureza $\geq \text{HRC } 30$, garantizando resistencia al desgaste;
- **Calidad de la superficie** : $R_a \leq 0,4 \mu\text{m}$, para evitar afectar el movimiento del equipo y la transmisión de radiación ;
- **No tóxico e inofensivo** : cumple con los estándares de seguridad de dispositivos médicos y evita fugas de elementos dañinos;
- **Estabilidad ambiental** : resistencia a la corrosión, resistencia a altas temperaturas (en entornos de trabajo normales) y sin deformación después de un uso prolongado.

5.4.4 Tecnología de procesamiento y fabricación

Las varillas de aleación de tungsteno de grado médico se preparan generalmente mediante tecnología de pulvimetalurgia de alta pureza y luego se conforman mediante mecanizado de precisión. Los principales procesos incluyen:

- **El prensado isostático en caliente de precisión (HIP)** garantiza que el material sea denso y libre de poros;
- **Torneado y rectificado CNC** para lograr formas complejas y alta precisión dimensional;
- **Pulido y limpieza de superficies** para eliminar marcas de procesamiento y contaminación;
- **Pruebas no destructivas** (ultrasonidos, rayos X) para garantizar que no haya defectos internos;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Los recubrimientos de superficies** (como películas de óxido o recubrimientos cerámicos) pueden mejorar la resistencia a la corrosión y la biocompatibilidad.

5.4.5 Casos típicos

- **Cuchillas de aleación de tungsteno para acelerador lineal de apertura multihoja**
 - Fabricada en aleación de tungsteno W-Ni-Fe, la densidad de la hoja alcanza los 18,0 g/cm³;
 - El tamaño de la hoja se controla con precisión y el ajuste a nivel milimétrico se puede lograr con el sistema de transmisión mecánica de alta precisión;
 - Mejora enormemente la precisión de posicionamiento del área objetivo del tratamiento y la seguridad del paciente.
- **Escudo protector de cabeza para bisturí de rayos gamma**
 - de aleación de tungsteno de ultra alta densidad, el espesor es solo la mitad del material protector de plomo;
 - Mediante un mecanizado fino y un tratamiento térmico, se garantiza la estabilidad a largo plazo y el rendimiento de protección;
 - Mejora la portabilidad del dispositivo y reduce el peso general.

5.4.6 Tendencias de desarrollo y fronteras tecnológicas

- **materiales de aleación de tungsteno de alto rendimiento**
 - Las nanopartículas refuerzan las aleaciones de tungsteno para mejorar la resistencia y la tenacidad y prolongar la vida útil del equipo;
 - La aleación de tungsteno de bajo magnetismo cumple con los requisitos de compatibilidad con MRI.
- **Fabricación inteligente de hojas de aleación de tungsteno**
 - Utilizar tecnología de fabricación aditiva (impresión 3D) para fabricar estructuras complejas y reducir el peso;
 - Combinado con el procesamiento láser, mejora la calidad de la superficie y la eficiencia de fabricación.
- **Alternativa respetuosa con el medio ambiente a los materiales de plomo tradicionales**
 - La aleación de tungsteno, como material alternativo no tóxico, cumple con las tendencias y regulaciones de protección ambiental médica;
 - Lograr un tratamiento y reciclaje seguro de los residuos médicos.

resumen

Las varillas de aleación de tungsteno se han convertido en un material esencial para los equipos modernos de radioterapia médica gracias a su alta densidad, alta precisión y excelentes propiedades mecánicas. Sus ventajas en protección radiológica, ajuste de dosis y estabilidad estructural han mejorado considerablemente la precisión y la seguridad de la tecnología de radioterapia. Con el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

avance de la ciencia de los materiales y la tecnología de fabricación, la aplicación de la aleación de tungsteno en el campo médico se extenderá y profundizará.

5.5 Barras de equilibrio dinámico y piezas de inercia rotatorias en instrumentos de alta precisión

Las varillas de aleación de tungsteno se utilizan ampliamente en diversos instrumentos y equipos de alta precisión gracias a su alta densidad, rigidez y excelente rendimiento de mecanizado, especialmente en piezas rotativas que requieren un equilibrado dinámico y un control de inercia de alta precisión. Permiten un ajuste preciso de la distribución de masa y la optimización del rendimiento dinámico, además de mejorar la precisión de la medición y la estabilidad operativa del instrumento.

5.5.1 Antecedentes e importancia de la aplicación

Los instrumentos de alta precisión, como giroscopios, giroscopios de volante de inercia, equipos de navegación aeroespacial, sistemas de potencia de precisión y maquinaria rotatoria de alta velocidad, presentan requisitos extremadamente altos en términos de equilibrio dinámico y rendimiento inercial. Las principales funciones de las barras de equilibrio dinámico y los componentes inerciales son:

- Ajusta la distribución de masa del cuerpo giratorio, elimina el par desequilibrado y reduce la vibración y el ruido;
- Mejore la estabilidad y la vida útil del cuerpo giratorio y evite el desgaste de los cojinetes y las fallas del equipo causadas por desequilibrio;
- Optimice el rendimiento de respuesta del instrumento y la precisión del control ajustando con precisión el momento de inercia.

Las varillas de aleación de tungsteno son materiales ideales para la fabricación de estos componentes clave debido a su alta densidad ($17,0 \sim 18,8 \text{ g/cm}^3$) y excelentes propiedades mecánicas.

5.5.2 Estructura y diseño de la barra de equilibrio dinámico

- **Selección de materiales** : utilice principalmente aleaciones de tungsteno de alta densidad W-Ni-Fe o W-Ni-Cu para garantizar una alta densidad y una resistencia mecánica suficiente;
- **Especificaciones de forma** : comúnmente varillas cilíndricas, varillas escalonadas o varillas de sección especial, que son fáciles de integrar en estructuras mecánicas para ajustar la distribución de masa;
- **Precisión dimensional** : Los requisitos de precisión de procesamiento son extremadamente altos y la tolerancia dimensional generalmente se controla dentro de $\pm 0,01 \text{ mm}$ para garantizar el efecto de equilibrio dinámico;
- **Tratamiento de superficie** : Mejore la calidad de la superficie mediante pulido, niquelado o recubrimiento para reducir la fricción y la corrosión.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.5.3 Requisitos de rendimiento para piezas de inercia giratorias

Las piezas de inercia giratorias generalmente deben tener las siguientes propiedades:

- **La alta densidad y uniformidad** garantizan un cálculo preciso del momento de inercia;
- **Buena resistencia mecánica y tenacidad**, capaz de resistir la fuerza centrífuga generada durante la rotación a alta velocidad;
- **Estabilidad térmica** para garantizar un tamaño y rendimiento estables durante el funcionamiento a largo plazo;
- **Resistencia a la corrosión**, prolongando la vida útil, especialmente en ambientes corrosivos o de alta humedad.

No se deforma ni falla al funcionar a altas velocidades, manteniendo así el funcionamiento de alta precisión del equipo.

5.5.4 Casos típicos de aplicación

1. dinámico

se utilizan ampliamente en las piezas giratorias de los giroscopios aeroespaciales. Mediante un ajuste preciso de la distribución de masa, se puede lograr una desviación cero y una deriva extremadamente baja del equipo.

2. La maquinaria rotatoria de alta velocidad

se utiliza para el equilibrio dinámico de motores de alta velocidad y álabes de turbinas, reduciendo eficazmente la vibración y mejorando la confiabilidad y la vida útil del equipo.

3. Las piezas garantizan una rotación suave y precisión de medición en las partes giratorias de instrumentos de medición de precisión,

como platos giratorios de microscopios electrónicos e interferómetros láser.

5.5.5 Proceso de producción y métodos de prueba

- **Proceso de fabricación**: las varillas de aleación de tungsteno de alta densidad se preparan mediante pulvimetalurgia y se forman mediante torneado y rectificado de precisión;
- **Tratamiento térmico**: mejora las propiedades mecánicas y la uniformidad estructural interna;
- **Tratamiento de superficie**: revestimiento anticorrosión y pulido para aumentar la vida útil;
- **Inspección de calidad**: Se utilizan un probador de equilibrio dinámico, una máquina de medición de coordenadas de alta precisión y tecnología de pruebas no destructivas para garantizar cero defectos.

5.5.6 Tendencias futuras del desarrollo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Aleación de tungsteno micronanoestructurada** : mejora las propiedades mecánicas y la resistencia a la fatiga;
- **Diseño liviano : reduzca la cantidad de** aleación de tungsteno a través de la optimización estructural para lograr peso liviano y alta resistencia;
- **Tecnología de fabricación aditiva** : realizar la fabricación integrada de piezas de equilibrio dinámico con formas complejas;
- **Sistema de equilibrio dinámico inteligente** : combinado con tecnología de detección, la posición de la barra de equilibrio dinámico de aleación de tungsteno se ajusta en tiempo real para mejorar el rendimiento dinámico del sistema.

resumen

Las varillas de aleación de tungsteno desempeñan un papel fundamental en el campo de las barras de equilibrio dinámico y las piezas inerciales rotativas en instrumentos de alta precisión. Su alta densidad y excelentes propiedades mecánicas permiten que el equipo funcione con mayor fluidez y precisión. Con el continuo avance de la tecnología de materiales y los procesos de fabricación, las aleaciones de tungsteno tendrán un mayor potencial en la maquinaria rotativa de precisión y los instrumentos de alta gama.

5.6 Estructuras de soporte y disipación de calor en la industria electrónica y equipos de comunicación

Con el rápido desarrollo de los equipos electrónicos y la tecnología de las comunicaciones, la miniaturización, la alta densidad de potencia y el funcionamiento a alta velocidad de los dispositivos han exigido un mayor rendimiento a los materiales. Las varillas de aleación de tungsteno se han convertido en materiales estructurales clave para el soporte y la disipación del calor en la industria electrónica y los equipos de comunicaciones gracias a su alta densidad, alta conductividad térmica y buena resistencia mecánica, lo que mejora eficazmente la estabilidad y la eficiencia de la gestión térmica de los equipos.

5.6.1 Antecedentes de la aplicación

La gestión térmica y el rendimiento de soporte mecánico de los materiales:

- El equipo genera mucho calor cuando está funcionando y una mala disipación del calor provocará una degradación del rendimiento o incluso daños;
- La estructura de soporte debe soportar tensiones mecánicas y térmicas y mantener la precisión del posicionamiento del dispositivo;
- El material debe tener buena estabilidad dimensional y compatibilidad electromagnética.

Las varillas de aleación de tungsteno son una opción ideal para satisfacer estas necesidades debido a su alta densidad, excelente conductividad térmica y bajo coeficiente de expansión térmica.

5.6.2 Principales aplicaciones de las aleaciones de tungsteno en equipos electrónicos y de comunicación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **Estructura de soporte de disipación de calor para dispositivos de alta potencia**
 - Base de disipación de calor y soporte para amplificadores de potencia y módulos RF;
 - La aleación de tungsteno ayuda a eliminar rápidamente el calor generado por el dispositivo;
 - La alta densidad y rigidez del material garantizan una estructura estable y reducen el impacto de la vibración.
2. **Pesos de amortiguación en dispositivos de comunicación de microondas y ondas milimétricas**
 - mediante contrapeso de aleación de tungsteno;
 - Controle eficazmente el micromovimiento y la desviación posicional de los componentes de RF.
3. **Materiales disipadores de calor en encapsulados de semiconductores**
 - La aleación de tungsteno se utiliza como disipador de calor para el empaquetado de chips de alta gama, lo que ayuda a mejorar la eficiencia de disipación de calor del chip;
 - Tenga en cuenta tanto la resistencia mecánica como la expansión térmica para evitar que la tensión térmica dañe el chip.
4. **Piezas de soporte y posicionamiento mecánico de precisión**
 - Mantener la posición relativa y la estabilidad de pequeñas piezas mecánicas;
 - Se utiliza comúnmente en soportes y accesorios mecánicos en equipos de comunicación de fibra óptica y sistemas láser.

5.6.3 Indicadores clave de desempeño de materiales

- **Densidad** : $\geq 17,0 \text{ g/cm}^3$, garantizando una alta rigidez y estabilidad de la estructura;
- **Conductividad térmica** : $\geq 120 \text{ W / (m \cdot K)}$, rápida disipación del calor;
- **Coefficiente de expansión térmica** : $\leq 6 \times 10^{-6} / \text{K}$, que coincide con la expansión térmica de los materiales semiconductores;
- **Resistencia mecánica** : resistencia a la tracción $\geq 800 \text{ MPa}$, dureza $\geq \text{HRC } 30$;
- **Precisión dimensional** : la precisión de procesamiento alcanza el nivel de micrones para garantizar la precisión del ensamblaje;
- **Rugosidad superficial** : $R_a \leq 0,2 \text{ } \mu\text{m}$, para evitar la concentración de tensiones y la resistencia térmica ;
- **Compatibilidad electromagnética** : baja capacidad de respuesta magnética, lo que reduce la interferencia de la señal.

5.6.4 Tecnología de procesamiento y control de calidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **El polvo de tungsteno de alta pureza se prepara mediante pulvimetalurgia** para garantizar que el material sea denso y uniforme;
- **Prensado isostático en caliente (HIP) y sinterización a alta temperatura** para mejorar la conductividad mecánica y térmica;
- **Mecanizado CNC** para lograr estructuras complejas y alta precisión dimensional;
- **Acabado de superficies**, incluido esmerilado y pulido, para reducir defectos de superficie;
- **Múltiples tecnologías de ensayos no destructivos** (ultrasonido, tomografía computarizada de rayos X) garantizan la calidad interna.

5.6.5 Casos típicos

- **Soporte de disipación de calor del módulo de potencia RF de la estación base 5G**
 - Las varillas de aleación de tungsteno soportan módulos amplificadores de alta potencia para garantizar la eficiencia de disipación de calor y la estabilidad mecánica;
 - Mejore la confiabilidad y la vida útil del equipo.
- **Módulo de refrigeración de chip de servidor de alta gama**
 - Utilice una estructura de disipador de calor de aleación de tungsteno para mejorar el control de la temperatura del chip;
 - Reduce el estrés térmico y garantiza un funcionamiento estable a largo plazo.
- **Soporte mecánico láser**
 - El soporte de aleación de tungsteno garantiza la estabilidad de la trayectoria del láser;
 - El diseño antivibración reduce los errores ópticos.

5.6.6 Tendencias de desarrollo y perspectivas tecnológicas

- **mejora el rendimiento de gestión térmica de la aleación de tungsteno nanoestructurada**, logrando una disipación de calor más eficiente;
- **La aleación de tungsteno y los materiales a base de carbono** reducen el peso general al tiempo que garantizan el rendimiento de disipación del calor;
- **Integrar tecnología de fabricación aditiva** para fabricar estructuras complejas de disipación de calor y soportes de dispositivos;
- **El sistema de disipación de calor inteligente se combina con materiales de aleación de tungsteno** para lograr un control de temperatura en tiempo real y una disipación de calor adaptativa.

resumen

Las varillas de aleación de tungsteno se utilizan en las estructuras de soporte y disipación de calor de la industria electrónica y los equipos de comunicación. Gracias a su alta densidad, alta conductividad térmica y estabilidad mecánica, mejoran considerablemente el rendimiento y la fiabilidad de los equipos. Con el continuo aumento de la densidad de potencia de los equipos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

electrónicos y la tendencia a la miniaturización, el papel de la aleación de tungsteno cobrará mayor importancia, impulsando a la industria hacia un desarrollo eficiente e inteligente.



Capítulo 6 Investigación, desarrollo y mejora de varillas de aleación especial de tungsteno

6.1 Varilla de aleación de tungsteno reforzada con nanopartículas

A medida que la fabricación de equipos de alta gama y las condiciones de trabajo extremas imponen mayores exigencias al rendimiento de las aleaciones de tungsteno, las limitaciones de las aleaciones tradicionales en cuanto a resistencia, tenacidad y estabilidad térmica se hacen cada vez más evidentes. La tecnología de mejora con nanopartículas se ha convertido en una de las claves para superar las limitaciones de rendimiento de los materiales. Mediante la dispersión uniforme de fases de refuerzo a escala nanométrica en la matriz de la aleación de tungsteno, se puede mejorar eficazmente el rendimiento integral del material y ampliar su campo de aplicación.

Concepto de diseño de una aleación de tungsteno reforzada con nanopartículas

La varilla de aleación de tungsteno reforzada con nanopartículas se basa principalmente en los siguientes conceptos de diseño:

- **Efecto de fortalecimiento de las nanopartículas** : las partículas de tamaño nanométrico se distribuyen uniformemente en la matriz como segunda fase, lo que dificulta la migración del límite de grano y el movimiento de dislocación, y mejora la resistencia y la dureza;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Fortalecimiento de la interfaz** : Las nanopartículas y la matriz de tungsteno están estrechamente unidas para formar una interfaz fuerte, lo que mejora la tenacidad y la tenacidad a la fractura del material;
- **Estabilidad térmica mejorada** : las nanopartículas pueden fijar los límites de los granos, inhibir el crecimiento de los granos a altas temperaturas, mantener la estructura del grano fino y mantener el rendimiento a altas temperaturas;
- **Mayor resistencia a la radiación** : las nanopartículas actúan como puntos de captura para los defectos de radiación, lo que aumenta la vida útil de las aleaciones de tungsteno en entornos de alta irradiación como la energía nuclear.

6.1.2 Materiales de fase nano-reforzada comúnmente utilizados y sus características

| materiales de nanopartículas | Características principales | Ventajas | Enfoque de la aplicación |
|--|--|---|--|
| Nanopartículas de óxido (como Y_2O_3 , Al_2O_3) | Excelente estabilidad térmica e inercia química. | Pasivación a alta temperatura, estabilización del grano. | Aleación de tungsteno resistente a la corrosión a altas temperaturas, de alta resistencia y tenacidad. |
| Nanopartículas de carburo (como WC, TiC) | Alta dureza, resistencia al desgaste. | Mejora significativamente la dureza y la resistencia al desgaste. | Materiales de herramientas, piezas mecánicas |
| Silicatos y óxidos compuestos | Buena adaptación a la expansión térmica y mejor tenacidad. | Reducir el estrés térmico y mejorar las propiedades termomecánicas. | Envases electrónicos, estructuras térmicamente estables |
| Nanotubos de carbono y derivados del grafeno | Alta conductividad, alta resistencia. | Resistencia y conductividad significativamente mejoradas | Aleación de tungsteno funcional, aplicación electromagnética. |

Proceso de preparación de aleación de tungsteno reforzada con nanopartículas

La aleación de tungsteno reforzada con nanopartículas implica una tecnología de mezcla y conformado de polvo de alta precisión. Los principales procesos incluyen:

1. **Preparación y dispersión de polvo de nanopartículas**
 - Las nanopartículas se preparan mediante precipitación química, secado por pulverización, aleación mecánica, etc.;
 - La tecnología de dispersión ultrasónica y molienda de bolas de alta energía se utiliza para dispersar uniformemente las nanopartículas en polvo de tungsteno para evitar la aglomeración.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Mezcla y pretratamiento de polvos

- Las nanopartículas y el polvo de tungsteno se mezclan completamente bajo una atmósfera inerte para garantizar una interfaz limpia;
- En algunos procesos se añaden dispersantes y aglutinantes para mejorar la fluidez del polvo.

3. Formación y prensado

- Conformado mediante prensado isostático en frío (CIP), prensado en matriz o prensado isostático en caliente (HIP);
- El prensado isostático en caliente puede lograr una estructura densificada con alta densidad y baja porosidad.

4. Sinterización y tratamiento térmico

- La sinterización al vacío a alta temperatura promueve la unión de la interfaz entre la matriz de tungsteno y las nanopartículas;
- Un tratamiento térmico adecuado puede regular el tamaño del grano y la distribución de la fase de fortalecimiento.

5. Mecanizado y tratamiento de superficies

- Mecanizado de precisión para obtener el tamaño y forma requeridos;
- El pulido y recubrimiento de superficies mejoran el rendimiento.

6.1.4 Análisis del mecanismo de mejora del rendimiento

• Mecanismo de Fortalecimiento

- Las nanopartículas actúan como barreras para evitar el movimiento de dislocación, aumentando significativamente la resistencia a la tracción y al rendimiento;
- Las nanopartículas refinan los granos, aumentan la dureza y mejoran la tenacidad;
- La interfaz reforzada con partículas puede fijar eficazmente los límites del grano y evitar el engrosamiento del grano por alta temperatura.

• Estabilidad térmica y resistencia a la corrosión

- La estabilidad térmica de las nanopartículas mejora la capacidad de servicio a altas temperaturas del material;
- La formación de una capa de pasivación inhibe la corrosión por oxidación y prolonga la vida útil.

• Supresión de daños por radiación

- Las nanopartículas capturan los defectos generados por la radiación, lo que reduce el deslizamiento por dislocación y la agregación de vacantes;
- Mejora la estabilidad de la irradiación de la aleación de tungsteno en entornos como los reactores nucleares.

6.1.5 Casos de aplicación y verificación de efectos

• Varilla de aleación de tungsteno para energía nuclear

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Las nanopartículas de Y_2O_3 añadidas muestran una mejor estabilidad estructural y resistencia a la radiación en condiciones de alta temperatura e irradiación;
- Es más de un 30% más largo que el de la aleación de tungsteno tradicional.
- **Piezas de motores de aeronaves de alta temperatura**
 - nano- TiC logra una resistencia a la fatiga térmica significativamente mejorada;
 - La resistencia del material aumenta entre un 20% y un 40% y la tenacidad mejora significativamente.
- **Materiales disipadores de calor para embalajes electrónicos**
 - nano- Al_2O_3 mejora la conductividad térmica y la expansión térmica, lo que reduce el estrés térmico;
 - La estabilidad térmica mejorada garantiza un funcionamiento estable a largo plazo.

6.1.6 Tendencias y desafíos del desarrollo

- **Sistema de refuerzo nanocompuesto multicomponente**
 - Combinando múltiples nanopartículas para lograr una mejora sinérgica y alcanzar el límite de rendimiento;
- **Ingeniería de interfaz de nanopartículas**
 - Optimizar la estructura de la interfaz entre las partículas y la matriz, y mejorar la resistencia y tenacidad de la unión de la interfaz;
- **Tecnología de preparación ecológica y de bajo coste**
 - Reducir el costo del proceso de preparación y composición de nanopartículas y mejorar la viabilidad de la industrialización;
- **Controlar con precisión el tamaño y la distribución de las nanopartículas.**
 - Monitoreo en tiempo real de la microestructura para el diseño preciso de materiales utilizando técnicas de caracterización avanzadas.

resumen

Las varillas de aleación de tungsteno reforzadas con nanopartículas mejoran significativamente la resistencia, la tenacidad, la estabilidad a altas temperaturas y la resistencia a la radiación de las aleaciones de tungsteno mediante la introducción de fases nanorreforzadas de alto rendimiento. Esto proporciona una base sólida para su aplicación en campos de alta tecnología como la energía nuclear, la industria aeroespacial y la electrónica. En el futuro, con el continuo avance en la preparación de nanomateriales y la tecnología de compuestos, las aleaciones de tungsteno reforzadas con nanopartículas mostrarán un mayor potencial de aplicación y un rendimiento excepcional.

Diseño y mejora del rendimiento de varillas de aleación de tungsteno microaleadas

La tecnología de microaleación es una forma eficaz de mejorar las propiedades mecánicas y la estabilidad térmica de los materiales mediante la adición de trazas de elementos de aleación a la matriz de aleación de tungsteno para formar partículas finas de segunda fase o fortalecer la solución sólida. En comparación con la aleación tradicional, la microaleación se ha convertido en una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estrategia importante para optimizar el rendimiento de las varillas de aleación de tungsteno gracias a su baja dosificación, bajo coste y significativa mejora del rendimiento.

6.2.1 Concepto de diseño de microaleación

El objetivo principal de la microaleación es conseguir los siguientes objetivos añadiendo trazas de elementos de aleación:

- **Fortalecimiento de la solución sólida** : los elementos de aleación se distribuyen uniformemente en la matriz de tungsteno en forma de solución sólida, lo que aumenta la distorsión reticular y dificulta el movimiento de dislocación;
- **Fortalecimiento por precipitación** : formación de precipitados de segunda fase pequeños y distribuidos uniformemente, fijación de dislocaciones y límites de grano, y mejora de la resistencia y la tenacidad;
- **Refinamiento de grano** : inhibe el crecimiento del grano, optimiza la microestructura y mejora las propiedades mecánicas integrales de los materiales;
- **Mejora el rendimiento a altas temperaturas** : mejora la estabilidad térmica y la resistencia a la fluencia de los materiales y extiende la vida útil;
- **Optimizar la adaptabilidad del proceso** : mejorar el rendimiento de formación y procesamiento de los materiales y reducir la dificultad de procesamiento.

6.2.2 Elementos de microaleación comúnmente utilizados y sus mecanismos de acción

| Elementos de aleación | Mecanismo de acción | Efectos típicos |
|-----------------------|---|---|
| Titanio (Ti) | Formar carburos u óxidos estables y refinar granos. | Mejora la resistencia, la tenacidad y la resistencia al desgaste. |
| Niobio (Nb) | Fortalecimiento por solución sólida y fortalecimiento por precipitación | Mayor resistencia a altas temperaturas y a la corrosión. |
| Vanadio (V) | Fortalecimiento de la precipitación para formar partículas estables de segunda fase | Mayor resistencia al rendimiento y a la fatiga. |
| Aluminio (Al) | Refuerzo de solución sólida, mejorando la uniformidad de la estructura. | Mejora la resistencia a la oxidación a altas temperaturas y la tenacidad. |
| Zirconio (Zr) | Forman partículas de óxido estables, fijando los límites de grano. | Mejora las propiedades mecánicas a alta temperatura y la capacidad antioxidante. |
| Cobre (Cu) | Promover el fortalecimiento de los límites de grano y mejorar la plasticidad. | Optimice el rendimiento del procesamiento y mejore las propiedades mecánicas integrales |

Proceso de preparación de varillas de aleación de tungsteno microaleadas

1. Método de selección y adición de elementos de aleación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Seleccionar los elementos apropiados y sus contenidos (generalmente cantidades traza, dentro del rango de 0,1%-2%) de acuerdo con el rendimiento objetivo;
 - Utilice polvo de aleación de alta pureza o una mezcla de polvo de elementos para garantizar una distribución uniforme.
2. **Mezcla y homogeneización de polvos**
- Se utilizan molienda de bolas de alta energía, aleación mecánica y otras tecnologías para lograr una mezcla uniforme de elementos de aleación y polvo de tungsteno;
 - Evite la pulverización excesiva y la aglomeración controlando los parámetros de molienda de bolas.
3. **Conformado y sinterizado**
- Utilice prensado isostático en frío, moldeo y otros métodos para garantizar la densidad;
 - El proceso de sinterización a alta temperatura promueve la difusión de los elementos de aleación y la precipitación de la segunda fase.
4. **Tratamiento térmico y mecanizado**
- Un tratamiento térmico adecuado activa los elementos de aleación y forma fases de refuerzo;
 - El mecanizado de precisión garantiza las dimensiones finales y la calidad de la superficie.

6.2.4 Efecto de mejora del rendimiento

- **Propiedades mecánicas significativamente mejoradas**
 - La resistencia a la tracción y el límite elástico aumentan entre un 10% y un 30%, y algunas varillas de aleación de tungsteno microaleadas de alto rendimiento pueden incluso alcanzar más de 1000 MPa;
 - Se mejoran la elongación y la tenacidad a la fractura y se mejora la resistencia al impacto.
- **Mayor estabilidad térmica y resistencia a altas temperaturas.**
 - El fortalecimiento por precipitación de los elementos de microaleación inhibe el crecimiento del grano y el material mantiene una estructura organizativa estable a altas temperaturas;
 - Resistencia a la fluencia mejorada, adecuado para aplicaciones de alta temperatura.
- **Resistencia mejorada a la corrosión y oxidación.**
 - Formar una capa de pasivación estable para evitar la oxidación a alta temperatura y la corrosión química;
 - Mejorar la vida útil y la confiabilidad de los materiales.
- **Optimización del rendimiento del procesamiento**
 - Los elementos de microaleación mejoran la fluidez y la formabilidad del polvo, reduciendo la dificultad y el costo del procesamiento.

6.2.5 Ejemplos de aplicación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Material de núcleo de aleación de tungsteno en el campo militar.**
 - Al agregar trazas de Ti y Nb, se logra una alta resistencia y tenacidad y se mejora la capacidad de perforación de blindaje;
 - Mejora significativamente la resistencia al desgaste y al calor del núcleo.
- **Piezas estructurales aeroespaciales de alta temperatura**
 - microaleada en piezas de alta temperatura de los motores puede prolongar la vida útil;
 - Mantiene la resistencia a altas temperaturas y reduce el daño por fatiga térmica.
- **Varillas de aleación de tungsteno en equipos de radioterapia médica**
 - La adición de trazas de elementos Zr y V puede mejorar la resistencia al desgaste y a la corrosión y prolongar la vida útil del equipo.

6.2.6 Tendencias y desafíos del desarrollo

- **Control preciso del contenido y la distribución de elementos de microaleación**
 - Utilice técnicas de caracterización avanzadas para optimizar el diseño de aleaciones y lograr un control preciso del rendimiento.
- **Estudio sobre el mecanismo de mejora sinérgica de múltiples elementos**
 - Explore los efectos sinérgicos entre múltiples elementos de microaleaciones para mejorar aún más el rendimiento.
- **Tecnología de preparación ecológica y respetuosa con el medio ambiente**
 - Desarrollar un proceso de producción de aleaciones de tungsteno microaleadas de bajo consumo energético y baja contaminación para cumplir con los requisitos de protección ambiental.
- **Industrialización y aplicación a gran escala**
 - Resolver los problemas de costos y complejidad del proceso y promover la aplicación generalizada de aleaciones de tungsteno microaleadas en más campos.

resumen

La tecnología de microaleación logra mejoras multidimensionales en las propiedades mecánicas, la estabilidad térmica y el rendimiento de procesamiento de los materiales mediante la adición de trazas de elementos de aleación funcionales a las varillas de aleación de tungsteno. Esta tecnología no solo amplía el ámbito de aplicación de las aleaciones de tungsteno, sino que también ofrece una vía eficaz para la investigación y el desarrollo de materiales de aleación de tungsteno de alto rendimiento. En el futuro, con el desarrollo de la tecnología de preparación y la investigación teórica, las aleaciones de tungsteno microaleadas abrirán nuevas perspectivas de desarrollo.

6.3 Control de la composición de varillas de aleación de tungsteno de alta resistencia y tenacidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las varillas de aleación de tungsteno se utilizan en condiciones de trabajo extremas, como en la industria aeroespacial, militar y nuclear, y suelen requerir alta resistencia y tenacidad. Las aleaciones de tungsteno tradicionales se centran en la alta resistencia, pero carecen de tenacidad, lo que facilita su rotura. La estrategia clave para preparar varillas de aleación de tungsteno de alta resistencia y tenacidad es lograr una combinación óptima de matriz y segunda fase mediante un control preciso de la composición de la aleación.

6.3.1 Principios básicos para controlar la composición de aleaciones de tungsteno de alta resistencia y tenacidad

1. Selección razonable de la relación de los principales elementos de aleación.

- La proporción de elementos principales como níquel (Ni), hierro (Fe) y cobre (Cu) en la matriz de tungsteno determina las propiedades mecánicas y la estructura organizativa de la matriz;
- Ajuste razonablemente la relación Ni/Fe y el contenido de cobre para lograr un equilibrio entre resistencia y tenacidad.

2. Introducción de múltiples elementos de aleación para lograr un fortalecimiento sinérgico

- Al agregar trazas de elementos de microaleación como titanio (Ti), circonio (Zr) y vanadio (V), se forma una fase de fortalecimiento para lograr un fortalecimiento de grano fino y un fortalecimiento por precipitación;
- El efecto sinérgico de múltiples elementos mejora la unión de la interfaz y mejora la tenacidad general.

3. Controlar el contenido de elementos de impurezas

- Reduce impurezas como oxígeno, carbono y azufre, evita la formación de fases frágiles y mejora la tenacidad del material.

4. Optimizar el diseño del gradiente de composición de aleación

- Se adopta el diseño de aleación de gradiente para lograr una distribución zonificada de dureza y tenacidad y mejorar el rendimiento general.

6.3.2 Efectos de la regulación de la composición sobre la estructura del tejido

• Comportamiento de la solución sólida de

la matriz de tungsteno y elementos de aleación El fortalecimiento de la solución sólida de los elementos de aleación en la matriz de tungsteno mejora la resistencia, pero el exceso de solución sólida reducirá la tenacidad y el contenido debe controlarse con precisión.

• Formación de los precipitados de la segunda fase

Las partículas de carburo y óxido formadas por los elementos microaleantes actúan como fases de precipitación, afinan los granos y dificultan la propagación de grietas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **de la distribución y el tamaño del grano**
afecta el tamaño del grano y mejora la tenacidad y el rendimiento frente a la fatiga al inhibir el crecimiento del grano.

6.3.3 Diseño típico de composición de aleación de tungsteno de alta resistencia y alta tenacidad

| Sistema de ingredientes | Características principales | Actuación |
|--|---|--|
| W-Ni-Fe-Cu-Ti-Zr | Múltiples elementos de microaleación, refinamiento de grano y fortalecimiento por precipitación. | La resistencia aumentó entre un 20% y un 30% y la tenacidad mejoró significativamente. |
| W-Ni-Fe-Cu-V-Al | Solución sólida sinérgica y refuerzo por precipitación, excelente resistencia a la fatiga. | Mayor resistencia al impacto y mayor vida útil por fatiga. |
| Elementos de tierras raras W-Ni-Cu-traza | Los elementos de tierras raras mejoran la unión de los límites de grano y previenen la fractura frágil. | Mayor tenacidad a la fractura y mejor resistencia al calor. |

6.3.4 Mecanismo de mejora del rendimiento que aporta la regulación de los ingredientes

- **Fortalecimiento de la interfaz y fijación de grietas**
Las diminutas partículas de la segunda fase mejoran la fuerza de unión de los límites de grano y evitan que las grietas se extiendan a lo largo de los límites de grano.
- **La regulación de la composición del refinamiento del grano y los obstáculos de dislocación**
promueven el refinamiento del grano, aumentan la resistencia al movimiento de dislocación y mejoran la resistencia y la plasticidad.
- **El fortalecimiento de la solución sólida y la optimización de la tenacidad**
controlan con precisión el contenido de elementos de la solución sólida para equilibrar la relación entre resistencia y tenacidad.

6.3.5 Campos de aplicación y verificación de efectos

- **Militar La varilla de aleación de tungsteno resistente y de alta resistencia del material del núcleo perforante**
mejora significativamente la capacidad de penetración y la resistencia al desgaste, y reduce el riesgo de fractura frágil.
- **La fabricación de piezas estructurales de motores de aeronaves resistentes a altas temperaturas**
garantiza tanto la tenacidad como la resistencia de los materiales en entornos de alta temperatura, mejorando así la seguridad.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **El uso de componentes a prueba de radiación en los equipos de energía nuclear** prolonga su vida útil y reduce los costos de mantenimiento.

6.3.6 Dirección de desarrollo futuro

- **El diseño de materiales computacionales**
utiliza simulación computacional para predecir con precisión la relación entre la composición y el rendimiento, lo que permite producir aleaciones de tungsteno personalizadas de alta resistencia y alta tenacidad.
- **La tecnología de síntesis avanzada, combinada con el diseño de ingredientes**
, el tratamiento térmico, el prensado isostático en caliente y otras tecnologías, puede mejorar el efecto de la regulación de los ingredientes.
- **Regulación estructural multiescala**
desde niveles nano a macro para lograr la optimización del rendimiento.

resumen

El control de la composición de las varillas de aleación de tungsteno de alta resistencia y tenacidad logra una mejora sinérgica en la resistencia y la tenacidad mediante el diseño preciso de los tipos y proporciones de los elementos de aleación y la optimización de la microestructura. Esta estrategia no solo resuelve el problema de la fragilidad de las aleaciones de tungsteno, sino que también sienta las bases para su amplia aplicación en condiciones de trabajo extremas. Con el avance de la teoría del diseño de materiales y la tecnología de preparación, el rendimiento de las aleaciones de tungsteno de alta resistencia y tenacidad seguirá siendo revolucionario, impulsando la modernización tecnológica de las industrias relacionadas.

6.4 Estudio sobre el tratamiento térmico de varillas de aleación de tungsteno resistentes a altas temperaturas

La aleación de tungsteno se utiliza ampliamente en entornos de alta temperatura debido a su alto punto de fusión, alta densidad y excelentes propiedades mecánicas. Sin embargo, es propensa al crecimiento de grano, la inestabilidad estructural y la degradación del rendimiento en condiciones de temperatura extremadamente alta. El tratamiento térmico es un proceso clave para regular la microestructura y las propiedades de la aleación de tungsteno, y un medio importante para mejorar su resistencia a altas temperaturas.

6.4.1 Propósito e importancia del tratamiento térmico de la aleación de tungsteno

- **Mejorar la uniformidad organizacional** : eliminar la tensión interna y uniformizar el tamaño del grano mediante procesos de recocido y envejecimiento razonables;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **las propiedades mecánicas** : optimizar el tamaño del grano y la precipitación de la segunda fase para mejorar la resistencia y la tenacidad;
- **Estabiliza el rendimiento a alta temperatura** : inhibe el crecimiento del grano, retrasa el deslizamiento y el ablandamiento a alta temperatura;
- **Mejora la resistencia a la corrosión** : mejora la densidad y la estabilidad de la película de óxido mediante el tratamiento térmico de la superficie.

6.4.2 Procesos y parámetros de tratamiento térmico comúnmente utilizados

| Tipo de proceso | Rango de temperatura (°C) | Tiempo de aislamiento | Función principal |
|--|---------------------------|-----------------------|--|
| recocido | 800~1200 | 1~5 horas | Elimina el estrés interno y refina los granos. |
| envejecimiento | 500~900 | 2~10 horas | Promover la precipitación de la segunda fase y fortalecer la matriz. |
| Tratamiento de solución | 1200~1400 | 0,5~3 horas | Disolver la fase y uniformizar la composición. |
| Tratamiento térmico de superficies (nitruración/carburación) | 900~1100 | 1~4 horas | Mejora la dureza de la superficie y la resistencia a la oxidación. |

6.4.3 Efecto del tratamiento térmico sobre la microestructura

- **Control del tamaño del grano:**
una temperatura de recocido adecuada puede refinar los granos, evitar un crecimiento excesivo de granos y mantener un equilibrio entre la resistencia y la tenacidad del material.
- **por precipitación y distribución de segunda fase**
promueve la precipitación fina y uniforme de la fase de fortalecimiento y mejora el efecto de obstaculizar el movimiento de dislocación.
- **Eliminar la tensión interna**
El proceso de recocido libera la tensión residual del procesamiento, reduce la concentración de tensión y reduce el riesgo de fractura frágil.

6.4.4 Mecanismo de mejora de la resistencia a altas temperaturas

- **El refinamiento del grano fortalece**
la estructura del grano fino y uniforme para mejorar la resistencia a la fluencia a altas temperaturas y la vida útil por fatiga.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **La fase precipitada fortalece**
las partículas estables de la segunda fase y fija los límites de grano, lo que dificulta la migración de los límites de grano y mejora la resistencia a altas temperaturas.
- **Protección de película de óxido:**
El tratamiento térmico de la superficie forma una película de óxido densa que bloquea la corrosión por oxidación y mejora las propiedades antioxidantes.

6.4.5 Resultados y casos de investigación típicos

- **de optimización del recocido a alta temperatura**
han demostrado que el recocido a 1100 °C durante 3 horas puede refinar significativamente los granos, aumentar la resistencia a la tracción de la aleación de tungsteno en un 15 % y aumentar el alargamiento en un 10 %.
- **Efecto de fortalecimiento del envejecimiento**
Después del envejecimiento a 650 °C durante 6 horas, la fase de fortalecimiento precipita de manera uniforme y la tasa de fluencia del material a alta temperatura se reduce en un 20%.
- **Tratamiento de nitruración superficial**
El tratamiento de nitruración superficial aumenta la dureza en un 40%, la temperatura de oxidación en aproximadamente 200 °C y mejora significativamente la resistencia a la oxidación.

6.4.6 Estrategia de optimización del proceso de tratamiento térmico

- **El diseño del proceso de tratamiento térmico de múltiples etapas**
combina recocido, tratamiento de solución y envejecimiento para regular de forma coordinada la estructura organizativa.
- **El control preciso de la temperatura y el control de la atmósfera**
utilizan vacío o atmósfera protectora para evitar la oxidación secundaria y garantizar el efecto del tratamiento térmico.
- **El tratamiento térmico está vinculado con el proceso de conformado**
para personalizar el plan de tratamiento térmico de acuerdo con las características del proceso de conformado anterior para evitar daños en el tejido.

6.4.7 Tendencias y desafíos del desarrollo

- **La tecnología de tratamiento térmico inteligente**
utiliza monitoreo y control en línea para lograr una optimización en tiempo real del proceso de tratamiento térmico.
- **Evaluación a largo plazo del rendimiento del servicio a alta temperatura**
Estudio en profundidad de la influencia del tratamiento térmico en las propiedades de fluencia y fatiga a alta temperatura.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Desarrollar herramientas de simulación multiescala **acoplando la microestructura y el rendimiento para guiar el diseño del proceso de tratamiento térmico.**

resumen

La tecnología de tratamiento térmico es fundamental para mejorar la resistencia a altas temperaturas de las varillas de aleación de tungsteno. Mediante un diseño científico y razonable del proceso de tratamiento térmico, se puede controlar eficazmente la microestructura, mejorar la resistencia, la tenacidad y la estabilidad a altas temperaturas, y cumplir con los estrictos requisitos de los materiales de aleación de tungsteno de alta temperatura en los sectores aeroespacial, nuclear y otros. En el futuro, la tecnología inteligente y digital de tratamiento térmico impulsará el proceso de tratamiento térmico de las aleaciones de tungsteno a un nivel superior.

6.5 Recubrimiento de superficie y varilla de aleación de tungsteno mejorada y resistente al desgaste

Las varillas de aleación de tungsteno ofrecen ventajas como alta densidad y alta resistencia, pero en entornos de alta tensión, fricción o corrosión, la superficie expuesta de la aleación de tungsteno es propensa al desgaste, la oxidación y la corrosión, lo que afecta su vida útil y su estabilidad de rendimiento. La tecnología de recubrimiento de superficies es clave para mejorar el rendimiento superficial de las aleaciones de tungsteno. Esta tecnología mejora significativamente su resistencia al desgaste y a la corrosión mediante la creación de una capa protectora, lo cual constituye una línea clave para la investigación y el desarrollo de varillas especiales de aleación de tungsteno.

6.5.1 Mecanismo de desgaste y corrosión de la superficie de la aleación de tungsteno

- **Desgaste mecánico**
Durante el proceso de contacto y fricción de la aleación de tungsteno, el material de la superficie sufre deformación plástica y grietas por fatiga debido a la fricción y la fuerza de corte, lo que provoca el desprendimiento del material y el desprendimiento de granos abrasivos.
- **Corrosión y oxidación química**
Bajo la acción de altas temperaturas o de un medio corrosivo, se forma una capa de óxido o productos de corrosión en la superficie de la aleación de tungsteno, lo que reduce la resistencia de la superficie, es fácil de desprender y agrava el desgaste.
- **El desgaste por fatiga y la degradación de la interfaz**
por carga cíclica provocan que se propaguen microfisuras, se caiga el revestimiento de la superficie y se pierda el efecto protector.

6.5.2 Selección de materiales de recubrimiento de superficies

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Tipo de recubrimiento | Características principales | Ventajas y aplicaciones |
|--|---|---|
| Recubrimientos cerámicos duros (como TiN , CrN , Al ₂ O ₃) | Alta dureza, resistencia al desgaste, resistencia a altas temperaturas. | Piezas mecánicas, moldes y piezas resistentes al desgaste |
| Recubrimientos a base de carbono (como diamante, nitruro de carbono) | Dureza extremadamente alta, bajo coeficiente de fricción. | Instrumentos de precisión, herramientas de corte |
| Recubrimientos compuestos a base de metal (como WC-Co, NiCr) | Buena tenacidad, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión. | Piezas mecánicas muy cargadas |
| Recubrimiento funcional multicapa | Combinación de dureza, tenacidad y resistencia a la oxidación. | Requisitos de rendimiento integrales en entornos de servicios complejos |

6.5.3 Tecnología de preparación de recubrimientos de superficies

- La deposición física de vapor (PVD)**
 utiliza la evaporación o la pulverización catódica para depositar películas duras. El recubrimiento es denso y posee una gran fuerza de adhesión, ideal para piezas de aleación de tungsteno de alta precisión.
- La deposición química de vapor (CVD)**
 utiliza reacciones químicas para formar un recubrimiento uniforme, que es adecuado para piezas con formas complejas y tiene una excelente resistencia a altas temperaturas.
- La tecnología de pulverización térmica**
 deposita recubrimientos mediante la pulverización de partículas fundidas. Es adecuada para recubrimientos gruesos y reparaciones, y el recubrimiento presenta una buena tenacidad.
- El revestimiento de superficie láser**
 utiliza láser para fundir material en polvo para lograr una unión metalúrgica entre el revestimiento y el sustrato, lo que hace que el revestimiento sea resistente al desgaste y a la corrosión.
- La galvanoplastia y la deposición electroquímica**
 son adecuadas para depositar recubrimientos metálicos para mejorar la conductividad de la superficie y la resistencia a la corrosión.

6.5.4 Mejora del rendimiento de la aleación de tungsteno mediante recubrimiento de superficie

- Mejora significativamente la dureza y la resistencia al desgaste**
 El recubrimiento tiene una dureza mayor que el sustrato, lo que previene eficazmente la fricción, el desgaste y la deformación plástica de la superficie.
- Mejora la resistencia a la corrosión y la resistencia a la oxidación**
 para formar una película protectora estable, aislar los medios corrosivos y retrasar el proceso de oxidación.
- Mejora el rendimiento de fricción de la superficie**
 , reduce el coeficiente de fricción, reduce la generación de calor y la pérdida de material.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Mejora la capacidad de servicio a altas temperaturas.**
El recubrimiento ofrece una excelente resistencia a altas temperaturas y garantiza la estabilidad estructural en entornos de alta temperatura.

6.5.5 Estrategia de diseño de varilla de aleación de tungsteno mejorada y resistente al desgaste

- **El diseño coincidente del revestimiento y el sustrato**
controla el coeficiente de expansión térmica del revestimiento para que coincida con el del sustrato, evitando el agrietamiento y el desprendimiento del revestimiento causados por el estrés térmico a alta temperatura.
- **La tecnología de recubrimiento compuesto multicapa**
utiliza una capa dura y una capa resistente para combinar resistencia al desgaste y resistencia al impacto.
- **Optimización de la rugosidad de la superficie:**
tratamiento detallado de la superficie antes del recubrimiento para mejorar la adhesión del recubrimiento.
- **Control de uniformidad y espesor del recubrimiento**
Diseño racionalmente el espesor del recubrimiento para evitar la degradación del rendimiento causada por un espesor desigual.

6.5.6 Casos de aplicación

- **El recubrimiento de aleación de tungsteno de las palas de turbinas de motores aeroespaciales** adopta Recubrimiento compuesto de TiN / Al₂O₃, que mejora la resistencia al desgaste en un 50% y extiende significativamente la vida útil de la cuchilla.
- **Tecnología de recubrimiento de núcleo perforante de blindaje militar:**
el recubrimiento de carburo duro mejora la dureza de la superficie del núcleo, mejora la capacidad de penetración y la resistencia al desgaste.
- **En la superficie de los componentes de disipación de calor electrónico**
se mejora la conductividad térmica y la resistencia a la corrosión, garantizando un funcionamiento estable y a largo plazo del equipo.

6.5.7 Tendencias y desafíos del desarrollo

- **Desarrollo de recubrimientos nanoestructurados**
Los recubrimientos nanocristalinos son más densos, tienen dureza y tenacidad y tienen mejor resistencia al desgaste.
- **La integración funcional del recubrimiento inteligente**
combina funciones autorreparadoras, antibacterianas, anticorrosivas y otras para ampliar el campo de aplicación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **La tecnología de recubrimiento respetuosa con el medio ambiente y**
el proceso de preparación ecológico reducen el impacto ambiental y mejoran la sostenibilidad de la industria.
- **La optimización de la ingeniería de interfaz entre el recubrimiento y el sustrato**
mejora la resistencia de unión de la interfaz y evita el desprendimiento del recubrimiento y las fallas por fatiga.

resumen

La tecnología de recubrimiento de superficies proporciona a las varillas de aleación de tungsteno una protección eficaz contra el desgaste y la corrosión, lo que mejora considerablemente su vida útil y su rendimiento en entornos extremos. Gracias al desarrollo continuo de materiales de recubrimiento avanzados y procesos de preparación, las varillas de aleación de tungsteno resistentes al desgaste y mejoradas desempeñarán un papel cada vez más importante en la industria aeroespacial, militar y de alta gama. En el futuro, la diversificación y la inteligencia de las funciones de recubrimiento se convertirán en una nueva dirección para el desarrollo tecnológico.

6.6 Varilla de aleación de tungsteno funcional: conductividad eléctrica, conductividad térmica, antimagnética

Como material de alta densidad y alto rendimiento, las varillas de aleación de tungsteno no solo poseen excelentes propiedades mecánicas y estabilidad a altas temperaturas, sino que también responden a la creciente demanda de materiales multifuncionales en la industria moderna y los sectores de alta tecnología. Las varillas de aleación de tungsteno funcionales, como la conductividad eléctrica, la conductividad térmica y las propiedades antimagnéticas, se han convertido gradualmente en el foco de la investigación y el desarrollo. Mediante el diseño de materiales y el control de procesos, se puede lograr la funcionalización de las varillas de aleación de tungsteno, ampliar sus áreas de aplicación y mejorar su rendimiento general.

Diseño y aplicación de varilla conductora de aleación de tungsteno.

- **Principios de diseño**
 - Mejorar la conductividad eléctrica de la aleación manteniendo buenas propiedades mecánicas;
 - Optimizar los tipos y contenidos de elementos de aleación para reducir los obstáculos a la migración de electrones;
 - Controlar la microestructura y reducir el impacto de los límites de grano y los defectos en la resistencia.
- **Elementos de aleación comunes**
 - El cobre (Cu) es un excelente elemento conductor y a menudo se utiliza para mejorar la conductividad de las aleaciones de tungsteno.
 - La adición adecuada de elementos como plata (Ag) y níquel (Ni) ayuda a equilibrar la conductividad y las propiedades mecánicas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Áreas de aplicación**
 - Materiales de embalaje electrónicos;
 - Materiales de electrodos en dispositivos electrónicos de vacío;
 - Soporte de disipación de calor para circuitos de alta frecuencia.
- **Características de rendimiento**
 - La resistividad se puede reducir al nivel de micro-ohm-cm;
 - Al mismo tiempo, mantiene una alta resistencia y estabilidad térmica;
 - Buena maquinabilidad y estabilidad dimensional.

Diseño y aplicación de varilla de aleación de tungsteno conductora térmica

- **Estrategia de diseño**
 - Aprovechando la alta conductividad térmica del propio tungsteno, combinado con elementos de aleación de alta conductividad térmica para mejorar la conductividad térmica general;
 - Optimizar la microestructura y reducir la interfaz de resistencia térmica;
 - Aplicar procesos de refinamiento de grano y control de defectos para reducir los efectos de dispersión.
- **Sistemas de aleación típicos**
 - Las aleaciones compuestas de tungsteno-cobre (W-Cu) se utilizan ampliamente en aplicaciones de alta conductividad térmica;
 - Mejora de la conductividad térmica mediante microaleación y diseño de nanoestructuras.
- **Escenario de aplicación**
 - Componentes de disipación de calor para dispositivos electrónicos de alta potencia;
 - Cámaras de combustión e intercambiadores de calor de motores de aeronaves;
 - Componentes de gestión térmica en láseres y reactores nucleares.
- **Ventajas de rendimiento**
 - La conductividad térmica es significativamente mejor que la del tungsteno puro, alcanzando más de $200 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;
 - Combina alta densidad, alta resistencia y excelente estabilidad térmica.

Diseño y aplicación de varilla de aleación de tungsteno antimagnética

- **Objetivos de diseño**
 - Hacer que la aleación de tungsteno sea no magnética o débilmente magnética en un entorno de campo magnético fuerte;
 - Evitar interferencias del campo magnético y garantizar el funcionamiento normal del equipo.
- **Control de ingredientes**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Reducir el contenido de elementos ferromagnéticos como hierro (Fe), cobalto (Co) y níquel (Ni);
- Añadir elementos de aleación no magnéticos como cromo (Cr) y manganeso (Mn);
- Utilice un refuerzo de solución sólida y un control de segunda fase para reducir la respuesta magnética.
- **Áreas de aplicación**
 - Equipo de imágenes por resonancia magnética (IRM);
 - Instrumentos de medición de campo magnético de alta precisión;
 - Componentes de aceleradores de partículas y reactores nucleares.
- **Actuación**
 - La permeabilidad magnética es cercana a 1 (la permeabilidad magnética del vacío);
 - Mantener buenas propiedades mecánicas y de resistencia a altas temperaturas;
 - Excelente resistencia a la radiación y a la corrosión.

Tecnología de preparación de varillas de aleación de tungsteno funcional

- **La tecnología de pulvimetalurgia de precisión**
controla la pureza del polvo y el tamaño de las partículas para garantizar una composición uniforme y reducir los defectos.
- **La tecnología avanzada de tratamiento térmico**
regula la microestructura y optimiza el rendimiento funcional.
- **La tecnología de modificación de superficies**
mejora las funciones de la superficie, como el revestimiento conductor, el revestimiento resistente al desgaste, etc.
- **La fabricación aditiva**
permite un diseño de estructuras complejas y gradientes funcionales para satisfacer necesidades multifuncionales.

6.6.5 Tendencias futuras del desarrollo

- **El diseño integrado multifuncional**
tiene en cuenta múltiples funciones como la conductividad eléctrica, la conductividad térmica y las propiedades antimagnéticas para satisfacer los requisitos de aplicaciones complejas.
- **La manipulación de nanoestructuras**
utiliza nanotecnología para mejorar aún más el rendimiento y mejorar la estabilidad.
- **Desarrollo de materiales inteligentes**
Desarrolle materiales de aleación de tungsteno inteligentes que respondan a los cambios ambientales y logren ajustes de rendimiento adaptativos.
- **La tecnología de preparación ecológica y respetuosa con el medio ambiente**
promueve procesos de preparación con bajo consumo de energía y baja contaminación y promueve el desarrollo sostenible.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resumen

Las varillas funcionales de aleación de tungsteno han logrado con éxito múltiples funciones especiales, como conductividad eléctrica, conductividad térmica y propiedades antimagnéticas, mediante un diseño de composición razonable y la optimización del proceso, ampliando considerablemente su campo de aplicación en los campos de alta tecnología. Con el continuo avance de la ciencia de los materiales y la tecnología de fabricación, las varillas funcionales de aleación de tungsteno desempeñarán un papel cada vez más importante en muchos campos de vanguardia, como la electrónica, la aviación y la medicina.

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

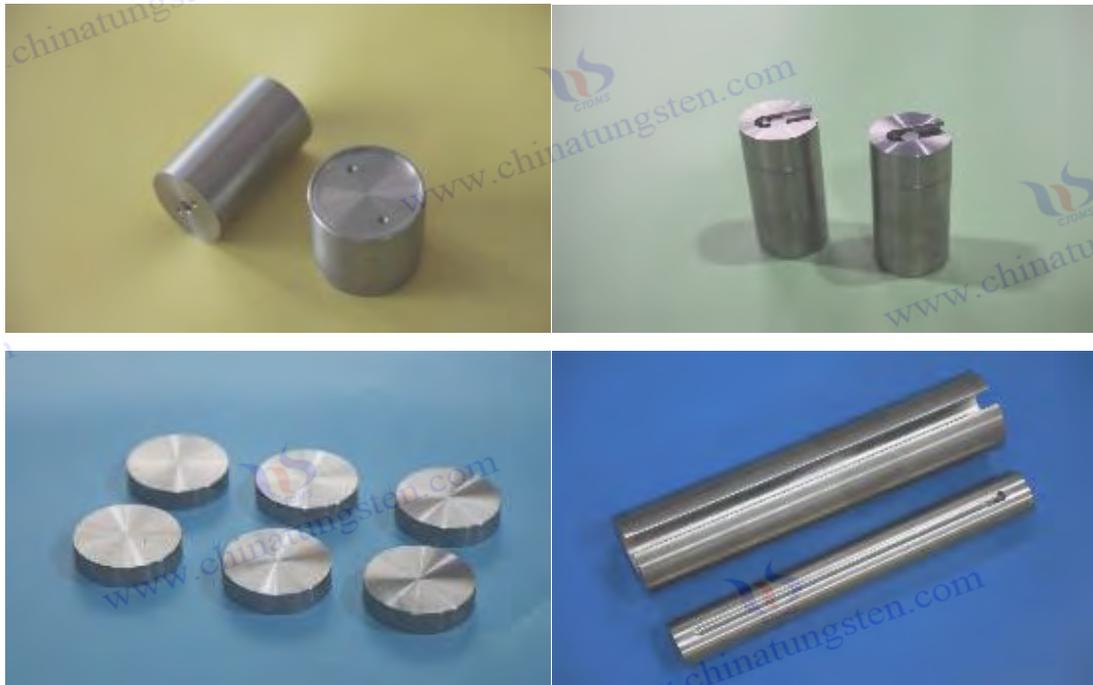
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Capítulo 7 Sistema de cumplimiento para varillas de aleación de tungsteno

7.1 Normas nacionales/industriales chinas (GB/T, YS/T)

Como material de alto rendimiento, las varillas de aleación de tungsteno deben cumplir estrictos estándares de calidad y rendimiento en su producción y aplicación industrial. El sistema de estándares nacionales de China (GB/T) y el estándar industrial (YS/T) proporcionan una base regulatoria para la fabricación, prueba y aplicación de varillas de aleación de tungsteno, garantizando una calidad estable del producto y un desarrollo próspero de la industria.

7.1.1 Descripción general del sistema de normas de China

- **Norma Nacional (GB/T).**
Las normas nacionales son emitidas por la Administración Estatal de Regulación del Mercado y la Administración Nacional de Normalización. Estas normas abarcan las propiedades de los materiales, los métodos de ensayo, los requisitos técnicos, etc., y constituyen la base para la producción y la inspección de calidad de las empresas. Por ejemplo: GB/T 23789-2017 "Materiales de aleación de tungsteno de alta gravedad específica" y GB/T 20211-2006 "Varillas de aleación de tungsteno".
- **Las normas industriales (YS/T)**
son formuladas por las autoridades competentes del sector, que perfeccionan los requisitos de las normas según las características del sector y son aplicables a las especificaciones y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

evaluaciones técnicas dentro del sector. Ejemplo: YS/T 531-2014 "Condiciones Técnicas Generales para Materiales de Aleaciones de Tungsteno y de Tungsteno-Cobre".

- **Normas locales y normas empresariales**

Algunas regiones y empresas formulan normas complementarias basadas en las necesidades reales para perfeccionar la gestión y mejorar la competitividad.

7.1.2 Principales normas nacionales (GB/T)

| Norma N° | Nombre estándar | Contenido principal y aplicación |
|--------------------|---|---|
| GB/T 23789-2017 | Material de aleación de tungsteno de alta gravedad específica | Clasificación de aleaciones de tungsteno, requisitos técnicos, indicadores de rendimiento, etc. |
| GB/T 20211-2006 | Varilla de aleación de tungsteno | Métodos de prueba de composición química y propiedades mecánicas de varillas de aleación de tungsteno |
| GB/T 13298-2009 | Método de prueba de propiedades mecánicas del material de aleación de tungsteno | Estandarizar las normas de prueba de propiedades mecánicas y los métodos de prueba. |
| GB/T 19290-2003 | Método de medición de la densidad del material de aleación de tungsteno | Determinación y análisis de errores de la densidad de aleación de tungsteno |

7.1.3 Principales estándares de la industria (YS/T)

| Norma N° | Nombre estándar | Ámbito de aplicación y características |
|------------------|---|---|
| YS/T 531-2014 | Requisitos técnicos generales para materiales de aleación de tungsteno y de aleación de tungsteno-cobre | Especificación detallada de los requisitos técnicos para la aleación de tungsteno y la aleación de tungsteno y cobre. |
| YS/T 155-2012 | Productos de aleación de tungsteno de alta densidad | Proceso de fabricación y control del rendimiento de productos de aleación de tungsteno |
| YS/T 786-2016 | Método de prueba de propiedades mecánicas de aleación de tungsteno | Normas de prueba de propiedades mecánicas para garantizar datos de prueba precisos |

7.1.4 Puntos clave de la norma

- **de control de composición química**
definen claramente el rango de contenido y los límites de impurezas de elementos como tungsteno, níquel, hierro y cobre para garantizar un rendimiento estable del material.
- **Los indicadores de rendimiento mecánico**
especifican indicadores de rendimiento clave como resistencia a la tracción, límite elástico, alargamiento, dureza, etc. para cumplir con diferentes requisitos de aplicación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **La precisión dimensional y la calidad de la superficie**
plantean requisitos específicos para la tolerancia dimensional, la rugosidad de la superficie y el límite de defectos de las varillas de aleación de tungsteno.
- **Los métodos de inspección y prueba**
incluyen medición de densidad, análisis metalográfico, pruebas de propiedades mecánicas y estándares técnicos de pruebas no destructivas para garantizar que la calidad del producto sea controlable.

7.1.5 Gestión de la implementación y supervisión de normas

- **Responsabilidades de las empresas manufactureras**
Las empresas deben seguir estrictamente los estándares nacionales e industriales en producción e inspección para garantizar que los productos cumplan con las especificaciones.
- **de supervisión de calidad**
de las agencias de supervisión de calidad son responsables de supervisar la implementación de las normas y las inspecciones aleatorias de la calidad del producto.
- **Agencias de certificación y pruebas**
Las agencias de certificación de terceros brindan certificación de calidad a empresas y productos para mejorar la aceptación en el mercado.

7.1.6 Actualización estándar y tendencia de desarrollo

- **Adaptándose a las necesidades de aplicaciones de alta gama,**
con la actualización de la tecnología en la industria aeroespacial, nuclear y otros campos, los estándares se perfeccionan constantemente para mejorar los indicadores de rendimiento y la precisión de detección.
- **La integración de estándares ambientales y de seguridad**
fortalece la protección ambiental y las especificaciones de desempeño de seguridad, en línea con la fabricación ecológica y los requisitos de cumplimiento internacional.
- **La integración y coordinación internacionales**
promueven la integración con ISO y otras normas internacionales, y promueven la internacionalización de la industria de varillas de aleación de tungsteno de China .

resumen

El sistema de normas nacionales (GB/T) y de normas industriales (YS/T) de China para varillas de aleación de tungsteno proporciona soporte técnico integral y garantía de calidad para la producción y aplicación de varillas de aleación de tungsteno. Con el avance de la tecnología y la evolución de la demanda del mercado, el sistema de normas continúa mejorando, lo que impulsa a la industria china de varillas de aleación de tungsteno hacia un desarrollo de alta calidad y la competitividad internacional.

7.2 Sistema Estándar Americano (ASTM, MIL)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Como país importante en el mundo de la fabricación avanzada y la tecnología de materiales, Estados Unidos ejerce una amplia influencia en la producción, las pruebas y la aplicación de varillas de aleación de tungsteno. Las normas ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales) y MIL (Estándares Militares de EE. UU.) son la base de las especificaciones de los materiales de aleación de tungsteno de EE. UU., lo que garantiza que el rendimiento del producto cumpla con los estrictos requisitos de los sectores civil y militar.

7.2.1 Descripción general del sistema de normas ASTM

- Como organización de normalización reconocida internacionalmente, **ASTM International es responsable de desarrollar una serie de normas que cubren propiedades de materiales, métodos de prueba y control de calidad para promover el desarrollo de la ciencia de los materiales y las aplicaciones industriales.**
- **Normas ASTM relacionadas con las aleaciones de tungsteno** Las normas ASTM regulan sistemáticamente la composición química, las propiedades mecánicas, los métodos de prueba y la evaluación de la calidad de las aleaciones de tungsteno.

7.2.2 Principales normas y aplicaciones de ASTM

| Norma N° | Nombre estándar | Contenido |
|--------------|---|--|
| ASTM B777 | Especificaciones de los polvos de tungsteno y de aleación de tungsteno | Requisitos de calidad del polvo y métodos de inspección |
| ASTM B777-18 | Normas de prueba de densidad y propiedades mecánicas de aleación de tungsteno | Prueba de densidad, resistencia a la tracción y dureza de la aleación de tungsteno |
| ASTM E8/E8M | Norma de ensayo de tracción de materiales metálicos | Estandarizar el procedimiento de prueba de tracción de la aleación de tungsteno. |
| ASTM B765 | Métodos de análisis químico de materiales de aleación de tungsteno | Análisis espectral y métodos de detección de la composición de aleaciones de tungsteno |
| ASTM E112 | Estándar de determinación del tamaño de grano | para la microestructura de aleación de tungsteno |

7.2.3 Descripción general del sistema MIL (estándar militar)

- **El sistema de estándares MIL es** un estándar militar formulado por el Departamento de Defensa de EE. UU. que establece requisitos extremadamente altos de rendimiento, fiabilidad y seguridad para productos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

militares. Dado que uno de los materiales clave es la aleación de tungsteno, el estándar MIL abarca la preparación de materiales, los indicadores de rendimiento y el control de calidad.

- **Las características de las normas MIL**

se centran en el rendimiento de servicio y la adaptabilidad ambiental de los materiales. Las especificaciones son estrictas y operativas, y se utilizan ampliamente en municiones militares, equipos aeroespaciales y de energía nuclear.

7.2.4 Estándares MIL típicos y sus aplicaciones

| Norma N° | Nombre estándar | Contenido principal |
|--------------------------|--|---|
| MIL-T-21005 | varillas y productos de aleación de tungsteno | Composición, propiedades mecánicas y especificaciones dimensionales de varillas de aleación de tungsteno. |
| Estándar militar MIL-810 | Consideraciones de ingeniería ambiental y estándares de pruebas experimentales | Materiales de aleación de tungsteno en entornos hostiles |
| Estándar militar MIL-883 | Métodos de prueba de materiales de dispositivos microelectrónicos | Aleaciones de tungsteno en encapsulados microelectrónicos |

7.2.5 Puntos clave de la norma

- **Composición química estricta y control de impurezas**

Los estándares MIL tienen límites estrictos en la composición de la aleación y el contenido de impurezas para garantizar que las propiedades del material sean consistentes y cumplan con los altos estándares de las aplicaciones militares.

- **Las pruebas integrales de propiedades mecánicas**

incluyen resistencia a la tracción, límite elástico, alargamiento, dureza y rendimiento de fatiga para garantizar la confiabilidad de las varillas de aleación de tungsteno en condiciones extremas.

- **Pruebas de adaptabilidad ambiental:**

desarrollar planes de pruebas detallados para altas temperaturas, bajas temperaturas, humedad, vibración, impacto y otros entornos.

- **El sistema de gestión de calidad y trazabilidad**

enfatisa el control del proceso de producción y la trazabilidad del producto para garantizar la gestión del ciclo de vida completo de la calidad del material.

7.2.6 Ventajas e influencia del sistema estándar de EE. UU.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Alto reconocimiento internacional**
Las normas ASTM y MIL son ampliamente reconocidas y adoptadas en todo el mundo, promoviendo el comercio internacional y la cooperación técnica de las varillas de aleación de tungsteno.
- **Promover**
estándares de innovación tecnológica, promover la mejora continua del rendimiento de los materiales y la tecnología de pruebas e impulsar el progreso tecnológico industrial.
- **Garantizar la seguridad de las aplicaciones críticas**
. Se aplican estándares estrictos para garantizar el uso seguro y estable de los materiales de aleación de tungsteno en las industrias aeroespacial, militar y nuclear.

resumen

Los sistemas de normas ASTM y MIL en Estados Unidos proporcionan un marco ideal para el control de calidad y la garantía del rendimiento de las varillas de aleación de tungsteno, satisfaciendo las diversas necesidades, desde aplicaciones civiles hasta militares. Su riguroso contenido normativo científico y su amplia aplicabilidad en la industria han contribuido positivamente al desarrollo y la aplicación de materiales de aleación de tungsteno en todo el mundo.

7.3 Normas internacionales de la UE e ISO

Debido a la creciente frecuencia del comercio global de materiales de aleación de tungsteno y a los intercambios técnicos, las normas pertinentes formuladas por la Unión Europea (UE) y la Organización Internacional de Normalización (ISO) se han convertido en un factor clave para promover la internacionalización de la industria de las varillas de aleación de tungsteno y unificar las especificaciones técnicas. Las normas de la UE priorizan la protección ambiental, la seguridad y el cumplimiento normativo, mientras que las normas ISO se centran en la unificación internacional de las propiedades de los materiales y los métodos de ensayo, proporcionando un marco técnico de referencia para las varillas de aleación de tungsteno en el mercado global.

7.3.1 Descripción general del sistema de normas de la UE

- **Los organismos de normalización de la UE**
están compuestos principalmente por el Comité Europeo de Normalización (CEN), el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) y el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI). Las normas sobre varillas de aleación de tungsteno suelen ser formuladas por el CEN, centrándose en los requisitos de seguridad, medio ambiente y rendimiento.
- **Marco de cumplimiento de la UE**
Los materiales de aleación de tungsteno deben cumplir con las regulaciones ambientales de la UE, como RoHS (Directiva de restricción de sustancias peligrosas), REACH (Registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias químicas), etc., para garantizar la seguridad del producto y el cumplimiento ambiental.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3.2 Principales normas y reglamentos relacionados con la UE

| Nombre de la norma/reglamento | Contenido principal | Ámbito de aplicación |
|---------------------------------|---|--|
| Serie EN 12502 | Especificaciones y métodos de prueba para materiales de tungsteno y aleaciones de tungsteno | Pruebas de calidad y rendimiento de materiales de aleación de tungsteno |
| Directiva RoHS (2011/65/UE) | Restricción del uso de sustancias peligrosas en equipos eléctricos y electrónicos | Componentes electrónicos de aleación de tungsteno y productos relacionados |
| Reglamento REACH (CE 1907/2006) | Requisitos de registro químico y gestión de seguridad | Cumplimiento ambiental en la producción y la cadena de suministro de aleaciones de tungsteno |
| Marcado CE | Marcas de certificación de seguridad y cumplimiento de productos | Los productos de aleación de tungsteno entrarán en el mercado de la UE |

7.3.3 Descripción general del sistema de normas internacionales ISO

- **Introducción a la Organización ISO**

La Organización Internacional de Normalización (ISO) es una organización autorizada que desarrolla estándares unificados globales, que cubren muchos aspectos tales como propiedades de materiales, métodos de prueba, gestión de calidad, etc.

- **Normas ISO relacionadas con**

las aleaciones de tungsteno Las normas ISO se centran en regular los indicadores de rendimiento, los métodos de prueba y la gestión de la calidad de los materiales de aleación de tungsteno, proporcionando una base unificada para el comercio internacional y la cooperación técnica.

7.3.4 Principales normas ISO y sus aplicaciones

| Norma N° | Nombre estándar | Contenido principal |
|-----------|---|---|
| ISO 9001 | Requisitos del sistema de gestión de calidad | Sistema de gestión de calidad de empresas de fabricación de varillas de aleación de tungsteno |
| ISO 16143 | Material de polvo metálico - Aleación de tungsteno de pulvimetalurgia | Especificaciones técnicas y métodos de prueba del polvo de aleación de tungsteno |
| ISO 4967 | Métodos para la determinación de carbono y azufre | Prueba de composición química de materiales de aleación de tungsteno |
| ISO 6892 | Métodos de ensayo de tracción para materiales metálicos | Norma de prueba de tracción de propiedades mecánicas de aleación de tungsteno |
| ISO 6507 | Prueba de dureza del metal: dureza Vickers | Normas internacionales para pruebas de dureza de aleaciones de tungsteno |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3.5 Puntos clave de la norma

- **Cumplimiento de seguridad y medio ambiente**
Las normas de la UE restringen estrictamente el uso de sustancias peligrosas, garantizando que los materiales de aleación de tungsteno cumplan con los requisitos de protección medioambiental y promuevan la fabricación ecológica.
- **Unificación internacional de pruebas de rendimiento**
Las normas ISO unifican los métodos de pruebas de rendimiento físico y mecánico de las aleaciones de tungsteno para garantizar la comparabilidad de los datos de rendimiento de los productos entre países.
- **La construcción del sistema de gestión de calidad**
promueve que los fabricantes de aleaciones de tungsteno establezcan un sistema de gestión de calidad sólido y mejoren los niveles de producción y gestión.
- **Los intercambios técnicos y el acceso al mercado**
reducen las barreras comerciales internacionales y facilitan que los productos de varillas de aleación de tungsteno ingresen al mercado global.

7.3.6 Sinergia entre las normas de la UE y la ISO

- Las normas de la UE a menudo se formulan con referencia a las normas internacionales ISO, lo que promueve la coherencia global en las normas técnicas.
- Las normas ISO proporcionan a las empresas una base para la gestión de la calidad y las especificaciones técnicas, respaldando la certificación de conformidad con las regulaciones de la UE.
- Las dos partes promueven conjuntamente la modernización tecnológica y el desarrollo verde de la industria de aleación de tungsteno y promueven la cooperación internacional.

resumen

Los sistemas de normas de la UE e ISO proporcionan un marco regulatorio internacional integral para la industria de las varillas de aleación de tungsteno, que abarca múltiples dimensiones, como el rendimiento, las pruebas, la protección ambiental y la gestión de la calidad. El cumplimiento de estas normas no solo contribuye a garantizar la calidad y la seguridad de los productos, sino que también promueve la competitividad internacional y la expansión del mercado de las empresas chinas de aleación de tungsteno. En el futuro, con la mejora y actualización continuas de las normas internacionales, la industria de las varillas de aleación de tungsteno alcanzará un mayor nivel de estandarización y desarrollo internacional.

7.4 Certificación de protección ambiental y seguridad de los materiales (RoHS, REACH, MSDS)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

A medida que el mundo presta mayor atención a la protección ambiental y la salud y seguridad ocupacional, la producción y aplicación de varillas de aleación de tungsteno deben cumplir estrictamente con las leyes y regulaciones ambientales pertinentes y las normas de seguridad de materiales. Las certificaciones RoHS, REACH y MSDS se han convertido en un requisito indispensable para que las empresas de aleación de tungsteno accedan al mercado internacional, especialmente al de la UE. Estas certificaciones no solo garantizan la conformidad ambiental de los materiales, sino también la seguridad de los usuarios y del medio ambiente.

7.4.1 Directiva RoHS (Directiva sobre restricción de sustancias peligrosas)

- **Introducción a la directiva**

La directiva RoHS (Restricción de sustancias peligrosas) fue emitida por la Unión Europea en 2003 para restringir el uso de sustancias peligrosas en equipos eléctricos y electrónicos y para proteger el medio ambiente y la salud humana.

- **Las principales sustancias restringidas**

incluyen plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), cromo hexavalente (Cr(VI)), bifenilos polibromados (PBB) y éteres de difenilo polibromados (PBDE).

- **Impacto en las varillas de aleación de tungsteno**

Si se utilizan materiales de aleación de tungsteno en productos electrónicos y eléctricos, es necesario garantizar que el contenido de las sustancias nocivas mencionadas anteriormente cumpla con el límite RoHS para evitar exceder el límite y afectar el acceso al mercado.

- **Las empresas de pruebas y cumplimiento**

deben realizar pruebas estrictas de composición de materiales y proporcionar declaraciones de cumplimiento de RoHS e informes de pruebas.

7.4.2 Reglamento REACH (Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias Químicas)

- **Antecedentes reglamentarios**

REACH es un reglamento integral de gestión de sustancias químicas implementado por la Unión Europea en 2007, que requiere que los fabricantes e importadores registren y evalúen la seguridad de las sustancias químicas.

- **Obligaciones de registro de**

los materiales de aleación de tungsteno Los fabricantes de aleaciones de tungsteno deben registrar sus productos en la Agencia Europea de Sustancias Químicas (ECHA) y presentar datos de seguridad y evaluaciones de riesgos.

- **Evaluación y restricción de materiales**

Si el tungsteno y sus compuestos están incluidos en la lista de sustancias extremadamente preocupantes (SVHC), deben gestionarse y restringirse especialmente.

- **La responsabilidad de la cadena de suministro**

requiere que las empresas sean transparentes sobre la información química en la cadena de suministro y se aseguren de que los usuarios posteriores conozcan la información sobre seguridad de los materiales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.4.3 MSDS (Hoja de datos de seguridad del material)

- **Definición y función**

MSDS es una hoja de datos de seguridad del material que proporciona las propiedades químicas, los riesgos para la salud, las medidas de protección y las pautas de tratamiento de emergencia de las varillas de aleación de tungsteno.

- **El contenido debe**

incluir información sobre propiedades físicas y químicas, identificación de peligros, almacenamiento y transporte, control de exposición y protección personal.

- **Obligaciones de la empresa**

Las empresas de producción y suministro deben preparar y proporcionar MSDS que cumplan con los estándares internacionales para garantizar un uso seguro.

7.4.4 La importancia de la protección ambiental y la certificación de seguridad

- **Proteger el medio ambiente y la salud**

controlando la emisión de sustancias peligrosas y reduciendo la contaminación ambiental y los riesgos para la salud ocupacional.

- **Promover el acceso al mercado**

A través de la certificación RoHS y REACH, los productos de varillas de aleación de tungsteno son reconocidos por la UE y los principales mercados mundiales.

- **Mejorar la competitividad corporativa**

El cumplimiento ambiental es una manifestación importante de la responsabilidad social corporativa y de la reputación de la marca.

- **Apoyar el desarrollo sostenible,**

promover la fabricación verde y la economía circular y promover el desarrollo saludable de la industria.

7.4.5 Estrategias de respuesta de las empresas de aleaciones de tungsteno

- **Fortalecer la gestión de la composición de los materiales**

y controlar estrictamente el contenido de sustancias nocivas en los procesos de adquisición y producción de materias primas.

- **Mejorar el sistema de pruebas y monitoreo,**

establecer capacidades de pruebas internas y cooperar con agencias de certificación de terceros para llevar a cabo pruebas de cumplimiento.

- **Solicitar activamente certificaciones pertinentes**

para obtener RoHS, REACH y otros certificados de certificación para satisfacer las necesidades de los clientes y del mercado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Mejorar la transparencia de la información**
y brindar MSDS completos y soporte técnico para garantizar un uso seguro por parte de los clientes.

Resumen

La certificación de protección ambiental y seguridad de materiales es un paso importante para la industria de varillas de aleación de tungsteno para su entrada al mercado internacional. Al cumplir estrictamente con las normativas RoHS y REACH y mejorar la gestión de las MSDS, las empresas no solo garantizan la seguridad y la conformidad de sus productos, sino que también sientan las bases para el desarrollo sostenible y la competencia global. En el futuro, con la mejora continua de las leyes y normativas de protección ambiental, las empresas de varillas de aleación de tungsteno deberán seguir mejorando su gestión ambiental para adaptarse a las crecientes exigencias del mercado y de la sociedad.

7.5 Requisitos del sistema de calidad en los campos de la aviación, militar y médico

Como material clave de alto rendimiento, las varillas de aleación de tungsteno se utilizan en sectores de alta gama como la industria aeroespacial, la de equipos militares y la médica, lo que impone exigencias extremadamente altas al sistema de calidad. Las industrias relevantes suelen adoptar estrictos sistemas de gestión de calidad y normas de certificación para garantizar la seguridad, fiabilidad y consistencia de los materiales y cumplir con los requisitos de servicio en condiciones de trabajo extremas.

7.5.1 Requisitos del sistema de calidad en el sector aeroespacial

- **Estándares y certificaciones de la industria**
 - AS9100: Norma del sistema de gestión de calidad aeroespacial, basada en la ISO 9001 y añadiendo requisitos específicos del sector aeroespacial;
 - NADCAP: Certificación de procesos especiales aeroespaciales, que abarca vínculos clave como el tratamiento térmico y las pruebas no destructivas.
- **Puntos clave de control de calidad**
 - Trazabilidad de lotes y consistencia de materiales;
 - Pruebas estrictas de rendimiento físico y químico;
 - Requisitos de control de tamaño y calidad de superficie de alta precisión.
- **Medidas de gestión de la calidad**
 - Implementar la gestión de riesgos y controles de procesos;
 - Utilizar tecnología de prueba avanzada (como rayos X, tomografía computarizada) para pruebas no destructivas;
 - Realizar auditorías de la cadena de suministro y revisiones in situ periódicamente.

7.5.2 Requisitos del sistema de calidad en la industria militar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Estándares de calidad militar**
 - MIL-Q-9858A: Sistema de garantía de calidad militar;
 - MIL-STD-105E: Estándar de inspección de muestreo militar;
 - MIL-STD-1916: Estándar de control de procesos militares.
- **Requisitos de rendimiento y confiabilidad**
 - Cumplir con las especificaciones de rendimiento para entornos extremos de temperatura, golpes y vibraciones;
 - La alta pureza y el bajo contenido de impurezas garantizan la vida útil del material;
 - Control estricto de tasa de defectos y estándares de reparación de defectos.
- **Medidas de garantía de calidad**
 - Sistema completo de trazabilidad de productos;
 - Utilice equipos de medición y prueba avanzados;
 - Enfatizar la capacitación de los empleados y la implementación de las especificaciones del proceso.

7.5.3 Requisitos del sistema de calidad en el ámbito médico

- **Estándares de calidad de dispositivos médicos**
 - ISO 13485: Norma de sistema de gestión de calidad para dispositivos médicos;
 - FDA 21 CFR Parte 820: Regulaciones de calidad de la Administración de Alimentos y Medicamentos de EE. UU. para dispositivos médicos.
- **Seguridad y biocompatibilidad**
 - Los materiales de aleación de tungsteno deben cumplir requisitos de biocompatibilidad para evitar toxicidad y reacciones alérgicas;
 - Estrictos estándares de limpieza y esterilización;
 - Garantizar la estabilidad y seguridad de los materiales en entornos médicos como la radioterapia.
- **Medidas de gestión de la calidad**
 - Establecer un sistema integral de gestión de riesgos (ISO 14971);
 - Procesos documentados de control de diseño y gestión de cambios;
 - Auditorías internas periódicas y certificaciones externas.

7.5.4 Puntos comunes de implementación del sistema de calidad

- **Certificación del sistema y mejora continua**

Las empresas deben pasar la certificación del sistema de gestión de calidad de organizaciones autorizadas en campos relacionados y mejorar y optimizar continuamente el proceso de control de calidad.
- **Una estricta gestión de la cadena de suministro**

implementa el control de calidad y el seguimiento durante todo el proceso, desde la adquisición de la materia prima hasta la entrega del producto final.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **El monitoreo de calidad basado en datos**
utiliza big data y tecnología de la información para realizar un monitoreo en tiempo real y una alerta temprana del proceso de producción.
- **El cultivo del talento y la construcción cultural**
se centran en el cultivo de la conciencia de calidad y crean una cultura de gestión de calidad con la participación de todos los empleados.

resumen

Los sectores de la aviación, el ejército y la medicina han establecido estándares extremadamente altos y estrictos requisitos de gestión para el sistema de calidad de las varillas de aleación de tungsteno. Las empresas necesitan establecer un sistema integral de gestión de calidad basado en las características de la industria para garantizar la fiabilidad y seguridad de los materiales en condiciones de trabajo extremas. Esto no solo es fundamental para satisfacer las necesidades de los clientes, sino también para mejorar la competitividad corporativa y promover el desarrollo de alta calidad de la industria.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 8 Embalaje, almacenamiento y transporte de varillas de aleación de tungsteno

8.1 Método de envasado y medidas de protección (envasado al vacío, desecante)

Las varillas de aleación de tungsteno presentan alta densidad, alta dureza y requisitos de aplicación especiales, por lo que el embalaje y las medidas de protección son de suma importancia. Un diseño de embalaje adecuado no solo protege el producto de daños mecánicos, corrosión e impactos ambientales, sino que también garantiza su seguridad e integridad durante el transporte.

8.1.1 Embalaje

- **Envasado al vacío**
 - Utilice tecnología de vacío para extraer el aire del paquete para reducir la oxidación y la corrosión de la superficie de la aleación de tungsteno por el oxígeno y la humedad;
 - Adecuado para almacenamiento a largo plazo y transporte de exportación, especialmente en entornos con alta humedad o grandes diferencias de temperatura;
 - Las bolsas de envasado al vacío generalmente están hechas de materiales compuestos multicapa con buena hermeticidad y resistencia mecánica.
- **Embalaje de papel y película de plástico antioxidante**
 - Envuelva la superficie de la varilla de aleación de tungsteno con papel antioxidante para formar una capa de aislamiento físico para evitar la intrusión de vapor de agua y medios corrosivos;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Luego, la capa exterior se envuelve con una película de plástico para evitar rayones mecánicos y contaminación por polvo;
- Adecuado para almacenamiento y transporte a corto plazo en condiciones ambientales normales.
- **Embalaje en caja de madera y palets de madera**
 - Después del embalaje primario, las varillas de aleación de tungsteno se colocan en cajas de madera resistentes para evitar impactos y vibraciones durante el transporte;
 - La caja de madera está equipada con materiales de amortiguación, como espuma o algodón perlado, para proteger aún más el producto;
 - Los palets de madera son fáciles de transportar mediante carretillas elevadoras, lo que mejora la eficiencia logística.
- **Embalaje en bidón metálico o cilindro de acero**
 - Se utilizan varillas de aleación de tungsteno con especificaciones especiales o de alto valor, barriles de metal o cilindros de acero para el embalaje para mejorar la resistencia de protección;
 - Al mismo tiempo, es fácil de sellar y proteger, lo que favorece el transporte marítimo.

8.1.2 Medidas de protección

- **Uso de desecante**
 - Coloque un desecante (como gel de sílice, tamiz molecular) dentro del paquete para absorber eficazmente la humedad en el espacio del paquete y evitar la oxidación causada por la humedad;
 - La cantidad de desecante debe configurarse razonablemente de acuerdo con el volumen del embalaje y la humedad del entorno de transporte;
 - Reemplace el desecante periódicamente para garantizar la sequedad del entorno de embalaje.
- **Recubrimiento anticorrosivo o película de aceite**
 - Aplique aceite antioxidante o un revestimiento anticorrosivo especial en la superficie de la varilla de aleación de tungsteno para proporcionar una capa de protección química;
 - Evite que la humedad y la niebla salina corroan la superficie del material.
- **Diseño de amortiguador a prueba de golpes**
 - Diseñe una estructura de amortiguación de múltiples capas dentro de la caja de embalaje para reducir la vibración mecánica y el impacto durante el transporte;
 - La varilla de aleación de tungsteno está envuelta con material amortiguador para evitar rayones y deformaciones en la superficie.
- **Rendimiento de sellado garantizado**
 - El embalaje debe tener un buen rendimiento de sellado para evitar la entrada de aire y polvo;
 - El envasado al vacío o con nitrógeno puede mejorar aún más el efecto de sellado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1.3 Puntos clave del diseño de envases

- **Adapte la estructura del embalaje al tamaño y peso del producto.**

Las varillas de aleación de tungsteno son pesadas, por lo que los materiales y estructuras de embalaje deben tener suficiente capacidad de carga para evitar daños durante el transporte.

- **Las etiquetas son claras y completas.**

Las especificaciones del producto, el peso, las precauciones y la dirección de transporte están marcadas en el exterior de la caja para facilitar la logística y la gestión del almacenamiento.

- **La selección de materiales respetuosos con el medio ambiente**

da prioridad a los materiales respetuosos con el medio ambiente y reciclables, que cumplen con las regulaciones medioambientales y de fabricación ecológica.

resumen

Los métodos de embalaje científicos y razonables, así como las medidas de protección, son clave para garantizar la calidad y la seguridad del transporte de las varillas de aleación de tungsteno. Mediante el envasado al vacío, el uso de desecantes, el recubrimiento anticorrosivo y el diseño de amortiguadores, se previene eficazmente la oxidación, la corrosión y los daños mecánicos, proporcionando una protección sólida para el almacenamiento y el transporte de las varillas de aleación de tungsteno. Con el desarrollo de la tecnología logística y los conceptos de protección ambiental, las soluciones de embalaje de varillas de aleación de tungsteno se seguirán optimizando para contribuir al desarrollo ecológico y sostenible de la industria.

8.2 Condiciones de almacenamiento y precauciones (control de temperatura y humedad, prevención de corrosión)

Durante el almacenamiento, las varillas de aleación de tungsteno se ven muy afectadas por la temperatura ambiente, la humedad y los medios químicos. Unas condiciones de almacenamiento inadecuadas pueden causar oxidación y corrosión superficial del material, e incluso una degradación del rendimiento interno. Por lo tanto, una gestión del almacenamiento científica y razonable es esencial para mantener la calidad de las varillas de aleación de tungsteno.

8.2.1 Control de temperatura y humedad

- **Requisitos de temperatura**

- El entorno de almacenamiento debe mantener una temperatura constante y adecuada, generalmente se recomienda entre 15°C y 25°C, y evitar cambios drásticos de temperatura;
- La alta temperatura puede acelerar la reacción de oxidación en la superficie del material, afectando el acabado de la superficie y las propiedades mecánicas;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Si la baja temperatura va acompañada de un aumento de la humedad, es probable que se forme agua de condensación, lo que provoca corrosión.
- **Requisitos de humedad**
 - La humedad relativa debe controlarse entre 40% y 60% para evitar que el exceso de humedad provoque óxido en la superficie del metal;
 - Una humedad demasiado baja provocará que el desecante falle rápidamente y sea necesario reemplazarlo a tiempo;
 - Equipe un equipo de deshumidificación del aire, como un deshumidificador, para mantener un ambiente seco.
- **Monitoreo ambiental**
 - Los almacenes de almacenamiento deben estar equipados con dispositivos de monitoreo de temperatura y humedad para monitorear los parámetros ambientales en tiempo real;
 - Tomar medidas de ajuste oportunas cuando ocurran anomalías para garantizar un entorno estable.

8.2.2 Medidas anticorrosión

- **Inhibidores de óxido y protección de recubrimientos**
 - Recubra la superficie de la varilla de aleación de tungsteno con grasa antioxidante o un revestimiento anticorrosivo especial para formar una capa de aislamiento para evitar el contacto directo entre el oxígeno y la humedad;
 - Compruebe periódicamente la integridad del revestimiento y repárelo o vuelva a aplicarle una capa si encuentra algún daño.
- **Embalaje de aislamiento**
 - Utilice papel antioxidante o película plástica para envolver el producto para reducir el contacto directo con el aire;
 - Coloque desecante dentro del paquete para absorber la humedad y evitar la formación de un ambiente húmedo en el interior.
- **Gestión del entorno del almacén**
 - Evite el contacto directo de las varillas de aleación de tungsteno con el suelo húmedo y guárdelas en altura;
 - Evitar que gases químicos corrosivos (como sulfuros y cloruros) invadan el entorno del almacén;
 - Ventile periódicamente para evitar la acumulación de gases nocivos en espacios confinados.

8.2.3 Notas de gestión de almacenamiento

- **Método de apilamiento**
 - Las varillas de aleación de tungsteno son pesadas y deben apilarse adecuadamente para evitar deformaciones causadas por la alta presión de apilamiento;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Apilados en lotes según especificaciones para una fácil gestión y recuperación.
- **Logotipo de protección**
 - El área de almacenamiento debe estar claramente marcada con recordatorios de seguridad como "a prueba de humedad, a prueba de fuego y a prueba de presión";
 - Los materiales críticos deben tener áreas de almacenamiento dedicadas para evitar la mezcla y la contaminación cruzada.
- **Inspección y mantenimiento regulares**
 - Establecer un sistema de inspección de almacenamiento para verificar la integridad del embalaje, la prevención de la oxidación y los parámetros ambientales;
 - Cualquier situación anormal detectada debe ser tratada rápidamente para evitar que los problemas de calidad se agraven.

resumen

Un control razonable de la temperatura y la humedad, así como medidas científicas anticorrosivas, son la base para garantizar la calidad de almacenamiento de las varillas de aleación de tungsteno. Mediante el mantenimiento de parámetros ambientales adecuados, junto con una protección eficaz del embalaje y una gestión del almacenamiento, se puede maximizar la vida útil del producto y asegurar que el material conserve excelentes propiedades físicas y mecánicas antes de su uso. Las empresas deben prestar atención al almacenamiento, implementar sistemas de gestión y garantizar el almacenamiento seguro y estable de las varillas de aleación de tungsteno.

8.3 Reglamento de Transporte Internacional y Directrices para la Declaración de Mercancías Peligrosas

Al ser un metal de alta densidad, el transporte internacional de varillas de aleación de tungsteno está sujeto a las regulaciones y requisitos aduaneros de muchos países. Es necesario cumplir estrictamente con las regulaciones pertinentes para garantizar la seguridad del transporte, el cumplimiento normativo y un despacho aduanero sin contratiempos. En particular, en lo que respecta a la declaración de mercancías peligrosas, las empresas deben evaluar con precisión las propiedades del producto y preparar la documentación de transporte completa.

8.3.1 Panorama general del Reglamento de Transporte Internacional

- **Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (Código IMDG)**

El Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas, establecido por la Organización Marítima Internacional (OMI), regula la clasificación, el embalaje, el etiquetado y la declaración de mercancías peligrosas durante el transporte marítimo.
- **El Reglamento sobre mercancías peligrosas de la Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA)**

regula los requisitos para las mercancías peligrosas transportadas por aire, abarcando los procedimientos de embalaje, declaración, etiquetado y manipulación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Las Recomendaciones de las Naciones Unidas sobre el Transporte de Mercancías Peligrosas (Recomendaciones de la ONU)**
unifican los estándares mundiales de clasificación y etiquetado de mercancías peligrosas y son la base de las regulaciones de transporte de mercancías peligrosas en varios países.
- **Los departamentos de aduanas y transporte de varios países**
tienen requisitos específicos para el transporte de varillas de aleación de tungsteno en diferentes países, y se deben seguir las leyes pertinentes de los países importadores y exportadores.

8.3.2 Clasificación de transporte y declaración de mercancías peligrosas de varillas de aleación de tungsteno

- **La varilla de aleación de tungsteno es un artículo peligroso?**
 - En términos generales, las varillas de aleación de tungsteno puro no son productos peligrosos y no tienen propiedades químicas peligrosas especiales.
 - Sin embargo, si la superficie de la varilla de aleación de tungsteno está recubierta de grasa inflamable o contiene otros productos químicos peligrosos, debe declararse de acuerdo con la categoría correspondiente.
- **Proceso de solicitud**
 - Preparar hojas de datos de productos y hojas de datos de seguridad (MSDS);
 - Complete el formulario de declaración de mercancías peligrosas según el modo de transporte, especificando la categoría del embalaje y la etiqueta;
 - Proporcionar embalajes y etiquetado que cumplan con los estándares;
 - Declarar al transportista y a las autoridades reguladoras pertinentes y obtener la aprobación.

8.3.3 Requisitos de embalaje y etiquetado

- **Embalaje que cumple con los estándares de transporte**
 - Los materiales de embalaje deben cumplir los requisitos de resistencia y sellado de IMDG e IATA;
 - Asegúrese de que el embalaje pueda soportar vibraciones, extrusiones y cambios climáticos durante el transporte.
- **Señales y etiquetas de mercancías peligrosas**
 - Las mercancías no peligrosas no necesitan un etiquetado especial, pero deben estar marcadas con peso, tamaño y fragilidad.
 - Si contiene sustancias peligrosas se deberán colocar las etiquetas de mercancía peligrosa y las marcas de transporte correspondientes.
- **Código de embalaje de mercancías peligrosas**
 - La caja de embalaje debe tener el número ONU, el tipo de embalaje y la marca de prueba de rendimiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.4 Precauciones para el transporte internacional

- **Clasificación precisa**
 - Verifique cuidadosamente las propiedades del producto y sus materiales asociados para evitar informes erróneos que puedan generar retrasos en el envío o multas.
- **Archivo completo**
 - Preparar documentos de envío completos, incluida la factura comercial, la lista de embalaje, el formulario de declaración de mercancías peligrosas, la hoja de datos de seguridad y las licencias pertinentes.
- **Elija un transportista que cumpla con las normas**
 - Elija un agente logístico y aduanero experimentado para asegurarse de que el plan de transporte cumpla con los requisitos reglamentarios.
- **Seguro de envío**
 - Adquiera un seguro de transporte de carga adecuado para prevenir riesgos durante el transporte.
- **Plan de emergencia**
 - Desarrollar planes de respuesta a emergencias ante accidentes de transporte y equiparlos con los suministros de emergencia necesarios.

resumen

Las varillas de aleación de tungsteno implican regulaciones y procedimientos complejos. Comprender con precisión los requisitos de clasificación y declaración para el transporte, así como utilizar un embalaje y etiquetado estándar, es fundamental para garantizar la seguridad del transporte y un despacho aduanero sin contratiempos. Las empresas deben establecer un sistema integral de cumplimiento normativo en materia de transporte, mejorar la gestión, reducir los riesgos del transporte y garantizar la fluida circulación global de las varillas de aleación de tungsteno .

8.4 Supervisión aduanera y requisitos de licencia para la exportación de varillas de aleación de tungsteno

Como material metálico estratégico, la exportación de varillas de aleación de tungsteno está estrictamente regulada por muchos gobiernos. Las empresas exportadoras deben cumplir con las leyes y regulaciones nacionales pertinentes, solicitar las licencias de exportación necesarias, cumplir con las obligaciones de declaración aduanera y garantizar que los productos se exporten sin contratiempos y cumplan con los requisitos del país importador.

8.4.1 Panorama general de la política de supervisión aduanera

- **Gestión estratégica de recursos**

Dado que el tungsteno es un metal raro, el país generalmente lo clasifica como un recurso estratégico que requiere una gestión clave e implementa un sistema de gestión de cuotas y licencias para su exportación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Requisitos de declaración de aduanas:**
La exportación de varillas de aleación de tungsteno debe declararse de acuerdo con las regulaciones aduaneras, proporcionando el código de producto preciso (código HS), el modelo de especificación, la cantidad y el valor y otra información.
- **Restricciones y controles de exportación**
Algunos países y regiones tienen restricciones especiales a la exportación de aleaciones de tungsteno, como control de sensibilidad técnica, investigaciones antidumping, etc. Las empresas necesitan comprender las políticas relevantes con antelación.

8.4.2 Proceso de solicitud de licencia de exportación

- **La licencia**
generalmente la emite el departamento de comercio nacional o el departamento de gestión de materiales metálicos.
- **Materiales de solicitud**
 - Licencia comercial y certificado de calificación de la empresa;
 - Informes de pruebas de productos y documentos de certificación de calidad;
 - Prueba de contrato y pedido;
 - Declaración de aduanas y documentos de envío relacionados.
- **Proceso de aprobación**
 1. Presentar los documentos de solicitud ante la autoridad competente;
 2. Los departamentos pertinentes revisan la calidad y el cumplimiento del producto;
 3. Luego de la aprobación se expedirá la licencia de exportación;
 4. Las empresas deberán realizar los trámites aduaneros de exportación con la licencia.
- **Periodo de validez y renovación**
Las licencias de exportación generalmente tienen límites de período de validez y las empresas deben renovarlas a tiempo para garantizar la continuidad de las exportaciones.

8.4.3 Puntos clave de la declaración y supervisión aduanera

- **Codificación HS precisa**
Las varillas de aleación de tungsteno deben utilizar la codificación del Sistema Armonizado (HS) aceptada internacionalmente para garantizar una clasificación aduanera y una tributación precisas.
- **Los documentos de despacho de aduana**
incluyen facturas, listas de embalaje, licencias de exportación, contratos, documentos de envío y certificados de origen, etc., para garantizar que todos los documentos estén completos.
- **Inspección aduanera e inspección aleatoria**
Las varillas de aleación de tungsteno pueden ser inspeccionadas cuando se exportan y las empresas deben cooperar para proporcionar muestras e informes de pruebas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Política fiscal**

Comprenda la política de devolución de impuestos a las exportaciones y los beneficios relacionados, y planifique el proceso de exportación de manera razonable.

8.4.4 Precauciones y prevención y control de riesgos

- **Los riesgos de cumplimiento evitan actividades ilegales como declaraciones falsas** y exportaciones ilegales para prevenir sanciones y pérdida de reputación.

- **Cambios de políticas**

Prestar atención a las políticas comerciales nacionales e internacionales y a las tendencias de control de las exportaciones, y ajustar las estrategias de exportación de manera oportuna.

- **El cumplimiento del comercio transfronterizo requiere**

el cumplimiento de los requisitos reglamentarios del país importador y la finalización de los procedimientos de certificación e inspección necesarios.

- **La coordinación de la cadena de suministro**

fortalece la comunicación con las agencias de logística, declaración aduanera e inspección para garantizar un proceso de exportación sin problemas.

Resumen:

La exportación de varillas de aleación de tungsteno implica una compleja supervisión aduanera y gestión de licencias. Las empresas deben comprender y cumplir rigurosamente las leyes, regulaciones y procedimientos pertinentes. Una gestión científica de las exportaciones no solo garantiza el cumplimiento normativo, sino que también contribuye a mejorar la competitividad internacional y la capacidad de expansión de las empresas. Se recomienda que las empresas establezcan un equipo especializado en cumplimiento comercial, fortalezcan la gestión de riesgos y promuevan el desarrollo sostenible de sus negocios de exportación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

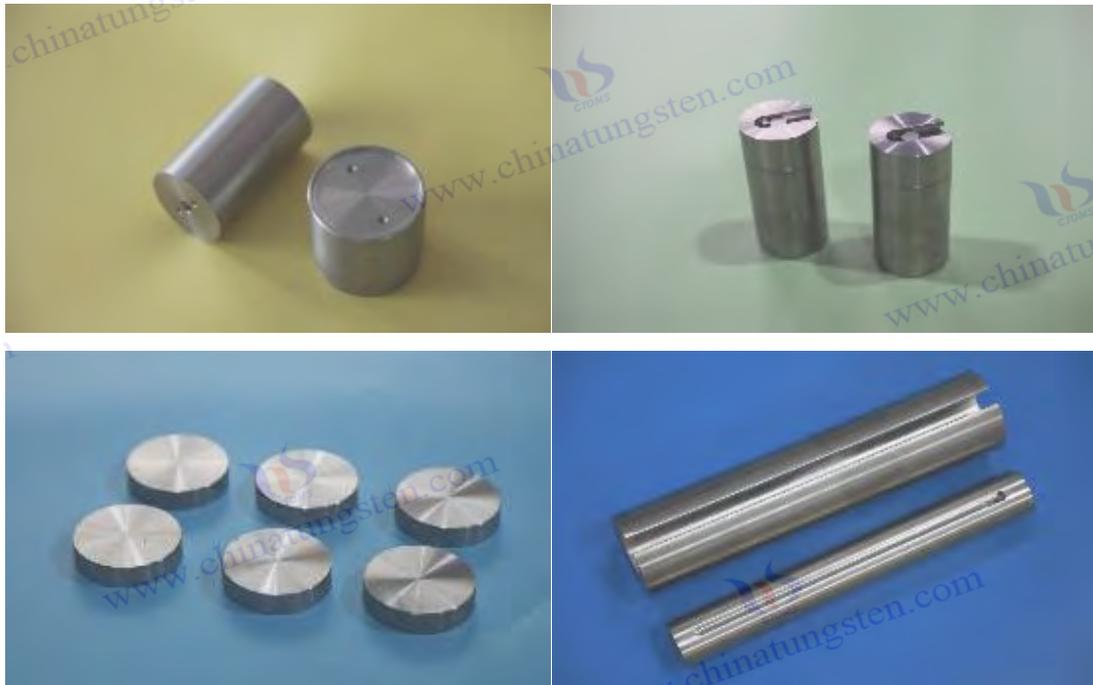
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Capítulo 9 Estructura del mercado y tendencia de desarrollo de las varillas de aleación de tungsteno

9.1 Descripción general de la cadena industrial global de recursos de tungsteno y varillas de aleación

El tungsteno, un metal estratégico raro e importante, se utiliza ampliamente en sectores de alta tecnología como la industria aeroespacial, la militar, la electrónica y la médica, gracias a su alto punto de fusión, alta densidad y excelentes propiedades mecánicas. Como producto clave del procesamiento profundo de recursos de tungsteno, la demanda de varillas de aleación de tungsteno sigue creciendo, y su cadena industrial es compleja y presenta características globales evidentes.

9.1.1 Distribución global de los recursos de tungsteno

- **Las principales áreas de producción se concentran en** los recursos mundiales de tungsteno, que se distribuyen principalmente en China, Rusia, Canadá, Vietnam, Portugal, Austria y otros países.
 - China es el mayor productor de mineral de tungsteno del mundo y representa más del 80% de la producción mundial, con ricas reservas de tungsteno y tecnología minera madura;
 - Rusia y Canadá también poseen grandes yacimientos de tungsteno y tienen cierta influencia en el mercado internacional;
 - Vietnam y Portugal son zonas de producción con recursos de tungsteno relativamente concentrados y mayor potencial.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Tipos de recursos**

El mineral de tungsteno existe principalmente en forma de calcantita (CaWO_4), wolframita (FeWO_4) y scheelita (WO_3). La calidad del mineral y la dificultad de la minería afectan la eficiencia del desarrollo de los recursos.

- **Desafíos ambientales y de recursos**

: la minería de tungsteno enfrenta presiones ambientales y riesgos de agotamiento de recursos, lo que impulsa a la industria a desarrollarse en la dirección de la utilización eficiente de los recursos y la economía circular.

9.1.2 Estado actual de la minería y el procesamiento de recursos de tungsteno

- **La tecnología minera**

combina la minería a cielo abierto y subterránea, adaptándose a las diferentes condiciones del yacimiento. Se promueve gradualmente la maquinaria moderna y la automatización para mejorar la eficiencia y la seguridad de la minería.

- **Fundición primaria y producción de concentrado.**

El mineral de tungsteno se somete a beneficiación, tostación y lixiviación química para obtener un concentrado de tungsteno de alta pureza. La calidad del concentrado afecta directamente el rendimiento del polvo de aleación de tungsteno y los productos derivados.

- **Avances en la tecnología de fundición**

Las innovaciones continuas en la tecnología de fundición de tungsteno, incluida la reducción térmica de carbono, la reducción de hidrógeno y la deposición química de vapor, han permitido la producción de tungsteno de alta pureza.

9.1.3 Estructura de la cadena de la industria de varillas de aleación de tungsteno

La cadena de la industria de varillas de aleación de tungsteno incluye principalmente los siguientes eslabones:

1. El mineral de tungsteno, el concentrado de tungsteno y el polvo de tungsteno son las materias primas básicas para la producción de Varillas de aleación **de tungsteno**. La calidad y el suministro estable de materias primas están relacionados con la consistencia del producto y el control de costos.
2. **Pulvimetalurgia y preparación de aleaciones.**
Mediante el proceso de pulvimetalurgia, el polvo de tungsteno se mezcla uniformemente con elementos de aleación (como níquel, hierro y cobre), se prensa y se sinteriza. Este paso determina la estructura organizativa y los indicadores de rendimiento de las varillas de aleación de tungsteno.
3. **El procesamiento de conformado**
incluye mecanizado, tratamiento térmico y tratamiento de superficie para garantizar que el producto cumpla con los requisitos de tamaño y rendimiento del diseño.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Pruebas de rendimiento y control de calidad

Las estrictas pruebas de rendimiento físico, químico y mecánico garantizan la calidad del producto.

5. Ventas y aplicaciones

Las varillas de aleación de tungsteno se utilizan ampliamente en los campos aeroespacial, militar, médico, electrónico y otros, y la demanda del mercado está en constante expansión.

9.1.4 Características de la globalización de la cadena industrial

- **Cooperación transnacional en la cadena de suministro.**

La distribución de los recursos de mineral de tungsteno y las áreas de capacidad de procesamiento posteriores no se superponen completamente, lo que ha dado lugar a la formación de un patrón de cooperación transnacional en la cadena de suministro de la industria de varillas de aleación de tungsteno. China cuenta con la ventaja de sus recursos minerales y su capacidad de fundición a gran escala, mientras que Europa, Estados Unidos, Japón, Corea del Sur y otros países se centran en el procesamiento de alta gama y la fabricación de precisión.

- **Tecnología y mercado de doble impulso**

El progreso tecnológico promueve la mejora del rendimiento de las varillas de aleación de tungsteno, mientras que la diversificación de la demanda del mercado promueve el ajuste de la cadena industrial.

- **Flujos comerciales:**

Las materias primas de tungsteno se exportan principalmente desde países ricos en recursos, mientras que los productos procesados se comercializan en el mercado internacional. Al ser un producto de alto valor añadido, la actividad comercial de las varillas de aleación de tungsteno está en constante aumento.

resumen

Si bien los recursos globales de tungsteno están relativamente concentrados, la cadena industrial de varillas de aleación de tungsteno está altamente internacionalizada y es compleja. Comprender la distribución de recursos y la estructura de la cadena industrial es fundamental para comprender el patrón del mercado y la tendencia de desarrollo de las varillas de aleación de tungsteno. En el futuro, con el avance tecnológico y la promoción de conceptos de fabricación ecológica, la cadena industrial de varillas de aleación de tungsteno se perfeccionará y promoverá el desarrollo de alta calidad de la industria.

9.2 Análisis del tamaño del mercado de varillas de aleación de tungsteno y tendencias de crecimiento

Como material funcional de alto rendimiento, las varillas de aleación de tungsteno se utilizan ampliamente en la industria aeroespacial, equipos militares, equipos médicos, electrónica de alta gama, ingeniería de energía nuclear, etc. Con la transformación y actualización de la industria

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

manufacturera global y el auge de las industrias emergentes, el tamaño del mercado de las varillas de aleación de tungsteno se ha expandido de manera constante, mostrando características significativas como el crecimiento de la demanda, la aglomeración regional y las aplicaciones diversificadas.

9.2.1 Tamaño actual del mercado global

- Según datos publicados por la Asociación **Internacional** de la Industria del Tungsteno (ITIA) e instituciones de investigación de mercado como MarketsandMarkets y Grand View Research, el valor total del mercado de las aleaciones de tungsteno a nivel mundial en 2024 se situó entre **1300 y 1500 millones de dólares estadounidenses**, de los cuales las varillas de aleación de tungsteno representaron aproximadamente el 30 %, es decir, **entre 400 y 500 millones de dólares estadounidenses**. Se prevé que para 2030, esta cifra supere los **800 millones de dólares estadounidenses**.
- **Distribución regional de la producción y el consumo**
 - **China** : el mayor productor y consumidor de varillas de aleación de tungsteno del mundo, con una cadena industrial completa y capacidades de fabricación a gran escala, que representan más del 50% del mercado;
 - **América del Norte y Europa** : se centra principalmente en aplicaciones de alta gama, centrándose en la calidad y el rendimiento, con una alta tasa de importación;
 - **Otras regiones de Asia Pacífico** (como Corea del Sur, Japón e India): mercados de crecimiento emergentes con una fuerte orientación tecnológica y una demanda de consumo en rápido crecimiento;
 - **Oriente Medio y África** : Actualmente de escala limitada, pero con potencial de crecimiento impulsado por inversiones en energía nuclear y equipos médicos.

9.2.2 Factores que impulsan el crecimiento del mercado

1. **Desarrollo rápido de la industria manufacturera de alta gama**
 - Con el rápido desarrollo de industrias como la aeroespacial, los sistemas de misiles y los instrumentos de alta precisión, la demanda de varillas de aleación de tungsteno de alta densidad y alta resistencia continúa creciendo;
 - El desarrollo de la fabricación inteligente, los sistemas de armas avanzados y las nuevas tecnologías energéticas han impulsado aún más la demanda del mercado de aleaciones de tungsteno.
2. **Expansión de aplicaciones en los campos médico y nuclear**
 - Las varillas de aleación de tungsteno se utilizan ampliamente en equipos de radioterapia, protección radiológica, bisturí de rayos gamma, etc., beneficiándose del envejecimiento de la población mundial y el aumento de la inversión médica;
 - La investigación sobre generación de energía nuclear y fusión ha impulsado la aplicación de varillas de aleación de tungsteno en los campos de absorción de neutrones y componentes de alta temperatura.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. **Promoción de la estrategia de seguridad y cadena de suministro**
 - Los países fortalecen el control sobre los metales estratégicos, aumentan la proporción de fabricación local y promueven la difusión de la capacidad de producción de varillas de aleación de tungsteno a regiones diversificadas;
 - Aunque la exploración global de materiales alternativos continúa, todavía no existe un sustituto equivalente para la aleación de tungsteno en el corto plazo.
4. **El progreso tecnológico aumenta el valor añadido del producto**
 - El desarrollo de tecnologías como la nanomejora, el control de alta pureza y la fabricación inteligente ha mejorado continuamente el rendimiento de las varillas de aleación de tungsteno y ha ampliado más aplicaciones emergentes.

9.2.3 Pronóstico de la tendencia de crecimiento de la industria (2025-2030)

| años | Valoración del mercado global de varillas de aleación de tungsteno (en miles de millones de USD) | Tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) |
|------|--|--|
| 2025 | 5.2 | — |
| 2026 | 5.6 | 7,7% |
| 2027 | 6.1 | 8.0% |
| 2028 | 6.7 | 9.0% |
| 2029 | 7.4 | 10.0% |
| 2030 | 8.1 | 10,3% |

Nota: El pronóstico se basa en el supuesto de una inversión continua al alza en manufactura de alta gama y energía nuclear médica. Si los precios de las materias primas fluctúan o se producen avances en la tecnología de materiales alternativos, la curva de crecimiento podría ajustarse.

9.2.4 Características del desarrollo del mercado

- **Para pasar de gama baja a gama alta,** se ha pasado de las varillas de aleación de tungsteno para el mecanizado tradicional a productos de gama alta con alta densidad, alta tenacidad, resistencia a la corrosión y excelente rendimiento a altas temperaturas.
- Aunque China todavía mantiene una posición dominante a medida que se intensifica **la competencia regional**, Europa, Estados Unidos y Japón están mejorando sus capacidades locales de procesamiento de recursos de tungsteno para enfrentar los desafíos de seguridad de la cadena de suministro.
- **Están surgiendo tendencias ecológicas y sostenibles.** El reciclaje de recursos de tungsteno se ha convertido en un nuevo punto de crecimiento, y la tecnología y las políticas para las varillas de aleación de tungsteno recicladas avanzan rápidamente.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.2.5 Desafíos

- **El precio de las materias primas fluctúa.**

El precio del concentrado de tungsteno se ve muy afectado por la limitación de recursos, las políticas de protección ambiental y la especulación, y el control de costos se ha convertido en una dificultad para las empresas.

- **comerciales internacionales**

, las restricciones a la exportación, los bloqueos técnicos, las investigaciones antidumping y otras cuestiones comerciales pueden afectar la circulación transfronteriza de varillas de aleación de tungsteno.

- **Barreras técnicas en el mercado de alta gama:**

las varillas de aleación de tungsteno nacionales aún enfrentan brechas de proceso y barreras de certificación en algunos campos de alta tecnología, como la aviación y la energía nuclear.

resumen

El mercado de varillas de aleación de tungsteno se encuentra en una fase de rápido crecimiento, beneficiándose del desarrollo de las industrias globales de manufactura, medicina y energía de alta gama. Sin embargo, también enfrenta desafíos como la dependencia de las materias primas, el avance tecnológico y los riesgos comerciales. En los próximos años, con la modernización de las capacidades de fabricación y la expansión de los campos de aplicación, el mercado de varillas de aleación de tungsteno seguirá expandiéndose. Las empresas del sector deben centrarse en tres ejes principales: productos de alta gama, distribución global y transformación ecológica para aprovechar las oportunidades estratégicas.

9.3 Fabricantes principales y competencia (China, Europa, América, Japón y Corea del Sur)

La industria de las varillas de aleación de tungsteno presenta una doble característica: su uso intensivo de tecnología y su dependencia de los recursos. El mercado global está dominado principalmente por países con abundantes recursos de tungsteno o tecnologías de procesamiento líderes, como China, Europa, Estados Unidos, Japón y Corea del Sur. Las empresas de diversas regiones presentan diferencias claras en el control de recursos, las trayectorias tecnológicas, el posicionamiento de productos y las estrategias de mercado, lo que, en conjunto, constituye el actual patrón de competencia multipolar de la industria de las varillas de aleación de tungsteno.

9.3.1 Empresas chinas: énfasis en las ventajas de los recursos y la fabricación a gran escala

Como el mayor productor mundial de tungsteno y centro de procesamiento de tungsteno, China cuenta con una amplia base empresarial y una cadena industrial completa en el sector de las varillas de aleación de tungsteno. Las empresas chinas se caracterizan por su gran capacidad de producción, su amplia variedad y su riguroso control de costos.

- **Empresas representativas**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- CTIA GROUP LTD , fuerte control sobre los recursos y fuertes capacidades de apoyo a la cadena industrial.
- **Ventaja competitiva**
 - Alta tasa de autosuficiencia de materias primas para garantizar un suministro estable;
 - Fuerte capacidad de control de costos y precios de productos competitivos;
 - Responder rápidamente a las necesidades de personalización del cliente y ciclo de entrega corto.
- **Cuello de botella del desarrollo**
 - Todavía existe una brecha entre China y Europa, Estados Unidos y Japón en términos de procesamiento de alta precisión y control de rendimiento extremo;
 - La influencia en el mercado internacional es relativamente limitada y la construcción de un sistema de certificación de alto nivel aún está en progreso.

9.3.2 Empresas europeas y americanas: dominan las barreras tecnológicas y las aplicaciones de alta gama

Las empresas europeas y estadounidenses llevan mucho tiempo dedicadas a los materiales de aleación de alto rendimiento. Gracias a sus ventajas tecnológicas en pulvimetalurgia, aleaciones de alta temperatura, materiales para energía nuclear, etc., han ocupado una posición dominante en el campo de aplicación de alta gama de las varillas de aleación de tungsteno.

- **Empresas representativas**
 - **Plansee Group (Austria)** : productor líder mundial de aleaciones de tungsteno y molibdeno, cuyos productos se utilizan ampliamente en la aviación, los semiconductores y los dispositivos médicos;
 - **HC Starck Tungsten (Alemania/EE. UU.)** : Se centra en tungsteno de alta pureza y aleaciones de tungsteno de alto rendimiento, y domina tecnologías avanzadas de metalurgia de polvos y control de atmósfera;
 - **Global Tungsten & Powders Corp (GTP, EE. UU.)** : Tiene tecnología madura en la preparación de polvo de tungsteno de alta pureza y varillas de aleación y tiene una red de ventas global.
- **Ventaja competitiva**
 - Contamos con una profunda acumulación técnica y poseemos una serie de patentes independientes y tecnologías centrales;
 - Aprobó sistemas de certificación de alto nivel como AS9100 y NADCAP, y entró en las cadenas de suministro de aviación y militares;
 - El efecto de marca es fuerte y proporciona servicios estables a clientes de alto nivel en Europa y Estados Unidos.
- **Desafíos y tendencias**
 - Altos costos, largos ciclos de entrega y baja competitividad en los mercados de gama media y baja;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Ante la presión de las regulaciones ambientales y los crecientes costos de la energía, parte de la capacidad de producción se está transfiriendo a Europa del Este o al Sudeste Asiático.

9.3.3 Empresas japonesas y coreanas: impulsadas por el mecanizado de precisión y las aplicaciones electrónicas

Las empresas japonesas y coreanas tienen ventajas únicas en el procesamiento de ultraprecisión y el control de alta pureza de varillas de aleación de tungsteno, y sus productos se utilizan ampliamente en microelectrónica, tratamiento médico e instrumentos de precisión.

- **Empresas representativas**

- **Mitsui Mining & Smelting** : Desarrollo de una variedad de aleaciones de tungsteno reforzadas de grano fino para servir a las industrias de empaquetado electrónico y médica;
- **Tosoh de Japón** : ha acumulado tecnología en el procesamiento fino de polvo de tungsteno y el desarrollo de aleaciones de alta densidad;
- **HEMC Co., Ltd. de Corea del Sur** : se centra en la producción personalizada de varillas de aleación de tungsteno de alta precisión y piezas de formas especiales, con una sólida capacidad de I+D y respuesta rápida.

- **Aspectos técnicos destacados**

- materiales de alta pureza ;
- Líder en control de microestructura y nano-mejora;
- Procesamiento por lotes y estable de piezas de aleación de tungsteno complejas de tamaño pequeño.

- **Posicionamiento en el mercado**

- Dirigido a mercados de gama media y alta, como productos electrónicos, dispositivos de visualización y componentes láser;
- El precio unitario del producto es alto, la capacidad de servicio es sólida y gana en calidad y tecnología.

9.3.4 Resumen del panorama y las tendencias de la competencia global

| área | Características de la empresa | Nivel técnico | Posicionamiento en el mercado | Ventajas | Desventajas |
|-----------|--|--|--|---------------------------------|---|
| Porcelana | Fabricación a gran escala basada en recursos | La gama media y la gama alta coexisten | Centrarse en la gama media y abrirse paso hasta la gama alta | Bajo costo y suministro estable | Sistema de certificación de alto nivel insuficiente |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | | | | |
|--------------------------|---|-------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------|
| Europa y América | Impulsado por la tecnología + marca líder | Liderazgo de alto nivel | Aviación, militar, médica | Tecnología fuerte y estándares perfectos. | Alto costo y alto precio |
| japonés y coreano | Precisión + Personalización | Alta pureza y finura | Aplicaciones electrónicas y médicas | Alta precisión de procesamiento | Pequeña capacidad de producción |

resumen

El mercado global de varillas de aleación de tungsteno presenta un panorama competitivo: China domina la capacidad de producción, Europa y Estados Unidos ocupan la gama alta, y Japón y Corea del Sur están muy involucrados en la precisión. En el futuro, con el desarrollo de nuevas tecnologías de materiales, el fortalecimiento de la tendencia a la localización de la cadena de suministro y la intensificación de la competencia en el mercado de alta gama, las empresas de diversas regiones continuarán optimizando su posicionamiento estratégico. Si las empresas chinas desean transformarse de grandes a fuertes, deben seguir trabajando arduamente en el diseño de materiales, el procesamiento de precisión y los sistemas de certificación; las empresas europeas y estadounidenses deben afrontar la presión de los costos y la reconstrucción de la cadena de suministro, y mantener su liderazgo tecnológico; las empresas japonesas y coreanas continuarán profundizando en sus segmentos de mercado y manteniendo sus ventajas en productos de alto valor agregado.

9.4 Fluctuación del precio de las materias primas y análisis de la estructura de costos

Las varillas de aleación de tungsteno dependen en gran medida del precio de las materias primas, especialmente de las fluctuaciones del precio del concentrado de tungsteno, el polvo de tungsteno y los elementos de aleación (como Ni, Fe, Cu), entre otros, lo cual tiene un profundo impacto en la estabilidad y la rentabilidad de toda la cadena industrial. Las reservas mundiales de recursos de tungsteno son limitadas, el mercado está altamente concentrado y, impulsado por la oferta y la demanda, las políticas, la protección ambiental, la geopolítica y otros factores, su precio presenta fluctuaciones cíclicas.

Estructura de las varillas de aleación de tungsteno

Las varillas de aleación de tungsteno se componen principalmente de las siguientes partes:

| Categoría de costo | Proporción (rango de referencia) | ilustrar |
|---|----------------------------------|---|
| Costo de la materia prima de tungsteno | 50%~65% | Incluyendo concentrado de tungsteno, paratungstato de amonio (APT), polvo de tungsteno, etc., las fluctuaciones de precios tienen el mayor impacto en el costo total. |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | |
|---|---------|---|
| Costo del elemento de aleación | 10%~15% | Al igual que el Ni, Fe, Cu, la fluctuación de precios es menor que la del tungsteno, pero sigue siendo volátil. |
| Energía y materiales auxiliares | 8%~12% | La electricidad, el hidrógeno, el gas protector, los materiales de moldeo, etc. se ven afectados por la estructura del consumo energético y las políticas regionales. |
| Costos de mano de obra y gestión | 5%~10% | Incluyendo salarios, alquiler de fábrica, gastos administrativos, etc. |
| Costos de equipo y depreciación | 3%~5% | Grandes equipos de sinterización y prensado y sus costes de mantenimiento |
| Costos de protección y seguridad ambiental | 2%~5% | Especialmente en China y la UE, la inversión en protección del medio ambiente sigue aumentando. |

Nota: La estructura de costos varía según el proceso, origen, escala de producción y especificaciones del producto.

9.4.2 Tendencia de fluctuación de los precios de la materia prima de tungsteno

El tungsteno se ve afectado por numerosos factores complejos. A continuación, se presentan las fluctuaciones de precios de las principales materias primas de tungsteno en los últimos años:

(1) Tendencia del precio del concentrado de tungsteno ($WO_3 \geq 65\%$)

- **2020-2022** : El precio se estabilizará en torno a **95.000 a 110.000 RMB por tonelada**;
- **2022-2023** : Afectado por el auge de la inversión en nuevas energías, la escasez de suministro y las restricciones de protección ambiental, el precio sube a **más de 125.000 yuanes/ tonelada**;
- **2024** : Bajo la influencia de la regulación de la política interna y la desaceleración económica mundial, los precios caerán y fluctuarán entre **113.000 y 120.000 yuanes por tonelada**.

(2) Precios del APT (paratungstato de amonio) y del polvo de tungsteno

- **Entre 175.000 y 190.000 RMB por tonelada** a mediados de 2024;
- La estabilidad del precio del polvo de tungsteno es algo deficiente. Debido a la gran influencia de la tecnología de procesamiento y las especificaciones del tamaño de partícula, el precio suele fluctuar entre **240.000 y 280.000 yuanes por tonelada**.

(3) Precios de los elementos de aleación

- Los precios del níquel (Ni) fluctúan considerablemente. Afectados por las nuevas industrias energéticas y del acero inoxidable, superaron **los 200.000 yuanes por tonelada en 2023** y se estabilizaron en 2024.
- Los precios del cobre (Cu) y del hierro (Fe) fluctúan relativamente poco, pero aún así se ven afectados en cierta medida por los cambios en la situación del comercio internacional.

9.4.3 Impacto de las fluctuaciones de las materias primas en las operaciones comerciales

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Dimensión de impacto | Manifestaciones específicas |
|---|---|
| El control de costes se vuelve más difícil | Las materias primas de tungsteno han reducido las ganancias brutas, especialmente para las pequeñas y medianas empresas. |
| Fluctuaciones frecuentes de precios | El ciclo de compras de los clientes finales no coincide con la fluctuación de los precios de las materias primas, lo que aumenta la incertidumbre de los pedidos. |
| Los riesgos de la estrategia de inventario y adquisiciones aumentan | Bloquear el precio de las materias primas por adelantado puede generar desajustes de precios, lo que afecta el flujo de caja y el valor del inventario. |
| Diferenciación de conductividad | Las empresas líderes pueden trasladar las presiones de costos a través de primas tecnológicas, mientras que las empresas pequeñas tienen un poder de negociación débil. |

9.4.4 Estrategias de respuesta y evaluación de tendencias

(1) Construcción del mecanismo de fijación y cobertura de precios

- Las empresas pueden utilizar futuros o acuerdos a largo plazo para fijar los precios de compra de materias primas;
- Fortalecer la cooperación con los proveedores de recursos y establecer canales de adquisición estables.

(2) Optimización de la estructura del producto y transformación de alto valor añadido

- Mejorar el margen de beneficio bruto unitario mediante el desarrollo de varillas de aleación de tungsteno con propiedades especiales como alta resistencia y resistencia a altas temperaturas;
- Protéjase contra las fluctuaciones de costos de las materias primas mediante la diferenciación de procesos.

(3) Fortalecer la conservación de energía y el control de costos en el proceso de producción.

- Reducir el consumo específico de energía mediante procesos de ahorro energético como el prensado isostático y la sinterización láser;
- Implementar la gestión de producción ajustada para mejorar la tasa de rendimiento y la tasa de utilización de materia prima.

(4) Reciclaje ecológico y utilización de aleación de tungsteno reciclada

- Establecer un sistema de reciclaje de material de tungsteno y desarrollar tecnología de polvo de tungsteno reciclado;
- El costo del tungsteno reciclado es significativamente menor que el de la extracción del mineral, lo que lo convierte en una forma importante de reducir costos en el futuro.

resumen

La producción de varillas de aleación de tungsteno es extremadamente sensible a los precios de las materias primas, especialmente a las fluctuaciones del precio del polvo de tungsteno y los elementos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de aleación, que afectan directamente la rentabilidad de las empresas. En el contexto de la estrategia global de recursos, las políticas de protección ambiental más estrictas y el continuo crecimiento de las aplicaciones de alta gama, las fluctuaciones significativas en los costos de las materias primas podrían convertirse en la nueva norma. En el futuro, las empresas deberán fortalecer su capacidad de gestión de riesgos, afrontar la presión de los costos y lograr un desarrollo sostenible mediante estrategias diversificadas de materias primas, productos de alta gama y fabricación ecológica.

9.5 Interpretación de la política industrial y la situación de las exportaciones

Como producto de metal raro con alto contenido tecnológico y alto valor añadido, las varillas de aleación de tungsteno se ven muy afectadas por las políticas industriales y los controles internacionales de exportación. Especialmente en el contexto de la estrategia global de recursos y la localización de la cadena de suministro, los gobiernos de diversos países han implementado políticas para garantizar la seguridad de sus cadenas de suministro de materiales clave y fortalecer la supervisión comercial de metales clave. Las empresas deben comprender con precisión la tendencia de los cambios en las políticas, bajo la premisa del cumplimiento normativo, para mejorar la resistencia al riesgo y la competitividad global.

9.5.1 Orientación política de la industria del tungsteno de China

(1) Protección de recursos y control total de la cantidad

- El tungsteno está catalogado como un mineral clave protegido por el Estado y se implementa un control obligatorio total de la producción;
- Desde 2002, se ha implementado el plan de control del volumen total de minería para las minas de tungsteno, y la producción obligatoria de concentrado de tungsteno (contenido de WO_3 65%) en 2024 es de aproximadamente **110.000 toneladas** ;
- El país controla estrictamente la minería ilegal y toma medidas enérgicas contra el comercio ilegal de recursos.

(2) Modernización industrial y transformación verde

- El "Plan de Desarrollo de la Industria de Metales Raros" y las "Directrices para el Desarrollo de la Industria de Nuevos Materiales" fomentan la transformación de los recursos de tungsteno en aleaciones de alto rendimiento, materiales estructurales avanzados y materiales funcionales;
- de productos de alta gama como pulvimetalurgia, aleaciones de alta densidad y materiales compuestos a base de tungsteno, y eliminar la alta contaminación y la capacidad de producción ineficiente;
- Mejorar los avances tecnológicos y las capacidades de localización de equipos en el campo de las aleaciones de tungsteno y formar una cadena completa de "recursos-productos-aplicaciones".

(3) Políticas de gestión y restricción de las exportaciones

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Las varillas de aleación de tungsteno y sus materiales originales son productos sensibles en la "Lista de control de exportaciones de artículos y tecnologías de doble uso" y requieren una licencia de exportación de acuerdo con la ley;
- El Ministerio de Comercio y la Administración General de Aduanas supervisan conjuntamente y las empresas exportadoras deben contar con calificaciones y sistemas de gestión pertinentes;
- Está prohibido evadir la supervisión de las exportaciones ocultando declaraciones o modificando el nombre del producto a través de un tercero. Los infractores se enfrentarán a multas y a la congelación de sus certificados de exportación.

9.5.2 Cambios en el entorno exportador internacional

(1) Fortalecimiento del “control bidireccional” entre Europa y Estados Unidos

- Estados Unidos y Europa han incluido las aleaciones de tungsteno en la lista de "minerales críticos" o "materiales estratégicos" y han reforzado la revisión de los productos de tungsteno importados;
- Imponer ciertas restricciones comerciales a los productos de tungsteno chinos (incluidas las varillas de aleación de tungsteno), incluidos requisitos de trazabilidad técnica y revisión de doble uso;
- Estados Unidos da prioridad a la compra de algunos productos militares de tungsteno de proveedores nacionales o de "países amigos", lo que forma una barrera técnica.

(2) Los mercados japonés y coreano son relativamente abiertos pero tienen altas barreras de entrada.

- Corea del Sur y Japón tienen requisitos extremadamente altos en términos de revisión técnica y estándares de rendimiento del producto, especialmente en aplicaciones de alta precisión como la medicina, la electrónica y los semiconductores, y proponen umbrales técnicos como la personalización y el control de la microestructura para las varillas de aleación de tungsteno;
- Las empresas necesitan pasar certificaciones ISO, JIS, MIL y otras series de estándares, así como procesos estrictos como auditorías de fábricas de clientes y verificación de la estabilidad de los lotes.

(3) El potencial de mercado de los países a lo largo de la Iniciativa del Cinturón y la Ruta está aumentando

- La expansión de la construcción de infraestructura y la inversión en energía en países a lo largo de la “Franja y la Ruta”, como Asia Central, Medio Oriente y Europa del Este, ha creado nuevas demandas de contrapesos de alta densidad y productos de aleación de tungsteno para protección radiológica;
- Las políticas apoyan a las empresas en la exploración de mercados emergentes a través de herramientas como el seguro de crédito a la exportación, la liquidación transfronteriza en RMB y los acuerdos fiscales.

9.5.3 Situación de las exportaciones y prevención y control de riesgos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Principales tipos de riesgos | Explicación y contramedidas |
|--|---|
| Las fricciones comerciales se intensifican | Para hacer frente a posibles "investigaciones antidumping" y políticas de "discriminación en el país de origen" en mercados como los Estados Unidos, se pueden adoptar mecanismos de diferenciación de productos y de evitación de importaciones (como el comercio de reexportación). |
| Restricciones del umbral de certificación | Acelerar el establecimiento de capacidades de certificación de sistemas estándar internacionales, como AS9100 (aeroespacial), NADCAP (tratamiento térmico), etc., para ingresar a la cadena de suministro de alta gama. |
| Retrasos en la aprobación de exportaciones | La extensión del ciclo de licencias de exportación podría afectar la entrega. Se recomienda a las empresas planificar el ciclo de despacho aduanero con antelación y mejorar sus capacidades internas de preparación para el cumplimiento normativo. |
| volatilidad geopolítica | Diversificar los mercados de clientes para evitar una dependencia excesiva de un solo país; fortalecer la colaboración con socios locales para diversificar los riesgos |

9.5.4 Recomendaciones de políticas y estrategias de respuesta corporativa

1. Fortalecer el seguimiento de políticas y los mecanismos de alerta temprana.

Las empresas deben establecer equipos de tiempo completo para estar al tanto de las novedades políticas publicadas por la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma, el Ministerio de Comercio, las Aduanas y las asociaciones internacionales del sector, y adaptarse proactivamente a los cambios regulatorios.

2. Desarrollar un sistema de exportación compatible y capacidades de gestión de calificaciones

- Solicitar las cualificaciones necesarias, como "licencia de artículo de doble uso" y "certificado de registro de exportación";
- Establecer un sistema de trazabilidad de productos y un mecanismo de archivo de documentos de declaración aduanera de todo el proceso.

3. Participar activamente en la construcción de normas internacionales

y, junto con instituciones de investigación científica, participar en la formulación de nuevas normas ISO/ASTM para mejorar la voz internacional y mejorar la construcción del sistema de calidad del producto.

4. Ampliación de mercados internacionales diversificados

- Cultivar profundamente clientes de alto nivel en Europa, América y Japón;
- Al mismo tiempo, desarrollaremos mercados emergentes como Oriente Medio, India y el Sudeste Asiático para reducir el riesgo de concentración geopolítica.

resumen

Como material estratégico, la situación de las exportaciones de varillas de aleación de tungsteno se ve profundamente afectada por las directrices políticas y las fluctuaciones del entorno internacional. China implementa una estrategia de control de recursos y transformación de alto valor añadido;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Europa y Estados Unidos refuerzan las barreras tecnológicas y comerciales; y Japón y Corea del Sur guían la entrada de productos mediante la certificación tecnológica. Las empresas deben comprender y adaptarse a estas lógicas políticas, y establecer su propia ventaja competitiva internacional mediante la mejora del contenido técnico, la optimización de los sistemas de cumplimiento normativo y la expansión de mercados diversificados.

9.6 Pronóstico de la demanda futura de varillas de aleación de tungsteno en la fabricación de alta gama

A medida que la industria manufacturera global avanza hacia una nueva era de alto rendimiento, ligereza, inteligencia y sostenibilidad, se imponen estándares más altos y se diversifican las demandas de materiales. Las varillas de aleación de tungsteno se han convertido en un material clave indispensable en sectores de fabricación de alta gama como la industria aeroespacial, la energía nuclear, la industria militar y la electrónica médica, gracias a su excelente densidad, alto punto de fusión, sólidas propiedades mecánicas, resistencia a la radiación y estabilidad térmica. En el futuro, la modernización de estas industrias seguirá impulsando la demanda de varillas de aleación de tungsteno, sus requisitos de rendimiento y su amplia gama de aplicaciones.

9.6.1 Panorama general de las tendencias de desarrollo de la fabricación de alta gama

| Dirección de la industria | Tendencia de desarrollo | Requisitos para varillas de aleación de tungsteno |
|--|--|--|
| Aeroespacial | Desarrollar una mayor relación empuje-peso y una mayor resistencia a la carga. | Piezas estructurales de alta gravedad específica + alta tenacidad + inercia controlable |
| armas hipersónicas | Vuelo de alta velocidad + entorno de choque de alta temperatura | Resistencia al choque térmico + Estabilidad térmica + Resistencia a la fatiga por cavitación |
| Fusión/fisión nuclear | Temperaturas extremas + alta intensidad de radiación | Resistencia a la radiación + resistencia a altas temperaturas + absorción de neutrones |
| Equipo médico | Miniaturización y precisión | Alta densidad + procesabilidad + biocompatibilidad del material |
| Envases de semiconductores y electrónicos | Desafíos de alta densidad de potencia y gestión térmica | Conductividad térmica + Resistencia del embalaje + Estructura de pequeña precisión |
| Maquinaria de precisión y robótica | Componentes personalizados de alto control dinámico + inercia | Capacidad de control de alta densidad + precisión geométrica |

9.6.2 Previsión de la demanda futura en áreas clave

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) Componentes de control aeroespacial e inercial

- Con el desarrollo acelerado de las constelaciones de satélites , En los cohetes reutilizables y los aviones comerciales , la demanda de varillas de aleación de tungsteno para contrapesos y piezas de control inercial ha aumentado significativamente;
- La nueva generación de aviones plantea mayores exigencias en cuanto a precisión dimensional, resistencia mecánica y fiabilidad de los materiales;
- Se estima que para 2030, la tasa de crecimiento anual promedio de la demanda de varillas de aleación de tungsteno en el campo aeroespacial será **del 10 al 12 %** .

(2) Ingeniería de energía nuclear y de energía de fusión

- Los materiales de tungsteno en proyectos de fusión nuclear como ITER y CFETR continúan profundizándose, y la aplicación de varillas de aleación de tungsteno en estructuras de barras de control y blindaje contra la radiación continúa expandiéndose;
- La cuarta generación de reactores de fisión (reactores de neutrones rápidos, reactores de sales fundidas) también incluye aleaciones de tungsteno como candidatos para materiales estructurales;
- China, la Unión Europea, Estados Unidos, Japón y otros países han iniciado proyectos para desarrollar materiales nucleares basados en tungsteno;
- Se espera que para 2035, la tasa de crecimiento anual compuesta de las varillas de aleación de tungsteno en el campo de la energía nuclear se mantenga **por encima del 13 %** .

(3) Equipos médicos de alta gama

- Las varillas de aleación de tungsteno de uso médico se utilizan en **aceleradores de radioterapia . cuchillos de rayos gamma , estructuras de protección de fuentes de radiación** , etc.
- El envejecimiento de la población y el rápido crecimiento de la demanda de equipos para el tratamiento del cáncer;
- Especialmente en el campo de **las varillas de tungsteno médicas de alta densidad y baja impureza** , las empresas chinas están acelerando la ruptura de las barreras estándar europeas y estadounidenses;
- Se prevé que el mercado mundial de varillas de aleación de tungsteno para uso médico alcanzará **más de 300 millones de dólares estadounidenses en 2030** .

(4) Fabricación inteligente y máquinas-herramienta de alta gama

- Los contrapesos de herramientas de alta velocidad y alta inercia, los accesorios de herramientas automatizados, etc., están utilizando gradualmente aleaciones de tungsteno de alta densidad para reemplazar el acero tradicional;
- Las varillas de aleación de tungsteno para máquinas herramienta CNC y componentes de husillo de alta precisión se han convertido en un nuevo punto de crecimiento;
- La demanda en Asia (China, Japón y Corea del Sur) es especialmente significativa, con una tasa de crecimiento estimada del **8-10% en los próximos cinco años** .

(5) Defensa Nacional y Sistemas de Armas Hipersónicas

- A medida que las armas tácticas evolucionan hacia la penetración de alta velocidad, el ajuste de las orugas y la miniaturización, las varillas de aleación de tungsteno se utilizan cada vez más en núcleos de balas, compartimentos de cola equilibrados, etc.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Para los proyectiles perforantes y las armas cinéticas, nos centraremos en la actualización a materiales nanorreforzados, de alta densidad y alta tenacidad;
- Se espera que las varillas de aleación de tungsteno de grado militar mantengan una tasa de crecimiento anual promedio del 8-9 % .

9.6.3 Tendencias en tecnología de rendimiento

| Indicadores de desempeño | Dirección de desarrollo | Ejemplo de trayectoria tecnológica |
|---|---|--|
| Precisión del control de la gravedad específica | Dentro de $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ | Prensado de objetivos + conformado por extrusión CNC |
| Resistencia al choque térmico | Choque de gradiente térmico superior a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ | Adición de partículas cerámicas compuestas de $\text{ZrC} / \text{La}_2\text{O}_3$ |
| Uniformidad de la microestructura | El tamaño del grano se controla con una precisión de $5 \text{ }\mu\text{m}$. | Nanopolvo + sinterización al vacío |
| Precisión de procesamiento | $\varphi \pm 0,005 \text{ mm}$, superficie $\text{Ra} < 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ | Densificación de grano fino + molienda superfina |
| Resistencia a la radiación | Mejora de la protección contra la absorción de neutrones y la radiación gamma | Recubrimiento/co-sinterización de B/C y otros elementos |

9.6.4 Sugerencias de desarrollo empresarial y diseño prospectivo

1. **La estructura del producto se desarrolla hacia una personalización de alto rendimiento y**
desarrolla series de productos para diferentes aplicaciones, tales como: series de contrapesos inerciales aeroespaciales, series de blindaje de radioterapia médica, series de disipación de calor de semiconductores, etc., para mejorar la fidelidad del cliente.
2. **Establecer un sistema de certificación de clientes de alta gama,**
planificar con antelación AS9100, ISO13485, MIL y otros sistemas de calidad, y ampliar la base global de clientes de fabricación de alta gama.
3. **La inversión en sistemas de fabricación ecológicos y de reciclaje**
toma el reciclaje de polvo de aleación de tungsteno, la sinterización ecológica y la tecnología baja en carbono como punto de apoyo para crear nuevas ventajas en la futura cadena de suministro.
4. **Al adoptar la fabricación inteligente y el monitoreo digital,**
introducimos el concepto de Industria 4.0, realizamos un monitoreo digital y basado en datos durante todo el proceso de preparación de materiales y mejoramos la consistencia y el rendimiento.

resumen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las varillas de aleación de tungsteno marcarán el comienzo de una nueva ronda de oportunidades de desarrollo en la próxima década, que será de alta gama, segmentada y globalizada. Las industrias aeroespacial, de fusión nuclear, de protección médica, de fabricación de precisión y de defensa seguirán siendo el principal motor de su demanda. Solo mediante esfuerzos continuos en innovación de materiales, sistemas de calidad, expansión del mercado y modernización tecnológica, las empresas podrán tomar la iniciativa en el desarrollo de esta ola de fabricación de alta gama.



Capítulo 10 Puntos de investigación y tecnologías de vanguardia de las varillas de aleación de tungsteno

10.1 Estudio sobre el proceso de densificación de varillas de aleación de tungsteno de alta densidad

Las varillas de aleación de tungsteno tienen una influencia decisiva en sus propiedades mecánicas, conductividad térmica, resistencia a la corrosión y vida útil. Lograr varillas de aleación de tungsteno **con una densidad cercana a la teórica (>98,5 %) o incluso cercana a la densidad total** es un área de investigación clave en el campo actual de la ingeniería de materiales y la pulvimetalurgia. La calidad del proceso de densificación determina directamente la integridad estructural, la uniformidad de la microestructura y la fiabilidad del producto en aplicaciones de alta gama (como piezas estructurales para fusión nuclear, piezas de equilibrio para misiles y disipadores de calor electrónicos de alta potencia).

10.1.1 Principios básicos y requisitos de índice de densificación

La densificación se refiere al proceso en el cual los poros entre las partículas se cierran gradualmente, las interfaces de las partículas se unen y los granos se apilan y difunden de manera efectiva mediante la aplicación de temperatura, presión u otra entrada de energía al polvo compacto.

Métricas clave:

- **Densidad aparente $\geq 18,5 \text{ g/cm}^3$ (contenido de W > 90 % de aleación)**
- **Porosidad $\leq 1,5\%$**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Sin inclusiones obvias, grietas o áreas de concentración de poros.
- El tamaño del grano se puede controlar por debajo de 20 μm

10.1.2 Tecnología tradicional de densificación por sinterización

(1) Sinterización al vacío convencional

- Temperatura típica del proceso: 1450–1550 °C
- Aplicable a sistemas W-Ni-Fe, W-Ni-Cu
- Ventajas: tecnología madura, adecuada para producción en lotes.
- Desventajas: Los poros son difíciles de drenar completamente y se requiere una fase líquida para promover la densificación.

(2) Sinterización asistida en fase líquida

- La formación de una fase líquida crítica por Ni o Cu promueve la reorganización de partículas a la temperatura de sinterización.
- Puede mejorar la uniformidad del tejido y la capacidad de unión.
- Existen riesgos de "segregación de la fase líquida" y "crecimiento del grano", y la relación de la fase líquida debe controlarse estrictamente.

(3) Sinterización multietapa y sinterización retardada

- El calentamiento en varios pasos o el mantenimiento de diferentes zonas de temperatura durante un tiempo determinado ayuda a agotar y controlar el tamaño del grano.
- Especialmente eficaz para polvos ultrafinos o nanopolvos.

10.1.3 Ruta de la tecnología de densificación avanzada

(1) Prensado isostático en caliente (HIP)

- Aplicar presión de gas isótropo (100–200 MPa) a alta temperatura para provocar el colapso de los microporos internos.
- Puede aumentar la densidad a >99,5 %
- Desventajas: Equipo costoso, ciclo largo, adecuado para el posprocesamiento de piezas de alta gama.

(2) Sinterización por plasma de chispa (SPS)

- Densificación rápida mediante pulso de alta corriente + presión axial
- Velocidad de calentamiento rápida (hasta 100 °C/min) y tiempo de sinterización corto (en pocos minutos)
- Puede mantener los nanogranos e inhibir el crecimiento excesivo.
- Desventajas: El tamaño del producto está limitado por el molde, adecuado para materiales pequeños de alto valor.

(3) Sinterización por microondas

- Utilizando la absorción de microondas del tungsteno para lograr un calentamiento interno uniforme
- Alta eficiencia térmica y rápida tasa de densificación, pero es necesario resolver los problemas de arco y puntos calientes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) Densificación asistida por láser

- Varillas de aleación de tungsteno con estructuras de formas especiales o estructuras compuestas multicapa.
- La tecnología aún está en la etapa de investigación y experimentación, y la industrialización necesita más avances.

10.1.4 Efecto de los factores materiales en la densificación

- **Tamaño de partícula de polvo** : Cuanto menor sea el tamaño de partícula (especialmente $<1 \mu\text{m}$), menor será la temperatura de densificación y más rápida la velocidad, pero es más probable que se produzca un crecimiento anormal del cuello de sinterización;
- **Morfología del polvo** : el polvo esférico es más fácil de densificar, mientras que el polvo escamoso o angular tiene más probabilidades de formar agregaciones vacías durante la sinterización;
- **Impurezas y contenido de oxígeno** : Las impurezas como Si, O y C tienden a formar capas intermedias o segundas fases en la interfaz, lo que dificulta el proceso de densificación;
- **Distribución de elementos de aleación** : la distribución uniforme de Ni/Cu puede optimizar la trayectoria de difusión de la fase líquida y mejorar la densidad.

10.1.5 Mecanismos microscópicos de densificación

- **Mecanismo de difusión** : la difusión en masa y la difusión en los límites de grano son dominantes, y la adición de elementos activos (como La y Zr) puede promover la difusión de corto alcance;
- **Teoría de reordenamiento de partículas** : en presencia de fase líquida, las partículas tienden a la configuración de energía mínima, formando una estructura de apilamiento denso;
- **Migración y contracción de poros** : los poros pequeños se agrupan hacia los poros grandes o se cierran bajo la acción del acoplamiento termomecánico para formar un cuerpo denso completo;
- **Inhibición del crecimiento del grano** : controle la velocidad de calentamiento y agregue inhibidores de los límites de grano (como óxidos de tierras raras) para mantener una estructura de grano fino.

10.1.6 Ejemplos de aplicación y progreso de la investigación

- **Instituto de Investigación de Metales, Academia China de Ciencias** : Uso de SPS para lograr una densidad de aleación W-5Ni-2Fe del 99,4 % y un tamaño de grano promedio de $6,2 \mu\text{m}$;
- **Plansee, Austria** : La tecnología de forjado isotérmico HIP+ comercial se aplica a varillas de tungsteno de alta densidad para uso aeroespacial, con una porosidad inferior al 0,3 %;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **China Tungsten High- Tech** : Se desarrolló un proceso de densificación compuesta en fase líquida y microondas para hacer que la densidad de la varilla de W-Ni-Cu alcance más de 18,9 g/cm³, que se usa ampliamente en núcleos de proyectiles militares.

10.1.7 Tendencias y desafíos futuros del desarrollo

| Dirección de desarrollo | Trayectoria técnica | desafío |
|---|---|---|
| Densificación de polvo a nanoescala | Sinterización ultrarrápida y sinterización en frío | La aglomeración del polvo y la inhibición de la oxidación son difíciles |
| Densificación de varillas de aleación de tungsteno de gran tamaño | Combinación de HIP multietapa + forjado en caliente | Control del estrés térmico, control de costes |
| Diseño de estructura compuesta densa | Materiales de estructura de gradiente, con polvo de núcleo-capa | Precisión del proceso y limitaciones de la capacidad del equipo |
| Monitoreo inteligente del proceso de sinterización | Evaluación de densidad en línea + control de retroalimentación | Es difícil integrar la tecnología de percepción y los algoritmos de IA |

resumen

Las varillas de aleación de tungsteno de alta densidad constituyen un sistema complejo de ingeniería en la ciencia de los materiales que integra la ingeniería de polvos, el control termodinámico, la física de interfaces y la tecnología de procesamiento. En el futuro, con **la mejora continua de la demanda de aplicaciones de alta gama, la iteración continua de la tecnología de densificación y la integración profunda de conceptos de fabricación inteligente**, el proceso de densificación de las varillas de aleación de tungsteno seguirá evolucionando hacia la precisión, la sostenibilidad y la personalización.

10.2 Línea de producción inteligente y automatizada de varillas de aleación de tungsteno

A medida que la industria manufacturera global se transforma hacia una producción de alta gama, inteligente y ecológica, el sector de la producción de varillas de aleación de tungsteno también está evolucionando gradualmente del modelo tradicional de producción en masa a la **fabricación inteligente**. Mediante la introducción de tecnologías de fabricación de nueva generación, como los sistemas ciberfísicos (CPS), el Internet de las Cosas (IIoT), la inteligencia artificial (IA) y los gemelos digitales, la creación de fábricas inteligentes **con alta automatización, alta consistencia de calidad y alta flexibilidad de respuesta** se ha convertido en la principal dirección estratégica de las empresas de materiales avanzados de tungsteno.

10.2.1 Necesidad de fabricación inteligente de varillas de aleación de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Conductores | ilustrar |
|---|--|
| Especificaciones de productos diversificadas | La demanda de productos personalizados con diferentes tamaños, composiciones de aleación y estructuras organizativas está aumentando. |
| Presión de costos y eficiencia | El aumento de los costos laborales, el control del consumo energético y las fluctuaciones de la calidad plantean desafíos de producción. |
| Requisitos de estabilidad de la calidad | La aviación, la energía nuclear, la medicina y otros campos tienen requisitos extremadamente altos en cuanto a la consistencia de los lotes. |
| Presión por el cumplimiento y la trazabilidad | Los sistemas de certificación internacionales requieren una trazabilidad completa del proceso y registros completos de datos de producción. |
| Requisitos de seguridad y protección del medio ambiente | Los procesos en polvo son inflamables y explosivos, la automatización ayuda a mejorar los niveles de seguridad |

10.2.2 Módulos clave de la línea de producción de fabricación inteligente

Las líneas de producción de varillas de aleación de tungsteno inteligentes generalmente cubren la cadena de proceso completa desde **la preparación del polvo** → **formación** → **sinterización** → **tratamiento térmico** → **procesamiento** → **prueba y empaquetado**, integrando equipos de automatización y sistemas de información para lograr un control colaborativo de extremo a extremo.

(1) Sistema automático de mezcla y combinación de polvos.

- Controlar con precisión la proporción de diversos polvos a base de tungsteno y elementos añadidos;
- Equipado con báscula automática, sistema de alimentación por vacío, molino de bolas cerrado y sistema de secado;
- Coopere con el sistema MES para realizar la gestión de datos de fórmulas y lotes.

(2) Unidad de prensado inteligente (moldeo/prensado isostático)

- Moldeo: Prensa automática con sistema servohidráulico y control de posición en lazo cerrado;
- Prensado isostático: Sistema de control de autoclave inteligente con preajuste remoto y gestión de curvas de proceso;
- Realizar la integración de carga-prensado-desmoldeo automático.

(3) Línea automática de sinterización y control de atmósfera

- Horno de vacío o horno de hidrógeno con control automático de temperatura y gas;
- Equipado con un sistema de transporte de material con bastidor tipo oruga para lograr una sinterización continua;
- Programación remota de parámetros de proceso y monitoreo de la calidad de la atmósfera en tiempo real (análisis en línea del contenido de O₂ y H₂).

(4) Control integrado del tratamiento térmico y densificación

- Equipado con sistema automático de carga y descarga de prensado isostático en caliente (HIP);

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Cooperar con el proceso de forjado o extrusión a alta temperatura para formar una capacidad de procesamiento de organización uniforme y de alta densidad;
- Las curvas de temperatura y presión se controlan automáticamente y los registros de datos del proceso se cargan en la nube.

(5) Sistema de pruebas en línea y mecanizado CNC

- Los tornos CNC, rectificadoras y líneas de pulido están conectados al sistema MES;
- El instrumento de medición de diámetro láser y visión CCD monitorea la desviación de tamaño en tiempo real;
- Los parámetros de mecanizado se ajustan automáticamente para admitir el mecanizado adaptativo.

(6) Envasado y etiquetado automático

- La línea de envasado inteligente realiza configuraciones de vacío, llenado con desecante y amortiguación antivibración;
- Sistema automático de impresión y trazabilidad de etiquetas código de barras/código QR + RFID.

10.2.3 Digitalización y soporte de sistemas de información

| Tipo de sistema | Función |
|---|--|
| MES (Sistema de ejecución de fabricación) | Realizar la gestión de la planificación de la producción, la programación de equipos, la trazabilidad de lotes y el seguimiento de la ejecución de procesos. |
| Sistema SCADA | Recopilación en tiempo real de parámetros clave como temperatura, atmósfera, presión, corriente, etc. y visualización. |
| SGC (Sistema de Gestión de Calidad) | Establecer un proceso de control de calidad de proceso completo para lograr la advertencia de defectos y el control estadístico del proceso (CEP) |
| Vinculación del sistema ERP | Integrar pedidos, compras, inventario y fabricación para formar una gestión de circuito cerrado. |
| Motor de toma de decisiones asistido por IA | Analice múltiples lotes de datos, optimice la configuración de parámetros y mejore la tasa de aprobación a la primera. |
| Sistema gemelo digital | Construir un modelo de producción virtual para lograr la optimización de procesos, mantenimiento predictivo de equipos y simulación. |

10.2.4 Cuellos de botella actuales y direcciones futuras

| Desafíos clave | Actuación | Dirección de desarrollo |
|--|---|---|
| Umbral de alto costo | La inversión inicial en equipos de automatización es grande | Fabricación a gran escala + apoyo gubernamental + inversión gradual |
| Mala adaptabilidad a piezas de formas especiales | La mayoría de los equipos existentes son de especificaciones de barra estándar. | Desarrollar unidades inteligentes modulares para adaptarse al procesamiento de múltiples formas |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | |
|---|---|---|
| Silos del sistema de datos | Interfaces inconsistentes entre sistemas de información | Promover estándares abiertos y la unificación de protocolos industriales (como OPC UA) |
| Insuficiente colaboración hombre-máquina | Todavía se requiere la intervención humana en enlaces clave | Fortalecimiento de la colaboración hombre-máquina y la fabricación integrada con realidad virtual |

10.2.5 Perspectivas de tendencias tecnológicas futuras

1. **Implementación de computación de borde e IA de borde** : implemente terminales inteligentes de IA en enlaces de procesos clave para lograr monitoreo de borde en tiempo real, autoajuste de parámetros y predicción del estado del equipo.
2. **Análisis de fusión de datos de múltiples fuentes** : fusión de datos de múltiples sensores, como imágenes, acústica, imágenes térmicas, vibración, etc., para lograr un juicio integral de la calidad del producto y la ubicación de los defectos.
3. **Sistema de seguimiento de la huella de carbono y fabricación baja en carbono** : evaluar las emisiones de carbono de las varillas de aleación de tungsteno a lo largo de su ciclo de vida y establecer un sistema de evaluación de la fabricación ecológica.
4. **Fabricación en la nube y red colaborativa flexible** : a través de Internet industrial 5G+, los recursos de fabricación ascendentes y descendentes se conectan para lograr la programación de producción colaborativa de múltiples fábricas y la configuración remota de procesos.

resumen

La fabricación de varillas de aleación de tungsteno se encuentra en una etapa crítica de transición de la automatización parcial a la inteligencia total del proceso. En el futuro, con la digitalización profunda de los parámetros clave del proceso, la mejora de la inteligencia de los equipos y la interconexión e integración de los sistemas de gestión, la fabricación de varillas de aleación de tungsteno alcanzará gradualmente una transformación fundamental, pasando de un modelo basado en la experiencia a uno basado en datos, impulsando a toda la industria de materiales metálicos de alto rendimiento hacia una nueva era de inteligencia.

Desarrollo integrado de varillas de aleación de tungsteno y fabricación aditiva

Con la aplicación acelerada de la tecnología de fabricación aditiva en los sectores aeroespacial, nuclear, militar y médico, los materiales de aleación tradicionales de alto rendimiento se enfrentan a nuevos retos: formas complejas, organización personalizada y fabricación eficiente. La aleación de tungsteno, como material estructural y funcional en condiciones extremas, se está incorporando gradualmente **al sistema de materiales de componentes de precisión que pueden fabricarse mediante fabricación aditiva**. Las varillas de aleación de tungsteno no solo se utilizan como fuente de materiales de impresión (alambres, polvos), sino que también se integran gradualmente en la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fabricación aditiva, entrando en diversos escenarios de aplicación, como **la impresión directa de piezas funcionales y la fabricación mixta de moldes y metalurgia.**

Valor técnico de los materiales de aleación de tungsteno adaptados a la fabricación aditiva

| característica | Demanda de fabricación aditiva | Ventajas de la aleación de tungsteno correspondiente |
|-------------------------------------|--|---|
| Punto de fusión muy alto | Proceso de fusión en caliente >3000 °C | Las aleaciones a base de tungsteno son resistentes al calor y a la corrosión, lo que las hace adecuadas para imprimir piezas en campos térmicos extremos. |
| Densidad alta | Contrapeso funcional, estructura de protección radiológica | AM puede imprimir contrapesos complejos/estructuras huecas para lograr un peso ligero. |
| Blindaje contra la radiación | Aplicaciones de equipos médicos y de fusión nuclear | Piezas estructurales de absorción de neutrones personalizables para mejorar la integración |
| Conductividad térmica | Disipador de calor, boquilla, refrigeración por microcanal | La fabricación aditiva permite la fabricación de canales de refrigeración de alta complejidad. |
| Organización controlable | Optimización de la microestructura | AM logra control de composición de gradiente/solidificación direccional |

10.3.2 Tipos de procesos de fabricación aditiva aplicables a las aleaciones de tungsteno

(1) Fusión de lecho de polvo láser (LPBF)

- Principio: El láser funde el polvo metálico capa por capa y lo enfría y solidifica rápidamente;
- Ventajas: Alta precisión de impresión, capaz de lograr microestructuras complejas;
- Polvo adecuado: polvo de aleación esférico W, W-Ni-Fe, W-Cu;
- Desafío: Un punto de fusión alto produce una baja eficiencia de absorción del láser y una alta tendencia a agrietarse.

(2) Fusión por haz de electrones (EBM)

- Principio: Utilice un haz de electrones con alta densidad de energía para fundir el polvo de tungsteno;
- Adecuado para metales con alto punto de fusión, como tungsteno puro o aleación W-Ta;
- Tiene las ventajas del entorno de vacío y bajo contenido de oxígeno;
- Se utiliza en componentes de alta temperatura, como boquillas de sistemas de propulsión aeroespaciales.

(3) Deposición de energía dirigida (DED)

- Principio: Alimentación sincrónica de polvo o alimentación de alambre + fuente de láser/haz de electrones/plasma;
- Estructuras de aleación de tungsteno de gran tamaño que pueden lograr una forma cercana a la neta;
- Adecuado para reconstrucción, reparación y engrosamiento de segmentos de varillas de aleación de tungsteno y piezas de alta temperatura.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) Fabricación de filamentos fundidos (edición de metal FDM) + sinterización por desaglomeración

- Utilice polvo de metal + aglutinante de polímero para el moldeo por extrusión;
- Después de la impresión, se realiza el desengrasado y la sinterización para lograr una estructura densa;
- Las aleaciones de tungsteno tienen el potencial de producir piezas personalizadas pequeñas y de bajo costo;
- Se ha comercializado para su uso en dispositivos de microondas W-Cu, contrapesos, etc.

10.3.3 Principales dificultades técnicas de la fabricación aditiva de aleaciones de tungsteno

| pregunta | Actuación | Estrategias de afrontamiento |
|--|---|---|
| Los materiales con alto punto de fusión son difíciles de fundir. | Energía láser insuficiente o control difícil del baño de fusión | Aumente la potencia del láser, utilice sustrato precalentado |
| Polvo sensible a la oxidación | Durante la impresión se forman fácilmente inclusiones de oxidación o poros. | Utilice un sistema de impresión al vacío/protección de argón de alta pureza |
| Grietas térmicas y tensión residual | El enfriamiento rápido provoca la formación de grietas | Utilice una plataforma precalentada y una ruta de escaneo optimizada |
| Mala fluidez del material | Acumulación desigual de polvo y baño de fusión inestable | Modificación de la esferoidización del polvo, utilizando polvos mixtos de igual tamaño. |
| segregación de componentes | El punto de fusión del W es muy diferente al de los elementos de aleación. | Premezcla homogénea mediante aleación mecánica |

10.3.4 Ejemplos de aplicación y progreso de la investigación

- **NASA y ORNL :**
Se utilizó la tecnología DED para imprimir módulos de boquillas de tungsteno puro, que se utilizaron con éxito en pruebas de empuje de alta temperatura; se desarrollaron piezas estructurales de aleación W-Re para pruebas de propulsión térmica nuclear.
- **Instituto de Investigación de Metales, Academia China de Ciencias :**
Mediante la impresión LPBF de aleación W-5Ni, la densidad alcanzó más del 97% después de optimizar los parámetros del láser, la microestructura fue uniforme y la supresión de grietas fue buena.
- **Instituto Fraunhofer, Alemania :**
Se estableció el proceso de impresión LPBF de polvo W-Cu para el empaquetado electrónico de alto flujo de calor y se logró con éxito una estructura de disipador de calor de microcanal integrado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Universidad Tecnológica de Tomsk, Rusia :**
Explorando la trayectoria de impresión 3D de la aleación W-Mo-Ta para la investigación de los materiales de las paredes internas de los contenedores de plasma de alta temperatura.

Modelo de desarrollo de acoplamiento de varillas de aleación de tungsteno y fabricación aditiva

| modelo | describir | Valor de la aplicación |
|---|--|---|
| Fabricación de compuestos aditivos y sustractivos | Las varillas de aleación de tungsteno se prefabrican en piezas brutas y luego se utiliza AM para lograr una mejora de la microestructura o un revestimiento funcional. | Reducir costes y mejorar el rendimiento |
| Fabricación de herramientas aditivas | Moldes complejos fabricados con AM para prensado inverso de polvo de varillas | Adecuado para la producción en lotes de barras con formas especiales. |
| Impresión con alimentación de varilla → alambre → alambre | Las varillas de aleación de tungsteno de alta pureza se estiran y se utilizan para la impresión DED de componentes de gran tamaño. | Establecer una cadena completa de material y proceso |
| Modificación del rendimiento de la varilla | Impresión de capas funcionales locales (capa antioxidante, agente de liberación lenta, etc.) en la superficie de varillas de tungsteno | Mejorar la función y la vida útil del servicio |
| Evolución de las piezas estructurales de los gemelos digitales | Uso de AM para realizar piezas estructurales de densidad de gradiente, como barras de ajuste de inercia y barras de absorción de energía | Lograr un diseño de control de rendimiento direccional |

10.3.6 Tendencias de desarrollo futuro y sugerencias de rutas

1. **Construir un sistema especial de polvo AM de aleación de tungsteno**
para desarrollar polvo de aleación de tungsteno con distribución de tamaño de partícula optimizada, alta esfericidad, bajo contenido de oxígeno y fuerte fluidez, y promover la estandarización.
2. **Las actualizaciones de equipos y fuentes de energía**
incluyen el desarrollo de equipos de haz de electrones/láser de mayor densidad energética y plataformas de control inteligente para adaptarse a la impresión de materiales basados en tungsteno.
3. **El control y simulación de tejidos a múltiples escalas**
introduce la simulación de acoplamiento de estrés térmico y un algoritmo de inversión de parámetros del proceso para lograr un control preciso del mapeo de composición-estructura-rendimiento.
4. **La producción en masa y la verificación de componentes de alta gama**
han pasado de la producción de prueba de una sola pieza a la consistencia a gran escala, y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

se ha establecido un sistema estándar de prueba de tratamiento térmico de conformado para adaptarse a la industria aeroespacial, la energía nuclear, los equipos médicos y otros campos.

5. La línea de producción integrada de aleación de tungsteno-AM

construye una "fábrica de impresión" integrada desde la preparación de materia prima de varilla de aleación de tungsteno - producción de polvo esferoidizado - formación de impresión - posprocesamiento - prueba, mejorando el control de todo el proceso.

resumen

La fabricación aditiva y de aleaciones de tungsteno ofrece posibilidades sin precedentes para resolver problemas de procesamiento tradicionales y lograr la fabricación de componentes complejos. Con la mejora continua de la adaptación de materiales, las capacidades de los equipos y los estándares de proceso, las varillas de aleación de tungsteno dejarán de ser solo productos finales para convertirse en la materia prima, el componente principal y el portador de la tecnología de compuestos de la impresión 3D, impulsando a la industria de fabricación de metales a una nueva era de inteligencia, funcionalidad y precisión.

10.4 Comparación y trayectorias técnicas de materiales alternativos de aleación de alto rendimiento

Con el desarrollo de nuevas tecnologías de materiales, las aleaciones de tungsteno se enfrentan a la competencia y la sustitución de diversas aleaciones nuevas de alto rendimiento en algunos escenarios de aplicación. Especialmente en los campos aeroespacial, de energía nuclear, de disipación de calor electrónica y de estructuras de alta temperatura, las exigencias multidimensionales de los clientes en cuanto al rendimiento de los materiales aumentan constantemente, lo que obliga a las aleaciones de tungsteno a seguir evolucionando hacia una mayor ligereza, resistencia, resistencia a altas temperaturas y respeto al medio ambiente.

Al mismo tiempo, una variedad de materiales alternativos con "funciones similares" o "obvias ventajas en términos de costo-efectividad" están acelerando la industrialización, lo que tiene un profundo impacto en la estructura del mercado de las aleaciones de tungsteno.

10.4.1 Principales ventajas y limitaciones de rendimiento de la aleación de tungsteno

| Dimensión de desempeño | Ventajas | Limitaciones |
|--|---|---|
| densidad | Extremadamente alta (19,3 g/cm ³), irremplazable en sistemas de contrapeso, protección e inercia. | La alta densidad trae consigo dificultades de procesamiento y costos de transporte. |
| Punto de fusión y estabilidad térmica | Punto de fusión hasta 3422 °C, adecuado para entornos de temperaturas extremadamente altas. | El procesamiento y la soldadura a alta temperatura son difíciles y el estrés térmico es grande. |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | |
|--------------------------------------|---|--|
| Resistencia a la radiación | Excelente rendimiento de absorción de neutrones y blindaje contra rayos gamma. | Aún se necesita soporte de capa protectora en entornos nucleares altamente corrosivos |
| Conductividad térmica | Solo superado por el cobre y la plata, es adecuado para estructuras de disipación de calor. | Es difícil equilibrar la conductividad térmica y la resistencia a la oxidación. |
| Maquinabilidad | Después de la aleación (como W-Ni-Fe), tiene cierta procesabilidad. | El tungsteno puro o las aleaciones con una alta proporción de tungsteno aún son difíciles de procesar. |
| Garantía de precio y recursos | China tiene abundantes reservas de recursos y un suministro estable. | El tungsteno de alta pureza es caro y difícil de procesar. |

10.4.2 Análisis comparativo de materiales alternativos típicos de alto rendimiento

| Material | Punto de fusión/densidad | Ventajas típicas | limitación | Superposición de aplicaciones |
|---|---|---|--|--|
| Aleación de molibdeno (Mo) | ~2620 °C / 10,3 g/cm ³ | Ligero, buena conductividad térmica, excelente formabilidad. | Resistencia a la corrosión débil, resistencia a la temperatura menor que el tungsteno. | Electrodos de alta temperatura, láminas conductoras térmicas, estructuras electrónicas de disipación de calor. |
| Aleación de tantalio (Ta) | ~3017 °C / 16,6 g/cm ³ | Resistencia a la corrosión, buena ductilidad. | Recursos caros y escasos | Materiales de reactores nucleares, materiales biocompatibles |
| Aleación de alta entropía (HEA) | Punto de fusión variable / densidad media | Control multinivel, resistencia a la corrosión/alta resistencia | Proceso complejo, etapa de I+D | Componentes del extremo caliente de aviación y piezas estructurales |
| Compuestos de matriz cerámica (CMC) | >2000°C / baja densidad | Resistencia a altas temperaturas y ligereza. | Frágil, poca resistencia al impacto. | Toberas aeroespaciales, estructuras de aislamiento térmico |
| Material compuesto de cobre y tungsteno (W-Cu) | Densidad alta/media | Fuerte conductividad térmica, resistencia al arco, resistencia al choque térmico. | Alto costo, resistencia promedio | Electrodos de soldadura por puntos, módulos disipadores de calor |
| Materiales a base de carbono (C/C, grafito) | Alto/Muy ligero | Extremadamente ligero, resistente al choque térmico y a la ablación. | Fácil de oxidar, no resistente a la corrosión. | Boquilla, aislamiento de misiles |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.4.3 Estrategia de diferenciación de la aleación de tungsteno bajo tendencia de sustitución

1. Estrategia de aplicación de la segmentación funcional :

- Sigue siendo irremplazable en situaciones que requieren una densidad y un rendimiento inercial extremadamente altos (sistemas de navegación inercial, pesos de equilibrio dinámico);
- En experimentos de energía nuclear y física de altas energías, su capacidad de absorción de neutrones es superior a la de otros metales y tiene la ventaja de la estabilidad a largo plazo.

2. Mejorar la estrategia de límites de rendimiento :

- Mejore su resistencia a altas temperaturas y su tenacidad al impacto mediante el fortalecimiento de elementos de tierras raras y la tecnología de densificación de nanopulvos;
- Desarrollar estructuras compuestas (como bimetales de tungsteno/tántalo, compuestos de cobre revestidos de tungsteno, etc.) para ampliar las áreas de aplicación multifuncionales.

3. Estrategia de colaboración en la fabricación :

- fabricación aditiva , mecanizado de ultraprecisión y tecnología de soldadura por haz de alta energía para mejorar la viabilidad de estructuras complejas;
- Combine materiales diferentes (como aleaciones de titanio y aleaciones a base de níquel) para la fabricación colaborativa de múltiples materiales y la integración funcional.

4. Protección del medio ambiente verde y estrategia de ciclo de vida completo :

- Establecer un sistema de circuito cerrado de reciclaje, reprocesamiento y reutilización para cumplir con las regulaciones ambientales y los requisitos de sostenibilidad de los recursos;
- Promover fórmulas y tecnologías de procesamiento de baja contaminación que cumplan con RoHS/REACH.

10.4.4 Comparación integral: el estado de la aleación de tungsteno en el futuro sistema de materiales

| Dimensiones | Aleación de tungsteno | Ventajas y desventajas de los materiales alternativos | Estrategia de desarrollo |
|--|-----------------------|--|---|
| Protección de alta densidad | Ventajas obvias | Sólo el cobre-tungsteno y el tantalio pueden sustituirlo parcialmente, pero el coste es mayor. | Mantener una posición dominante |
| Piezas estructurales de alta temperatura | poderoso | HEA, CMC, etc. son competitivos | Fortalecer el sistema de aleación y desarrollar materiales compuestos |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | | |
|---|-------------|--|--|
| Disipador de calor y disipación de calor | Disponible | W-Cu y Mo son más ventajosos | Trayectoria compuesta de múltiples materiales |
| Estructura de la energía nuclear | excelente | El tantalio y el molibdeno tienen algunas aplicaciones | Recubrimiento de superficie + aleación multicapa |
| Costo y protección del medio ambiente | Desventajas | Mo, C/C son más ligeros y económicos. | Establecer un sistema de fabricación verde |

10.4.5 Recomendaciones de ruta técnica y direcciones de I+D

1. Optimización de aleaciones multicomponentes :

- Desarrollar sistemas ternarios/cuaternarios como W-Mo-Re y W-Ta-Ni, teniendo en cuenta la resistencia a altas temperaturas, la ductilidad y la procesabilidad.

2. Desarrollo de materiales compuestos :

- Diseñar estructuras compuestas de tungsteno/cerámica, tungsteno/metal y tungsteno/grafito para maximizar el fortalecimiento de la interfaz y el rendimiento multifuncional.

3. plataforma de procesos avanzados :

- Invierta en LPBF, DED, HIP+forjado , soldadura por difusión al vacío y otras plataformas para explorar la formación colaborativa de aleación de tungsteno + materiales alternativos.

4. Establecimiento de una base de datos de simulación y confiabilidad de servicios :

- Construir una plataforma de simulación de acoplamiento multicampo de alta temperatura-irradiación-corrosión para evaluar la vida útil y la economía de nuevos materiales.

5. Estrategia de desarrollo de "Tungsten+" :

- Se lanzaron unidades estructurales integradas multifuncionales con tungsteno como núcleo, como el "módulo de inercia de tungsteno" y el "bloque integrado de protección de disipación de calor de tungsteno".

resumen

Si bien diversos materiales de alto rendimiento representan una presión potencial para reemplazar las aleaciones de tungsteno, debido a sus ventajas clave en densidad, protección contra la radiación y extrema adaptabilidad ambiental, estas aleaciones mantendrán una posición insustituible en muchas áreas clave durante mucho tiempo. En el futuro, debemos centrarnos tanto en la mejora de los materiales como en la integración de la fabricación, construir un modelo de desarrollo de **"integración irremplazable + sinérgica"** para las aleaciones de tungsteno y consolidar aún más su posición estratégica en la fabricación de alta gama.

10.5 Evolución del rendimiento de las aleaciones de tungsteno en condiciones de servicio extremas en el futuro

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las aleaciones de tungsteno se han utilizado durante mucho tiempo en componentes centrales en entornos extremos debido a su altísimo punto de fusión, alta densidad, buena conductividad térmica y capacidad de absorción de neutrones, como en la primera pared de dispositivos de fusión nuclear, toberas aeroespaciales, escudos neutrónicos de reactores y estructuras de protección térmica de aeronaves hipersónicas. Sin embargo, en estas condiciones de trabajo, el material se enfrenta a fuertes cargas térmicas, tensiones térmicas severas, daños por radiación, erosión por gases y **efectos de degradación por acoplamiento multicampo**. Un conocimiento profundo de la evolución del rendimiento durante su uso es clave para garantizar el servicio estable y a largo plazo de las piezas estructurales de aleación de tungsteno.

10.5.1 Clasificación y características de los entornos de servicio extremos

| Tipo de entorno | Parámetros característicos | Escenarios de aplicación típicos |
|---------------------------------------|--|--|
| Choque térmico de alta temperatura | >2000°C, flujo de calor >10 MW/m ² | Toberas aeroespaciales, calentadores de plasma y la primera pared de la fusión nuclear |
| Campo de irradiación fuerte | Flujo de neutrones > 10 ²⁵ n/m ² con radiación gamma | reactor de fisión/fusión nuclear |
| Alto impacto/alta tasa de deformación | Ondas de choque, cargas explosivas, aceleración inercial | Cuerpo perforante balístico, contrapeso de arma cinética |
| Corrosión química y oxidación | Atmósfera oxidante de alta temperatura, refrigerante de metal líquido. | Etapas de reentrada de la aeronave, gran sistema de refrigeración |
| Entorno de ciclo térmico de vacío | Alternancia frecuente de vacío + estrés térmico | Estructura de la carcasa de una nave espacial, sonda de exploración del espacio profundo |

10.5.2 Mecanismo de evolución de la microestructura y el rendimiento

(1) Recristalización a alta temperatura y engrosamiento del grano

- El servicio a largo plazo a alta temperatura puede provocar fácilmente la migración de los límites del grano y el crecimiento del grano;
- Esto produce una disminución de la resistencia y una mala plasticidad, especialmente en aleaciones de tungsteno de grano fino;
- puede retrasarse mediante dopaje (La₂O₃, Y₂O₃) o mediante una estrategia de fijación de límites de grano.

(2) Acumulación de dislocaciones inducidas por irradiación y formación de burbujas

- La irradiación de neutrones rápidos produce bucles de dislocación y pares vacantes-intersticiales;
- La inyección de gas He/H produce nanocavitación e incluso “cadenas de burbujas”;
- Provocará fragilización del material, disminución de la conductividad térmica y cambios dimensionales (expansión);

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Las soluciones incluyen: nanocrystalización, diseño de interfaz y estructura de barrera de deposición de He.

(3) Fatiga térmica y corrosión por choque térmico

- El calentamiento y enfriamiento cíclicos pueden provocar la aparición y propagación de grietas;
- A una alta densidad de flujo de calor ($>20 \text{ MW/m}^2$), la superficie del material es propensa a "agrietarse" o erosionarse;
- El pretratamiento de la superficie (rugosidad) y el recubrimiento funcional (W-Re, W-TaC) pueden mejorar la resistencia al impacto.

(4) Degradación por oxidación y corrosión

- A altas temperaturas, el tungsteno reacciona fácilmente con O_2 , H_2O , etc. para generar WO_3 , lo que aumenta las pérdidas por evaporación;
- Los refrigerantes de metal líquido como PbLi tienen una fuerte permeabilidad a los límites de grano;
- El recubrimiento de superficies denso y la aleación con inhibición de oxidación son las principales estrategias de afrontamiento.

10.5.3 Modelo de predicción de vida y comportamiento de degradación del rendimiento

| comportamiento evolutivo | Impacto en el rendimiento | Enfoque de modelado |
|---|--|---|
| Recristalización y crecimiento del grano | Reducir la fuerza y la tenacidad | Modelo de cinética de crecimiento del grano |
| Crecimiento de grietas por fatiga térmica | Falla estructural | Fórmula de París, modelo Coffin-Manson |
| Fragilización por radiación | Disminución del alargamiento y la tenacidad a la fractura. | Teoría de tasas + simulación MD |
| Evaporación oxidativa | Pérdida de masa y degradación de la conductividad térmica | Modelo de velocidad de reacción de Arrhenius + acoplamiento de múltiples campos |
| La expansión por cavitación | Cambios dimensionales, distorsión estructural | Modelo de dinámica de clústeres |

10.5.4 Optimización de la adaptabilidad en escenarios de aplicación típicos

● Primera pared de aleación de tungsteno del reactor de fusión (como el plan ITER)

- Requiere una resistencia al flujo de neutrones $>10^{26} \text{ n/m}^2$ y una alta estabilidad del flujo de calor;
- Desarrollar estructuras funcionalmente graduadas de acero W, W-Re y aleaciones de grano ultrafino;
- Dirección de investigación: Control de burbujas, mecanismo de autorreparación de microfisuras.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

◎ **Materiales de vanguardia para vehículos hipersónicos**

- El calentamiento por estampación provoca que las temperaturas locales alcancen los 2500 °C o más, lo que resulta en un choque térmico severo;
- Se pueden utilizar compuestos cerámicos a base de W o estructuras reforzadas con fibra de tungsteno;
- El sistema de recubrimiento debe ser resistente a la oxidación, tener alta transmitancia de radiación y baja transmitancia de radiación.

◎ **Proyectil de energía cinética/núcleo perforante**

- La aceleración del impacto alcanza los $10^4 \sim 10^5$ g, lo que provoca un corte y una deformación graves;
- Las aleaciones W-Ni-Fe dopadas están diseñadas para mejorar el control del modo de fractura;
- Es necesario examinar en detalle la resistencia dinámica y la tenacidad a la fractura bajo una alta tasa de deformación.

◎ **Dispersores/ protectores de radioterapia médica**

- Requiere un control de dosis preciso y una geometría estable;
- Las dimensiones y propiedades físicas deben permanecer estables en un entorno irradiado y con aumento de temperatura;
- El tratamiento de superficies y la reparación con láser pueden prolongar la vida útil.

10.5.5 Nuevas estrategias para la optimización de materiales y el diseño estructural

1. **Organización de gradientes y diseño de estructuras multiescala**

- Materiales de gradiente funcional (FGM) que logran resistencia a la corrosión en la capa superficial, alta resistencia en la capa intermedia y tenacidad en la capa central.
- Se utiliza fabricación aditiva + soldadura por difusión para lograr una "estructura personalizada".

2. **Fortalecimiento de la interfaz y control de los límites de grano heterogéneos**

- Los límites de grano de alta energía se introducen a través de un proceso de prensado isostático en caliente + enfriamiento rápido para mejorar la resistencia a la radiación;
- La interfaz multifásica actúa como una "trampa" de cavitación de He, lo que retarda la expansión y la fragilización.

3. **Recubrimientos resistentes a la radiación y sistemas autorreparadores**

- Utilice capas delgadas de cerámica de alto punto de fusión, como ZrC y HfN, para evitar la oxidación/penetración de la superficie;
- Desarrollar estructuras a pequeña escala que puedan auto-repararse en campos de irradiación, como el dopaje con Bi y Cr.

4. **Predicción de la degradación del servicio impulsada por IA**

- Combinando experimentos de alto rendimiento + aprendizaje automático para predecir la degradación del rendimiento en condiciones de trabajo complejas;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Construir una “base de datos de vida útil” de aleación de tungsteno y una plataforma de diseño de materiales digitales.

resumen

Las aleaciones de tungsteno en entornos extremos en el futuro constituyen un tema de investigación de vanguardia multidisciplinario y multiescalar. Si bien las altas temperaturas, la irradiación, el choque térmico y otros factores plantean importantes desafíos, mediante el diseño de materiales, la optimización de procesos y el modelado digital, sus capacidades de servicio extremo en campos clave como la energía nuclear, la industria aeroespacial y la defensa pueden expandirse continuamente. El desarrollo de aleaciones de tungsteno en el futuro ya no se basará en el modelo tradicional de "material único + servicio estático", sino que evolucionará hacia un nuevo sistema de materiales de "estructura multiescala + adaptación dinámica + predicción inteligente".

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un apéndice

Apéndice 1: Resumen de los parámetros técnicos comunes de las varillas de aleación de tungsteno

Este apéndice resume los parámetros técnicos clave de las varillas de aleación de tungsteno en la producción y aplicaciones industriales, cubriendo el rango de composición química, indicadores de desempeño físico, parámetros de desempeño mecánico y especificaciones de tamaño, etc., para referencia en el control de producción e inspección de calidad.

1. Composición química (rango de proporción típico)

| elemento | Rango de contenido (porcentaje de masa) | Observación |
|------------------------|---|--|
| Tungsteno (W) | 85% – 98% | Los componentes principales determinan la densidad y la resistencia. |
| Níquel (Ni) | 0% – 10% | Fase aglutinante, mejorando la tenacidad y la conformabilidad. |
| Hierro (Fe) | 0% – 5% | Fase adhesiva, mejorando las propiedades mecánicas. |
| Cobre (Cu) | 0% – 5% | Mejorar la conductividad térmica y la resistencia al desgaste. |
| Cobalto (Co) | 0% – 3% | Se utiliza en formulaciones de aleaciones especiales. |
| Otros elementos | Rastro | Como molibdeno, manganeso, titanio, niobio y otros oligoelementos. |

2. Indicadores de rendimiento físico

| actuación | Rango numérico | Estándares/métodos de prueba |
|---|-----------------------------------|------------------------------|
| densidad | 17,0 – 18,8 g/cm ³ | ASTM B311, GB/T 3879 |
| proporción | 17.0 – 18.8 | Lo mismo que arriba |
| Punto de fusión | ≈ 3400 °C | — |
| Coefficiente de expansión lineal | 4,5 – 6,0 × 10 ⁻⁶ / °C | ASTM E228 |
| Conductividad térmica | 70 – 180 W/ m·K | ASTM E1461 |
| Resistividad | 1,5 – 5,0 μΩ·cm | ASTM B193 |
| magnético | Poco magnético o no magnético | — |

3. Parámetros de propiedades mecánicas

| actuación | Rango numérico | Estándares/métodos de prueba |
|--|----------------|------------------------------|
| Resistencia a la tracción (σ_b) | 400 – 1200 MPa | ASTM E8, GB/T 228.1 |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | |
|------------------------------------|-----------------|---------------------|
| Límite elástico ($\sigma_{0,2}$) | 200 – 900 MPa | Lo mismo que arriba |
| Elongación (δ) | 1% – 25% | Lo mismo que arriba |
| dureza | HV 200 – HV 500 | ASTM E384 |
| Tenacidad al impacto | 10 – 80 J | ASTM E23 |

4. Dimensiones y tolerancias

| parámetro | Especificaciones comunes | Observación |
|----------------------------|------------------------------|---|
| Rango de diámetro | 3 mm – 150 mm | La gama de productos personalizados puede ser más amplia |
| Rango de longitud | 100 mm – 2000 mm | Se puede personalizar según los requisitos del cliente. |
| Tolerancia dimensional | $\pm 0,01$ mm – $\pm 0,1$ mm | Según la tecnología de procesamiento y los requisitos del producto. |
| Rugosidad de la superficie | Ra 0,2 – 1,6 μ m | Dependiendo del proceso de pulido/rectificado |
| Rectitud | $\leq 0,05$ mm/m | Varillas de alta precisión |

5. Especificaciones especiales y rendimiento

| tipo | ilustrar |
|---|--|
| Varilla de aleación de tungsteno de alta densidad | Contenido de W > 95 %, utilizado para aplicaciones de alto contrapeso y alto blindaje. |
| Varilla de aleación de tungsteno de alta tenacidad | Aumente el contenido de Ni y Fe para mejorar la tenacidad al impacto y el rendimiento del procesamiento. |
| Varilla compuesta de cobre y tungsteno | Contiene Cu >5%, teniendo en cuenta tanto la conductividad térmica como la resistencia. |
| Varilla de aleación de tungsteno con tratamiento superficial | Niquelado, pulverización y tratamiento de capa de óxido para mejorar la resistencia a la corrosión y la vida útil. |
| Varilla de aleación de tungsteno reforzada con nanopartículas | Añadir fase de refuerzo a escala nanométrica para mejorar las propiedades mecánicas y la estabilidad. |

6. Ejemplos de modelos de productos típicos

| modelo | Composición química (W-Ni-Fe) | Densidad (g/cm^3) | a la tracción (MPa) | Aplicaciones principales |
|--------|-------------------------------|------------------------------|---------------------|--|
| WG-90 | 90-6-4 | 17.8 | 900 | Contrapeso de aviación, industria militar |
| WG-95 | 95-3-2 | 18.5 | 700 | Protección nuclear, equipos médicos |
| WG-97 | 97-2-1 | 18.7 | 600 | Instrumentos de alta gama, piezas de precisión |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

VII. Normas de referencia

- ASTM B311 — Norma técnica para varillas de tungsteno y aleaciones de tungsteno
- GB/T 3879 — Especificaciones generales para varillas de aleación de tungsteno
- ISO 683-11 — Especificación técnica para aleaciones de tungsteno
- MIL-STD-1567 — Requisitos de control de calidad para aleaciones de tungsteno de uso militar

8. Notas

- Las aleaciones de tungsteno varían según el fabricante. La tabla de parámetros muestra un rango típico y es solo de referencia.
- Los productos específicos deben personalizarse y optimizarse en función de las necesidades del cliente y el entorno de aplicación.
- Para garantizar la calidad del producto, el proceso de producción debe controlar estrictamente la pureza del polvo, la densidad y las condiciones del tratamiento térmico.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Apéndice 2: Tabla comparativa de grados de aleación de tungsteno y composiciones químicas

Este apéndice resume los grados de aleación de tungsteno comunes en el mercado y el sistema estándar y sus rangos de composición química principal correspondientes, lo que resulta conveniente para que los ingenieros, compradores y personal de control de calidad se correspondan y seleccionen rápidamente.

1. Clasificación y composición de los grados comunes de aleación de tungsteno (porcentaje en masa)

| Marca | W (Tungsteno) | Ni (níquel) | Fe (hierro) | Cu (cobre) | Co (cobalto) | Observación |
|--------|------------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|--|
| WG-90 | 90,0 ± 1 | 6,0 ± 0,5 | 4,0 ± 0,5 | ≤0,5 | — | Alta densidad y alta resistencia, comúnmente utilizado en la industria aeroespacial. |
| WG-93 | 93,0 ± 1 | 4,0 ± 0,5 | 3,0 ± 0,5 | ≤0,5 | — | Alta resistencia y tenacidad, preferida en el campo militar. |
| WG-95 | 95,0 ± 1 | 3,0 ± 0,3 | 2,0 ± 0,3 | ≤0,3 | — | Blindaje de equipos electrónicos y de energía nuclear |
| WG-97 | 97,0 ± 1 | 2,0 ± 0,3 | 1,0 ± 0,3 | ≤0,2 | — | Aleación de tungsteno de alta pureza, aplicación en instrumentos de precisión. |
| WG-Cu5 | 92,0-95,0 | — | — | 5,0 ± 0,5 | — | de cobre y tungsteno, conductividad térmica y resistencia. |
| WG-Co3 | 92,0-95,0 | — | — | — | 3,0 ± 0,3 | Aleación de tungsteno-cobalto, buena resistencia al desgaste y a la corrosión. |

2. Comparación de marcas estándar chinas (GB/T)

| Marca GB/T | Contenido de tungsteno (W) | Contenido de níquel (Ni) | Contenido de hierro (Fe) | Contenido de cobre (Cu) | Observación |
|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| GBW90 | 89,5-90,5 | 5.5-6.5 | 3,5-4,5 | ≤0,5 | Contrapeso de la aviación e industria militar |
| GBW93 | 92,5-93,5 | 3,5-4,5 | 2,5-3,5 | ≤0,5 | Aleación general de alta resistencia y tenacidad. |
| GBW95 | 94,5-95,5 | 2,5-3,5 | 1,5-2,5 | ≤0,3 | Aplicaciones de la energía nuclear y protección |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | | | | |
|-------|-----------|---------|---------|------|---|
| GBW97 | 96,5–97,5 | 1,5–2,5 | 0,5–1,5 | ≤0,2 | Aleación de tungsteno de alta pureza y alta densidad. |
|-------|-----------|---------|---------|------|---|

3. Correspondencia de los grados de las normas ASTM y MIL estadounidenses

| Grados ASTM/MIL | Contenido de tungsteno (W) | Contenido de níquel (Ni) | Contenido de hierro (Fe) | Contenido de cobre (Cu) | Observación |
|---------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| ASTM B386 WG90 | 89,5–90,5 | 5.5–6.5 | 3,5–4,5 | ≤0,5 | Grados comunes para la industria aeroespacial |
| ASTM B386 WG93 | 92,5–93,5 | 3,5–4,5 | 2,5–3,5 | ≤0,5 | Aplicaciones militares y de alta tenacidad. |
| MIL-W- 2441 WG95 | 94,5–95,5 | 2,5–3,5 | 1,5–2,5 | ≤0,3 | Campo de la energía nuclear y la protección radiológica |

4. Grados de aleación de tungsteno con funciones especiales

| Marca | Combinación de elementos principales | Características y usos |
|---------------------|--------------------------------------|--|
| WG-Nano | W + Ni + Fe + nanopartículas | Refuerzo de nanopartículas para mejorar la tenacidad y la resistencia. |
| WG-Alta resistencia | W + alta relación Ni/Fe | Diseño de alta tenacidad, adecuado para resistencia a impactos y cargas dinámicas. |
| WG-Alto Cu | Alto contenido de W + Cu | Aleación de cobre y tungsteno de alta conductividad térmica, disipación de calor electrónica y aplicaciones de electrodos. |
| Grupo de trabajo | Alto contenido de W + Co | Excelente resistencia al desgaste y a la corrosión, máquinas herramienta y piezas de alta temperatura. |

5. Notas

- Las formulaciones de los distintos fabricantes varían y el rango de grado real puede ajustarse ligeramente;
- El número en el grado generalmente corresponde al porcentaje de contenido de tungsteno, y el sufijo puede representar el elemento de aleación principal o un proceso especial;
- Al momento de aplicar, la selección debe hacerse de manera integral en función de los requisitos de desempeño específicos y las limitaciones del proceso.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Apéndice 3: Documentos estándar e índice de referencia de varillas de aleación de tungsteno

Este apéndice recopila los documentos estándar autorizados, las especificaciones técnicas y los principales materiales de referencia en el campo de las varillas de aleación de tungsteno, que son convenientes para que los investigadores científicos, ingenieros y personal de control de calidad consulten y apliquen.

1. Normas internacionales y nacionales

| Norma N° | Nombre estándar | Agencia editorial | Ámbito de aplicación |
|------------------------------|--|--|--|
| ASTM B311 | Especificación estándar para barras y varillas de tungsteno y aleación de tungsteno | ASTM Internacional | Especificaciones y requisitos técnicos de las varillas de tungsteno y sus aleaciones |
| GB/T 3879 | Requisitos técnicos generales para varillas de aleación de tungsteno | Administración Nacional de Normalización de China | Propiedades físicas y mecánicas y métodos de ensayo de varillas de aleación de tungsteno |
| ISO 683-11 | Aceros tratables térmicamente, aceros aleados y aceros de fácil mecanización — Parte 11: Aleaciones de tungsteno | Organización Internacional de Normalización (ISO) | Especificaciones técnicas de la aleación de tungsteno |
| Estándar militar MIL-1567 | Estándar militar para el control de calidad de las aleaciones de tungsteno | Departamento de Defensa de los Estados Unidos | Productos militares de aleación de tungsteno |
| YS/T 547 | Requisitos técnicos de la aleación de tungsteno de alta densidad | Estándar de la industria de metalúrgica de China | Normas técnicas de la industria de varillas de aleación de tungsteno |

3. Artículos importantes en revistas y congresos

| Título del artículo | autor | Revistas/Conferencias | Publicado | Enfoque de la investigación |
|--|------------------|----------------------------------|-----------|---|
| Comportamiento de las aleaciones de tungsteno a alta temperatura | S. Zhang, Y. Liu | Revista de Ciencia de Materiales | 2022 | Propiedades de alta temperatura y evolución de la microestructura de la aleación de tungsteno |
| Evolución de la microestructura en aleaciones W-Ni-Fe | M. Chen, X. Wang | Metalurgia de polvos | 2021 | Relación entre la evolución de la microestructura y las propiedades mecánicas |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | | | |
|---|----------------------|--|------|--|
| Avances en aleaciones de tungsteno resistentes a la radiación | J. Lee, H. Kim | Materiales nucleares | 2023 | Mecanismo de daño por radiación y diseño resistente a la radiación de la aleación de tungsteno |
| Desarrollo de aleaciones de tungsteno de alta densidad para la industria aeroespacial | L. Smith, D. Johnson | Conferencia Aeroespacial Internacional | 2022 | aleación de tungsteno en la industria aeroespacial |

4. Informes técnicos e información de la industria

| Nombre del material | Unidad de liberación | años | Resumen |
|---|---|------|---|
| Especificaciones técnicas de la prueba de rendimiento del material de aleación de tungsteno | Asociación de la Industria del Tungsteno de China | 2021 | Propiedades físicas de la aleación de tungsteno, propiedades mecánicas y normas de métodos de prueba. |
| Informe del proceso de producción y control de calidad de varillas de aleación de tungsteno | Una gran empresa de fabricación de aleaciones de tungsteno. | 2023 | Proceso de preparación de varillas de aleación de tungsteno e indicadores clave de calidad |
| Aleación de tungsteno en el campo de la energía nuclear | Centro Nacional de Investigación de Tecnología de Energía Nuclear | 2022 | Aleación de tungsteno en reactores nucleares y materiales de protección |

5. Sitios web y bases de datos de referencia

- **Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno (ITIA)**
<https://www.itia.info/> Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno , recursos de tungsteno y tendencias de la industria.
- **Base de datos internacional de materiales de ASM**
<https://www.asminternational.org/> Base de datos de ciencia e ingeniería de materiales, incluidos datos de materiales de aleación de tungsteno.
- **Repositorio de datos de materiales del NIST**
<https://materialsdata.nist.gov/> Repositorio de datos de materiales del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Apéndice 4: Glosario de aleaciones de tungsteno y abreviaturas en inglés

Este apéndice recopila las definiciones y explicaciones de términos profesionales comúnmente utilizados y abreviaturas inglesas relacionadas en el campo de las aleaciones de tungsteno, con el objetivo de ayudar a los lectores a comprender mejor el contenido técnico y la literatura internacional.

1. Términos profesionales relacionados con las aleaciones de tungsteno

| el término | Interpretación |
|--|--|
| Aleación de tungsteno | Un material de aleación de alta densidad con tungsteno como componente principal y metales de enlace (como níquel, hierro y cobre) agregados. |
| Metalurgia de polvos (PM) | Un método para preparar materiales metálicos mediante procesos de prensado y sinterización de polvo. |
| Sinterización | El proceso de combinar partículas de polvo en un sólido denso a alta temperatura. |
| Densificación | El proceso de reducir la porosidad del material y aumentar la densidad mediante sinterización, tratamiento térmico y otros procesos. |
| Tratamiento térmico | El proceso de cambiar la estructura y las propiedades de los materiales a través del calentamiento, el aislamiento y el enfriamiento. |
| Microestructura | La morfología del grano, la estructura de fases y la distribución de defectos del material se pueden observar bajo un microscopio. |
| Dureza | La capacidad de un material para resistir la deformación plástica local se expresa generalmente mediante la dureza Rockwell y la dureza Vickers. |
| Resistencia a la tracción | La capacidad de un material para soportar la máxima tensión bajo carga de tracción. |
| Fuerza de fluencia | El valor de tensión en el que un material comienza a sufrir una deformación permanente. |
| Alargamiento | La capacidad de un material para deformarse plásticamente antes de romperse, generalmente expresada como un porcentaje. |
| Coefficiente de expansión térmica (CTE) | La proporción de cambio dimensional causado por un cambio unitario en la temperatura de un material. |
| Conductividad térmica | La capacidad de un material para conducir calor, medida en $W / (m \cdot K)$. |
| Ensayos no destructivos (END) | Métodos de detección que no destruyen la integridad del material, como pruebas ultrasónicas y de rayos X. |
| Nanofortalecimiento | Tecnología que utiliza partículas o estructuras a escala nanométrica para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales. |
| Rendimiento del servicio | Cómo se comporta el material en condiciones reales de trabajo. |

2. Explicación de las abreviaturas comunes en inglés

| Abreviaturas | Nombre completo | Interpretación |
|--------------|-----------------|----------------|
| W | Tungsteno | Tungsteno |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | | |
|------------------------------------|---|--|
| Ni | Níquel | níquel |
| Fe | Hierro | hierro |
| Cu | Cobre | cobre |
| Co | Cobalto | cobalto |
| P.M | Metalurgia de polvos | Metalurgia de polvos |
| ASTM | Sociedad Americana de Pruebas y Materiales | ASTM |
| GB/T | Guobiao (Normas Nacionales Chinas) | Norma Nacional China |
| ISO | Organización Internacional de Normalización | Organización Internacional de Normalización |
| MIL | Estándar militar | Estándares militares |
| Ensayos no destructivos (END) | Pruebas no destructivas | Pruebas no destructivas |
| CTE | Coefficiente de expansión térmica | Coefficiente de expansión lineal |
| Alto voltaje | Dureza Vickers | Dureza Vickers |
| Microscopia electrónica de barrido | Microscopio electrónico de barrido | Microscopía electrónica de barrido |
| XRF | Fluorescencia de rayos X | espectroscopia de fluorescencia de rayos X |
| PCI | Plasma acoplado inductivamente | Espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente |
| Oficina Nacional de Salud | Oxígeno, nitrógeno, hidrógeno | Análisis del contenido de oxígeno, nitrógeno e hidrógeno. |
| MGF | Material funcionalmente graduado | Materiales con clasificación funcional |
| Maryland | Dinámica molecular | Dinámica molecular |
| AI | Inteligencia artificial | AI |

3. Suplemento de términos de uso común

| el término | Interpretación |
|---------------------------------------|---|
| Aleación pesada | Los materiales de aleación con una densidad mayor, normalmente superior a 10 g/cm ³ , pertenecen a esta categoría las aleaciones de tungsteno. |
| Fase adhesiva | Fases metálicas de bajo punto de fusión, como Ni y Fe, se utilizan para conectar partículas de tungsteno en aleaciones de tungsteno. |
| Desajuste de expansión térmica | Estrés o deformación causada por diferentes coeficientes de expansión térmica entre diferentes materiales o fases. |
| Microfisuras | Pequeñas grietas en el interior o en la superficie de un material pueden provocar fallas por fatiga. |
| Tenacidad al impacto | La capacidad de un material para absorber energía cuando se somete a cargas de impacto. |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| | |
|--|---|
| Rugosidad de la superficie | La rugosidad microscópica de la superficie del material afecta las propiedades de fricción, fatiga y corrosión. |
| Distribución del tamaño de partículas | Características de distribución estadística del tamaño de partículas en materiales en polvo. |
| Control de la atmósfera | Control de la composición y presión del gas ambiente durante la sinterización o el tratamiento térmico. |

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm³), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

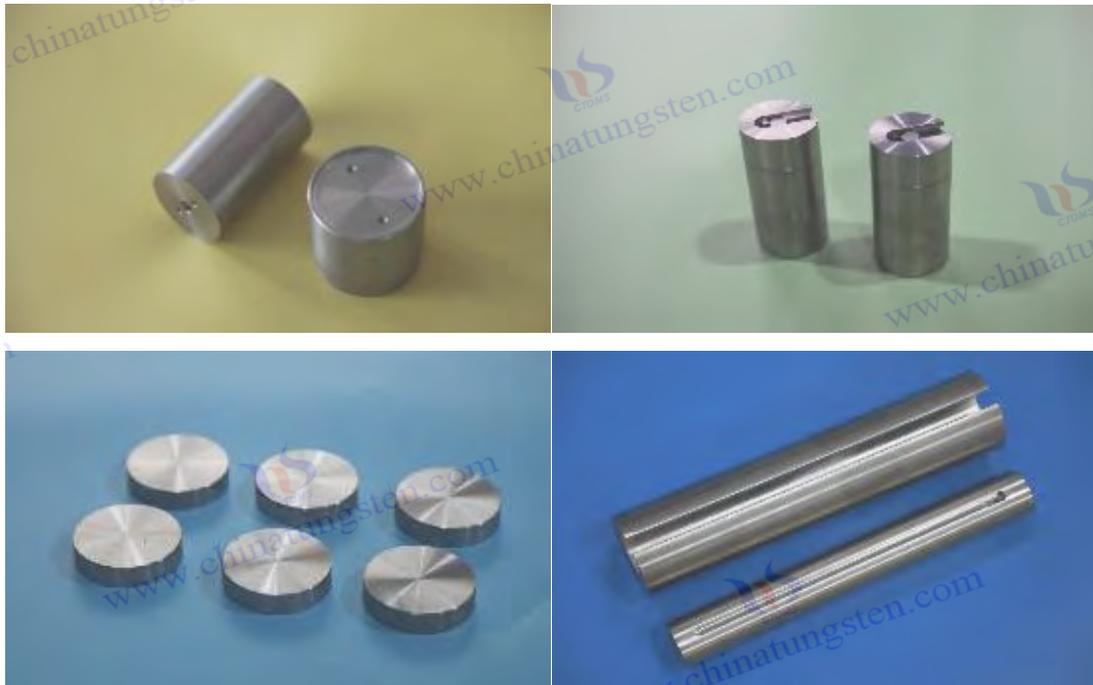
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: sales@chinatungsten.com

Tel: +86 592 5129696

Official website: www.tungsten-alloy.com



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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