

## Enciclopedia de aleaciones pesadas de tungsteno

CTIA GROUP LTD

.en.com

www.ch

www.chinatungsten.com

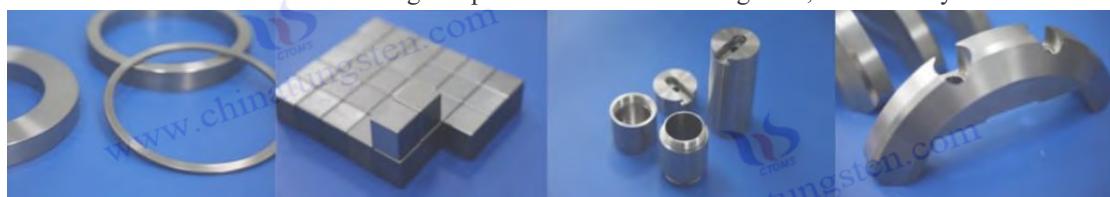
www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

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](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696  
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V  
[sales@chinatungsten.com](mailto: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](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

**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/cm<sup>3</sup>), 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

## Tabla de contenido

### **Capítulo 1: Introducción**

- 1.1 Definición y descripción general de las aleaciones de tungsteno de alta densidad
- 1.2 Importancia de la investigación y la aplicación de aleaciones de tungsteno de alta densidad
- 1.3 Propósito y estructura de este libro

### **Capítulo 2: Conocimientos básicos sobre aleaciones de tungsteno de alta gravedad específica**

- 2.1 Propiedades químicas y físicas de las aleaciones de tungsteno de alta densidad
- 2.2 Desarrollo histórico de las aleaciones de tungsteno de alta densidad
- 2.3 Comparación de aleaciones de tungsteno de alta densidad con otros materiales
- 2.4 Clasificación de las aleaciones pesadas de tungsteno
  - 2.4.1 Clasificación según la composición (W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, W-Ni-Fe-Co, etc.)
  - 2.4.2 Clasificación basada en densidad y propiedades mecánicas (Clase 1 ~ Clase 4)
  - 2.4.3 Clasificación según el uso (militar, aeroespacial, médico, industrial, etc.)

### **Capítulo 3: Análisis del rendimiento de aleaciones de tungsteno de alto peso**

- 3.1 Propiedades mecánicas de la aleación de tungsteno de alta densidad
- 3.2 Propiedades físicas de la aleación de tungsteno de alta densidad
- 3.3 Elementos principales y sus funciones de las aleaciones pesadas de tungsteno
- 3.4 Resistencia a la corrosión y al desgaste de aleaciones pesadas de tungsteno
- 3.5 Capacidad de protección contra la radiación de las aleaciones pesadas de tungsteno
- 3.6 Métodos para optimizar el rendimiento de aleaciones pesadas de tungsteno

### **Capítulo 4: Tecnología de preparación de aleación de tungsteno de alta gravedad específica**

- 4.1 Selección y pretratamiento de materias primas de aleación de tungsteno de alta densidad
- 4.2 Proceso de pulvimetallurgia de aleación de tungsteno de alta densidad
- 4.3 Otros métodos de preparación de aleación de tungsteno de alta densidad
- 4.4 Influencia de los parámetros del proceso de aleación de tungsteno de alta densidad
- 4.5 Control de calidad y pruebas de aleación de tungsteno de alta densidad

### **Capítulo 5: Procesamiento y posprocesamiento de aleaciones de tungsteno de alta gravedad específica**

- 5.1 Tecnología de mecanizado de aleación de tungsteno de alta densidad
- 5.2 Tratamiento superficial de aleación de tungsteno de alta densidad
- 5.3 Soldadura y conexión de aleación de tungsteno de alta densidad

### **Capítulo 6: Equipos de producción de aleaciones de tungsteno de alta gravedad específica**

- 6.1 Equipo de preparación de polvo de aleación de tungsteno pesado
- 6.2 Equipo de moldeo de aleaciones pesadas de tungsteno
- 6.3 Equipo de sinterización de aleaciones pesadas de tungsteno

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- 6.4 Equipos de procesamiento y posprocesamiento de aleaciones pesadas de tungsteno
- 6.5 Selección y optimización de equipos de producción de aleaciones pesadas de tungsteno

## **Capítulo 7: Equipo de prueba de aleaciones de tungsteno de alta gravedad específica**

- 7.1 Equipo de prueba de densidad de aleación de tungsteno de alta densidad
- 7.2 Equipo de prueba de propiedades mecánicas de aleación de tungsteno de alta densidad
- 7.3 Equipo de análisis de microestructura de aleación de tungsteno de alta densidad
- 7.4 Equipo de análisis de composición de aleación de tungsteno de alta densidad
- 7.5 Equipo de pruebas no destructivas de aleación de tungsteno de alta densidad
- 7.6 Selección y tendencia de desarrollo de equipos de prueba de aleaciones de tungsteno de alta densidad

## **Capítulo 8: Principales productos de aleación de tungsteno de alta gravedad específica de CTIA GROUP LTD**

### **8.1 Productos de contrapeso de aleación de tungsteno de alta gravedad específica**

- 8.1.1 Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno de alta gravedad específica
- 8.1.2 Contrapeso de automóvil de aleación de tungsteno de alta gravedad específica
- 8.1.3 Pesas para equipos deportivos de aleación de tungsteno de alta gravedad específica
- 8.1.4 Contrapesos para buques de aleación de tungsteno de alta gravedad específica
- 8.1.5 Contrapeso de elevador de aleación de tungsteno de alta gravedad específica
- 8.1.6 Eje de dardo de aleación de tungsteno pesado
- 8.1.7 Plomos de pesca de aleación de tungsteno pesados

### **8.2 Productos militares de aleación de tungsteno de alta gravedad específica**

- 8.2.1 Núcleo perforante de aleación de tungsteno pesado
- 8.2.2 Placa de blindaje protectora de aleación de tungsteno de alta densidad
- 8.2.3 Estuche de blindaje de munición de aleación de tungsteno de alta gravedad específica
- 8.2.4 Componentes de misiles antitanque de aleación de tungsteno de alta densidad
- 8.2.5 Contrapesos para armas de fuego de aleación de tungsteno de alta gravedad específica
- 8.2.6 Contrapeso de giroscopio de aviación de aleación de tungsteno de alta gravedad específica
- 8.2.7 Buje de boquilla de cohete de aleación de tungsteno pesado

### **8.3 Aleación de tungsteno de alta gravedad específica, productos relacionados con la medicina**

- 8.3.1 Componentes de protección contra la radiación de aleación de tungsteno pesado
- 8.3.2 Contenedor de isótopos de aleación de tungsteno pesado
- 8.3.3 Aguja de aleación de tungsteno médica de alta gravedad específica
- 8.3.4 Objetivo de radioterapia de aleación de tungsteno de alta densidad
- 8.3.5 Pantalla protectora médica de aleación de tungsteno de alta gravedad específica
- 8.3.6 Contenedor de residuos nucleares de aleación de tungsteno pesado
- 8.3.7 Componentes del cuchillo de rayos gamma de aleación de tungsteno pesado

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

#### **8.4 Herramientas y componentes industriales de aleación de tungsteno pesado**

- 8.4.1 Herramientas de corte de aleación de tungsteno pesadas
- 8.4.2 Molde y punzón de aleación de tungsteno de alta gravedad específica
- 8.4.3 Piezas de supresión de vibraciones de aleación de tungsteno pesado
- 8.4.4 Herramientas de perforación de aleación de tungsteno de alta densidad
- 8.4.5 Componentes de cojinetes de aleación de tungsteno pesado
- 8.4.6 Manguito de esmerilado de aleación de tungsteno pesado
- 8.4.7 Contrapesos para máquinas herramienta pesadas de aleación de tungsteno pesado

#### **8.5 Productos electrónicos y energéticos de aleación de tungsteno pesado**

- 8.5.1 Materiales de electrodos de aleación de tungsteno de alta densidad
- 8.5.2 Disipador de calor (radiador) de aleación de tungsteno de alta densidad
- 8.5.3 Componentes de reactores nucleares de aleación pesada de tungsteno
- 8.5.4 Contrapeso de batería de aleación de tungsteno de alta gravedad específica
- 8.5.5 Componentes de equipos solares de aleación de tungsteno pesado
- 8.5.6 Ánodo de tubo de rayos X de aleación de tungsteno pesado
- 8.5.7 Contrapeso de turbina eólica de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

#### **8.6 Productos personalizados de aleación pesada de tungsteno**

- 8.6.1 Impresión 3D de piezas de aleación de tungsteno de alta gravedad específica
- 8.6.2 Contrapeso de forma especial de aleación de tungsteno de alta gravedad específica
- 8.6.3 Obras de arte y piezas decorativas de aleación de tungsteno de alta densidad
- 8.6.4 Componentes de instrumentos experimentales de aleación de tungsteno pesado
- 8.6.5 Piezas de microprecisión de aleación de tungsteno de alta densidad
- 8.6.6 Criptomonedas de aleación pesada de tungsteno
- 8.6.7 Tarjeta bancaria de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

### **Capítulo 9: Campos de aplicación de la aleación de tungsteno de alta gravedad específica**

#### **9.1 Aplicación de aleación de tungsteno de alta gravedad específica en la industria aeroespacial**

- 9.1.1 Componentes de contrapeso y equilibrio de aeronaves
- 9.1.2 Componentes del sistema de propulsión de la nave espacial
- 9.1.3 Giroscopio y sistema de navegación inercial

#### **9.2 Aplicación de aleación de tungsteno de alta gravedad específica en la industria militar**

- 9.2.1 Proyectiles perforantes de blindaje y núcleos de proyectiles de energía cinética
- 9.2.2 Materiales de blindaje y blindaje de protección
- 9.2.3 Componentes de misiles y armas de fuego
- 9.2.4 Proyectiles formados explosivamente (EFP)

#### **9.3 Aplicación de aleación pesada de tungsteno en el campo médico**

- 9.3.1 Equipos de protección y blindaje radiológico
- 9.3.2 Radioterapia y contenedores de isótopos

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

### 9.3.3 Instrumentos quirúrgicos e implantes

## 9.4 Aplicación de aleaciones pesadas de tungsteno en la industria y en los campos civiles

- 9.4.1 Herramientas de mecanizado
- 9.4.2 Contrapesos para equipos pesados
- 9.4.3 Industria automotriz y de carreras
- 9.4.4 Equipos deportivos y de entretenimiento

## 9.5 Aplicación de aleaciones de tungsteno de alta gravedad específica en el campo de la electrónica y la energía

- 9.5.1 Disipación de calor y blindaje de equipos electrónicos
- 9.5.2 Componentes de energía nuclear y renovable
- 9.5.3 Componentes semiconductores y microelectrónicos

## 9.6 Aplicación de aleaciones pesadas de tungsteno en campos emergentes

- 9.6.1 Aplicación de fabricación aditiva (impresión 3D)
- 9.6.2 Exploración espacial y exploración de aguas profundas
- 9.6.3 Desarrollo de aleaciones de alta entropía y materiales compuestos

## Capítulo 10: Normas nacionales e internacionales de aleación pesada de tungsteno

- 10.1 Normas internacionales para aleaciones pesadas de tungsteno
- 10.2 Normas nacionales para aleaciones pesadas de tungsteno
- 10.3 Contenido y requisitos de las normas para aleaciones pesadas de tungsteno
- 10.4 Comparación de normas nacionales e internacionales para aleaciones pesadas de tungsteno
- 10.5 Tendencia de desarrollo de normas para aleaciones pesadas de tungsteno
- 10.6 CTIA GROUP LTD Aleación de tungsteno de alta gravedad específica MSDS

## Capítulo 11: Consideraciones ambientales y económicas de las aleaciones pesadas de tungsteno

- 11.1 Impacto ambiental del proceso de producción de aleaciones pesadas de tungsteno
- 11.2 Reciclaje y reutilización de aleaciones pesadas de tungsteno
- 11.3 Análisis de costos de aleación pesada de tungsteno

## Capítulo 12: Fronteras de la investigación de las aleaciones de tungsteno de alta densidad

- 12.1 Desarrollo de nuevos materiales de aleaciones de tungsteno de alta densidad
- 12.2 Instrucciones para mejorar el rendimiento de las aleaciones de tungsteno de alta densidad
- 12.3 Simulación y ciencia de materiales computacionales de aleaciones de tungsteno de alta densidad
- 12.4 Diseño y personalización asistidos por IA de aleaciones de tungsteno de alta densidad
- 12.5 Relación entre las aleaciones de tungsteno de alta densidad y las aleaciones de alta entropía que contienen tungsteno
- 12.6 Aleación de tungsteno de baja toxicidad (libre de níquel o aleación con bajo contenido de níquel)
- 12.7 Aleación de tungsteno nanoestructurada

### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

## Apéndice

- Glosario de aleaciones pesadas de tungsteno
- Referencias de aleación pesada de tungsteno
- Hoja de datos de aleación pesada de tungsteno
- Patentes relacionadas con la aleación de tungsteno de alta gravedad específica

**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/cm<sup>3</sup>), 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Capítulo 1: Introducción

### Definición y descripción general de la aleación pesada de tungsteno

La aleación de tungsteno de alta densidad, como su nombre indica, es un material compuesto de tungsteno (W) como componente principal y una pequeña cantidad de otros elementos metálicos (como níquel Ni, hierro Fe, cobre Cu, etc.) añadidos mediante un proceso específico. Este tipo de aleación es conocida por su altísima densidad (normalmente entre 17,0 y 19,3 g/cm<sup>3</sup>, cercana a los 19,25 g/cm<sup>3</sup> del tungsteno puro), superando con creces a metales comunes como el acero (7,8 g/cm<sup>3</sup>) o el plomo (11,3 g/cm<sup>3</sup>). Sus principales características no son solo su alta densidad, sino también su excelente resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, resistencia a altas temperaturas y buena capacidad de protección contra la radiación, lo que le confiere un valor de aplicación irremplazable en numerosos campos.

Desde la perspectiva de la composición química, las aleaciones de tungsteno de alta densidad suelen contener entre un 85 % y un 99 % de tungsteno, siendo el resto elementos de la fase aglutinante (como níquel y hierro) o elementos sustitutos (como cobre). Estos elementos añadidos se mezclan con polvo de tungsteno, se prensan y sinterizan mediante un proceso de pulvimetallurgia para formar una microestructura uniforme. La función de la fase aglutinante es mejorar la tenacidad y la maquinabilidad de la aleación, ya que, si bien el tungsteno puro tiene una densidad extremadamente alta, es demasiado duro y frágil para cumplir con los requisitos reales de procesamiento y aplicación. Al optimizar la fórmula, las aleaciones de tungsteno de alta densidad no solo conservan las características de alta densidad del tungsteno, sino que también mejoran sus propiedades mecánicas, convirtiéndolo en un material avanzado, funcional y práctico.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

En la ciencia de los materiales, las aleaciones pesadas de tungsteno se consideran una combinación de materiales funcionales y estructurales. Su alta densidad las hace excelentes en entornos que requieren poco volumen y gran peso, como contrapesos aeroespaciales y núcleos de perforación de blindaje militar. Al mismo tiempo, su estabilidad física y química las hace adecuadas para entornos extremos, como el blindaje radiológico o las herramientas de procesamiento a alta temperatura en la industria nuclear. Esta versatilidad ha hecho que las aleaciones pesadas de tungsteno ocupen un lugar destacado en la industria y la tecnología modernas, y se las conoce como "los mejores metales pesados".

Desde una perspectiva histórica, el desarrollo de las aleaciones de tungsteno de alta densidad surgió de la investigación sobre materiales de tungsteno a principios del siglo XX, especialmente de la demanda de materiales militares de alto rendimiento durante la Segunda Guerra Mundial, lo que impulsó su progreso tecnológico. Hoy en día, con la mejora continua de los procesos de fabricación (como la sinterización en fase líquida, el prensado isostático en caliente, etc.) y la expansión de sus campos de aplicación, las aleaciones de tungsteno de alta densidad se han expandido desde sus usos militares originales a los campos médico, industrial, civil e incluso científico-tecnológico emergente, convirtiéndose en una importante rama de investigación y aplicación en la ciencia de los materiales.

## **1.2 La importancia de la investigación y la aplicación de la aleación de tungsteno de alta gravedad específica**

alta densidad poseen una gran importancia científica y un valor práctico, lo cual se refleja en numerosos aspectos. En primer lugar, desde un punto de vista científico, constituyen un modelo para la investigación de materiales compuestos metálicos. Mediante el ajuste de la proporción de tungsteno con respecto a otros elementos y la optimización del proceso de preparación, se puede explorar sistemáticamente la relación entre propiedades como la densidad, la resistencia y la tenacidad. Este tipo de investigación no solo promueve el desarrollo teórico de la ciencia de los materiales, sino que también proporciona una valiosa experiencia para el desarrollo de otras aleaciones de alto rendimiento. Por ejemplo, la tecnología de control de la microestructura de las aleaciones de tungsteno de alta densidad (como la optimización del tamaño de grano y la uniformidad de la distribución de fases) se ha aplicado a la investigación de aleaciones de alta entropía y nanomateriales.

En el ámbito industrial, la aplicación de aleaciones de tungsteno de alta densidad mejora directamente la eficiencia y la seguridad de muchas industrias. En el sector aeroespacial, sus características de alta densidad permiten que los componentes de contrapeso de aeronaves y naves espaciales distribuyan su masa con precisión en un espacio limitado, optimizando así el rendimiento de vuelo y el consumo de combustible. En la industria militar, los proyectiles perforantes fabricados con aleaciones pesadas de tungsteno pueden penetrar eficazmente los materiales de blindaje modernos y mejorar la capacidad de combate de los sistemas de armas gracias a su alta dureza y densidad. Además, su resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión lo convierten en una opción ideal para herramientas de procesamiento a alta temperatura y equipos de aguas profundas, prolongando significativamente la vida útil de los equipos y reduciendo los costes de mantenimiento.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Su aplicación en el campo médico resalta aún más el valor social de las aleaciones de tungsteno de alta densidad. Gracias a su excelente capacidad de blindaje contra la radiación, se utilizan ampliamente en componentes de blindaje de máquinas de rayos X, equipos de TC y dispositivos de radioterapia. En comparación con los materiales de plomo tradicionales, las aleaciones de tungsteno son atóxicas y presentan una mayor densidad. Ofrecen una protección equivalente o incluso superior en un volumen más reducido, reducen el peso del equipo y mejoran la seguridad de los pacientes y el personal médico. Además, se utilizan en la fabricación de contenedores de isótopos médicos y componentes de bisturí de rayos gamma para garantizar el transporte seguro y el tratamiento preciso de materiales radiactivos, e impulsar el desarrollo de la tecnología médica moderna.

En el ámbito civil, la aplicación de las aleaciones de tungsteno de alta densidad es fundamental. Por ejemplo, su uso en equipos deportivos (como pesas para palos de golf y cañas para dardos) y plomadas de pesca sustituye a los materiales tóxicos de plomo, lo que no solo mejora el rendimiento del producto, sino que también cumple con los requisitos de protección ambiental. Esta amplia penetración, desde la industria hasta el uso civil, refleja el potencial de las aleaciones de tungsteno de alta densidad para mejorar la calidad de vida y promover el desarrollo sostenible.

Desde una perspectiva económica, la investigación, el desarrollo y la aplicación de aleaciones de tungsteno de alta densidad han impulsado el desarrollo de cadenas industriales relacionadas, como la minería de tungsteno, la fabricación de equipos de pulvimetallurgia y la tecnología de procesamiento de precisión. Especialmente en el contexto de la creciente demanda mundial de materiales de alto rendimiento, las perspectivas de mercado de las aleaciones de tungsteno de alta densidad son amplias, generando importantes beneficios económicos para empresas y países. Sin embargo, su elevado coste de producción y su dependencia de los recursos (el tungsteno es un metal raro) también han impulsado a los investigadores a explorar continuamente procesos de producción y tecnologías de reciclaje más eficientes para lograr un beneficio mutuo para la economía y el medio ambiente.

### 1.3 Propósito y organización de este libro

Este libro pretende presentar de forma exhaustiva y sistemática los conocimientos relevantes sobre las aleaciones de tungsteno de alta densidad, desde la teoría básica hasta la aplicación práctica, desde la tecnología de producción hasta el desarrollo futuro, y se esfuerza por proporcionar a los lectores un material de referencia fiable y detallado. Sus principales objetivos son los siguientes:

En primer lugar, proporciona apoyo teórico para investigadores académicos. Este libro explorará profundamente las propiedades químicas y físicas, los procesos de preparación y los métodos de optimización del rendimiento de las aleaciones de tungsteno de alta densidad, ayudará a los investigadores a comprender la relación entre su microestructura y propiedades macroscópicas, y servirá de inspiración para el diseño de nuevos materiales basados en tungsteno. En segundo lugar, proporciona una guía práctica para el personal técnico y de ingeniería. Al presentar en detalle los equipos de producción, la tecnología de prueba y las aplicaciones específicas de los productos, este libro tiene como objetivo ayudar a los profesionales a dominar las habilidades de procesamiento y aplicación de las aleaciones de tungsteno de alta densidad y mejorar la eficiencia de la producción industrial. En tercer

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

lugar, proporciona una referencia estratégica para los responsables de la toma de decisiones y los gerentes de la industria. Al analizar las normas nacionales e internacionales, los impactos ambientales y las consideraciones económicas, este libro revelará las tendencias de desarrollo y los desafíos de la industria de las aleaciones de tungsteno de alta densidad y servirá de base para la formulación de políticas y las decisiones de inversión.

Los lectores de este libro incluyen, entre otros, a los siguientes grupos: académicos y estudiantes de ciencia e ingeniería de materiales, ingenieros dedicados a la producción y procesamiento de aleaciones de tungsteno, expertos técnicos de las industrias aeroespacial y de defensa, fabricantes de equipos médicos y profesionales de la industria interesados en materiales de alto rendimiento. Para satisfacer las necesidades de diferentes lectores, el diseño del contenido de este libro considera tanto la profundidad teórica como la amplitud de aplicación, con una revisión sistemática de los conocimientos básicos y los últimos avances en investigación de vanguardia.

El libro está organizado de la siguiente manera:

**Capítulo 2 al Capítulo 5 :** Sentar las bases, presentar los conocimientos básicos, el análisis del rendimiento, la tecnología de preparación, la tecnología de procesamiento y posprocesamiento de la aleación de tungsteno de alta densidad y establecer un marco teórico integral para los lectores.

**Capítulo 6 al Capítulo 7 :** Centrándose en la producción y las pruebas, se detallan los equipos de producción y los equipos de prueba de aleación de tungsteno de alta densidad, destacando el soporte de hardware para la implementación técnica.

**Capítulo 8 al Capítulo 9 : Pasando a las aplicaciones,** se enumeran respectivamente los principales productos y los campos de aplicación más amplios de China Tungsten Intelligence, lo que demuestra el valor real de la aleación de tungsteno de alta densidad.

**Capítulos 10 a 11:** Se centran en las normas y los impactos, analizan los estándares nacionales e internacionales, así como las consideraciones ambientales y económicas, y brindan apoyo contextual para la industrialización.

**Capítulo 12 :** Mirando hacia el futuro, este artículo analiza las fronteras de investigación de las aleaciones de tungsteno de alta densidad, incluida la investigación cruzada del diseño asistido por IA y las aleaciones de alta entropía.

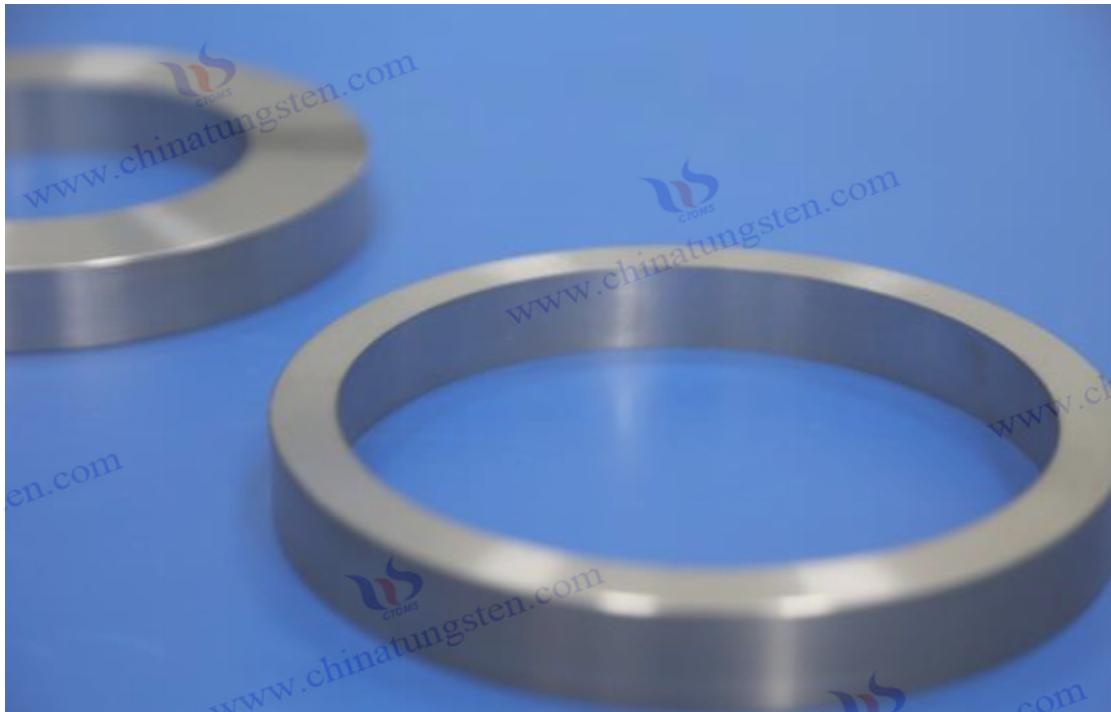
**Apéndice :** Proporciona un glosario, referencias y tablas de datos para facilitar la referencia y la investigación en profundidad de los lectores.

Mediante esta estructura, este libro busca presentar una visión general de las aleaciones de tungsteno de alta densidad, desde la teoría hasta la práctica, desde la tecnología hasta la aplicación, desde la situación actual hasta el futuro. Tanto si se trata de un estudiante que se inicia en este campo como de un profesional que desea profundizar en su investigación, este libro pretende ser su aliado de confianza para explorar el mundo de las aleaciones de tungsteno de alta densidad.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Capítulo 2: Conocimientos básicos sobre aleaciones de tungsteno de alta gravedad específica

### Propiedades químicas y físicas de las aleaciones pesadas de tungsteno

Las aleaciones de tungsteno de alta densidad son la base fundamental de su amplia aplicación en la industria y la tecnología modernas. Estas propiedades no solo se derivan de las excelentes propiedades del propio tungsteno, sino que también se benefician de la optimización del proceso de aleación. Desde la perspectiva de la composición química, las aleaciones de tungsteno de alta densidad están dominadas por el tungsteno (W), con un contenido de tungsteno generalmente entre el 85 % y el 99 %, y el resto consiste en una pequeña cantidad de fase enlazante o elementos añadidos, como níquel (Ni), hierro (Fe), cobre (Cu), cobalto (Co) o molibdeno (Mo). El tungsteno es un metal de transición ubicado en el sexto período de la tabla periódica, con número atómico 74 y masa atómica 183,84 u. Tiene un punto de fusión extremadamente alto (3422 °C) y una gran estabilidad química. Su configuración electrónica ( $[Xe] 4f^1 5d^4 6s^2$ ) determina su alta densidad y dureza, mientras que elementos añadidos como el níquel y el hierro mejoran significativamente la fragilidad del tungsteno al formar soluciones sólidas o compuestos intermetálicos (como  $Ni_3 Fe$ ). Por ejemplo, en una aleación típica de tungsteno-níquel-hierro (W-Ni-Fe), el contenido de tungsteno es del 90%-97%, y la relación de níquel a hierro suele ser de 7:3 o 5:5. Esta relación forma una fase líquida durante el proceso de sinterización, que promueve la unión uniforme de partículas de tungsteno y mejora la tenacidad de la aleación. Por otro lado, la aleación de tungsteno-cobre (W-Cu) se utiliza a menudo en dispositivos electrónicos debido a la alta conductividad eléctrica y térmica del cobre. El contenido de tungsteno es generalmente del 70%-90% para equilibrar la densidad y las propiedades térmicas.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

Desde la perspectiva de las propiedades físicas, la densidad de la aleación pesada de tungsteno es su mayor ventaja, con un rango de 17,0 a 19,3 g/cm<sup>3</sup>, cercano a los 19,25 g/cm<sup>3</sup> del tungsteno puro. Esta alta densidad se debe a la estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC) del tungsteno y a su elevada masa atómica, lo que hace que su empaquetamiento atómico por unidad de volumen sea extremadamente eficiente. Por ejemplo, la densidad de la aleación W-90Ni-7Fe-3 puede alcanzar los 18,5 g/cm<sup>3</sup>, muy superior a la del acero (7,85 g/cm<sup>3</sup>), el aluminio (2,7 g/cm<sup>3</sup>) y el plomo (11,34 g/cm<sup>3</sup>), y solo ligeramente inferior a la del tungsteno puro. Esta característica la hace irremplazable en aplicaciones que requieren un tamaño pequeño y alta calidad, como contrapesos de aviación o núcleos perforantes. Aunque el punto de fusión de la aleación pesada de tungsteno es inferior al del tungsteno puro debido a la adición de elementos, se mantiene entre 2500 y 3000 °C. Por ejemplo, el punto de fusión de la aleación W-95Ni-Fe es de aproximadamente 2800 °C, que es mucho más alto que el acero (~1500 °C) y el plomo (327 °C), lo que lo hace excelente en entornos de alta temperatura.

En términos de propiedades mecánicas, las aleaciones pesadas de tungsteno tienen alta resistencia y tenacidad moderada. Su resistencia a la tracción está generalmente entre 700-1200 MPa, dependiendo de la composición y el proceso. Por ejemplo, la resistencia a la tracción de la aleación W-90Ni-7Fe-3 puede alcanzar 1000 MPa, mientras que la de la aleación W-95Ni-Cu puede ser ligeramente menor, alrededor de 800 MPa. Su dureza (dureza Vickers, HV) varía de 300-500 HV, que es menor que el tungsteno puro (350-650 HV) pero mucho mayor que el plomo (~5 HV). En comparación con la fragilidad del tungsteno puro (elongación <1%), la ductilidad de las aleaciones de tungsteno de alta densidad mejora significativamente, con una elongación del 10%-30%, gracias al efecto plástico de la fase de unión (como Ni-Fe). Por ejemplo, la aleación W-93Ni-Fe puede presentar un 20% de elongación en pruebas de tracción, lo que la hace menos susceptible a la fractura bajo cargas dinámicas como el impacto de una explosión. Además, su resistencia al desgaste y a la fatiga también son excelentes, con una tasa de desgaste entre un 30% y un 50% menor que la del acero, lo que le confiere una larga vida útil en herramientas de corte y equipos de perforación.

Las propiedades térmicas y eléctricas son otro aspecto importante de las aleaciones de tungsteno de alta densidad. Su conductividad térmica varía de 80 a 150 W/(m·K), que es inferior a la del tungsteno puro (173 W/(m·K)) y el cobre (400 W/(m·K)), pero superior a la del acero (~50 W/(m·K)). Por ejemplo, la conductividad térmica de la aleación W-80Cu puede alcanzar los 140 W/(m·K), que es adecuada para su uso como disipador de calor en dispositivos electrónicos. Su resistividad es de aproximadamente 5,5 a 7,0  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ , que es ligeramente superior a la del cobre (1,68  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) y al tungsteno puro (5,5  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ), pero sigue teniendo buena conductividad y es adecuada para materiales de electrodos. Particularmente sobresaliente es su capacidad de blindaje contra la radiación. El alto número atómico del tungsteno (Z=74) y su densidad lo hacen extremadamente eficiente en la absorción de rayos X y rayos gamma. Por ejemplo, la aleación W-95Ni-Fe con un espesor de solo 1 cm puede proteger aproximadamente el 90% de los rayos gamma, superando ampliamente al plomo del mismo espesor (alrededor del 70%), y no es tóxica, lo que la convierte en un material preferido para las industrias médica y nuclear.

En términos de resistencia a la corrosión, el tungsteno posee una estabilidad extremadamente alta frente a ácidos, álcalis y oxígeno a temperatura ambiente, y apenas reacciona con ácidos clorhídricos y

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

sulfúricos, disolviéndose lentamente en medios oxidantes fuertes (como el ácido nítrico concentrado). Las aleaciones pesadas de tungsteno heredan esta propiedad, pero su resistencia a la corrosión disminuye ligeramente tras la adición de níquel y hierro. Por ejemplo, la pérdida de masa de la aleación W-Ni-Fe es inferior al 0,5 % tras 100 horas de inmersión en ácido clorhídrico, pero puede alcanzar el 2-3 % en ácido nítrico. Por el contrario, la aleación W-Cu muestra una mejor tolerancia a la humedad y al agua de mar gracias a la presencia de cobre, y su tasa de corrosión en el entorno marino es solo una décima parte de la del acero. Estas características permiten que las aleaciones pesadas de tungsteno se mantengan estables en diversos entornos químicos.

Para demostrar intuitivamente su rendimiento, la siguiente tabla compara los principales parámetros de la aleación de tungsteno de alta gravedad específica con el acero, el plomo y el tungsteno puro:

Parámetros de rendimiento	Aleación pesada de tungsteno	Acero (acero al carbono simple)	dirigir	Tungsteno puro
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	17.0-19.3	7.85	11.34	19.25
Punto de fusión (°C)	2500-3000	~1500	327	3422
a la tracción ( MPa)	700-1200	400-1000	~15	900-1500
Dureza (HV)	300-500	120-250	~5	350-650
Alargamiento ( %)	10-30	20-40	>50	<1
Conductividad térmica (W/(m·K))	80-150	~50	35	173
Resistividad (μΩ·cm)	5.5-7.0	~15	20	5.5
Resistencia a la corrosión	Bueno (ambiente no oxidante)	Medio (fácil de oxidar)	Bueno (resistente al ácido)	Excelente
Capacidad de protección contra la radiación	Excelente	Pobre	bien	Excelente

Nota: Los datos de la tabla son rangos típicos y los valores específicos pueden variar según los ingredientes y los procesos.

### Desarrollo histórico de las aleaciones pesadas de tungsteno

Las aleaciones de tungsteno de alta densidad son un largo proceso desde su descubrimiento básico hasta su aplicación industrial y, posteriormente, la innovación tecnológica, lo que refleja la búsqueda continua de materiales de alto rendimiento por parte de la humanidad. El descubrimiento del tungsteno comenzó a finales del siglo XVIII. En 1781, el químico sueco Carl Wilhelm Scheele especuló sobre la existencia del tungsteno mediante la descomposición del tungstato (CaWO<sub>4</sub> ). Posteriormente, en 1783, los hermanos españoles Juan José y Fausto Eljuar trajeron por primera vez tungsteno metálico mediante la reducción del óxido de tungsteno (WO<sub>3</sub> ). Lo llamaron "wolframio" (del alemán "espuma de lobo") porque su mineral suele estar asociado con el estaño y se produce espuma durante la fundición. Sin embargo,

Debido a la atrasada tecnología metalúrgica de los primeros tiempos, el tungsteno existía en forma de polvo o compuestos y no podía procesarse en materiales a granel, lo que limitaba su aplicación.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En el siglo XIX, con el avance de la Revolución Industrial, el uso del tungsteno se expandió gradualmente. En 1847, el científico británico Robert Oxland desarrolló un método para preparar tungstato de sodio, sentando las bases para la producción industrial de tungsteno. A finales del siglo XIX, la aparición de los hornos de arco eléctrico y la tecnología de la pulvimetallurgia posibilitó el procesamiento del tungsteno. En 1904, la General Electric Company de Estados Unidos utilizó por primera vez filamento de tungsteno en bombillas incandescentes para reemplazar los filamentos de carbono, lo que prolongó significativamente la vida útil de las bombillas gracias a su alto punto de fusión y durabilidad. Este avance marcó la transición del tungsteno del laboratorio a la industria, pero la fragilidad del tungsteno puro aún dificultaba su uso en aplicaciones más complejas.

Las aleaciones de tungsteno de alta densidad aparecieron a principios del siglo XX, impulsadas por las necesidades militares. Durante la Primera Guerra Mundial (1914-1918), el tungsteno se utilizó para fabricar herramientas de corte y acero para blindaje (como el "acero de tungsteno" alemán) debido a su alta dureza. Sin embargo, la dificultad de procesar el tungsteno puro impulsó a los científicos a explorar nuevas vías de aleación. En la década de 1930, los metalúrgicos alemanes intentaron por primera vez mezclar tungsteno con níquel y hierro para preparar aleaciones a base de tungsteno mediante pulvimetallurgia. La fórmula típica de este período es W-90Ni-10, con una densidad de aproximadamente 17 g/cm<sup>3</sup>, una dureza de aproximadamente 300 HV y una tenacidad significativamente mejorada en comparación con el tungsteno puro. La Segunda Guerra Mundial (1939-1945) marcó un punto de inflexión en el desarrollo de aleaciones pesadas de tungsteno. En la década de 1940, el ejército estadounidense desarrolló la aleación W-90Ni-7Fe-3 para el núcleo perforante del tanque M1. Su densidad (18,5 g/cm<sup>3</sup>) y capacidad de penetración superaban con creces la del núcleo de acero de la época, lo que mejoraba significativamente su poder destructivo contra los blindados alemanes. La tecnología de este período se basaba principalmente en el prensado y la sinterización a alta temperatura. Aunque el proceso era sencillo, sentó las bases para las aleaciones modernas de tungsteno de alta densidad.

Después de la guerra, la carrera armamentista y la industrialización civil durante la Guerra Fría promovieron un mayor desarrollo de aleaciones de tungsteno de alta densidad. En las décadas de 1950 y 1960, el campo aeroespacial comenzó a aprovechar su alta densidad, como los contrapesos del giroscopio del caza estadounidense F-15 y los bloques de equilibrio de los primeros satélites de la NASA, con un requisito de densidad de más de 18 g/cm<sup>3</sup>. Durante el mismo período, el campo médico descubrió su potencial de blindaje contra la radiación. A finales de la década de 1950, la aleación W-95Ni-Fe comenzó a usarse en componentes de blindaje de máquinas de rayos X, reemplazando gradualmente al plomo. En la década de 1970, la madurez de la tecnología de sinterización en fase líquida aumentó la densidad de las aleaciones del 95% a más del 99%. Por ejemplo, la porosidad de la aleación W-93Ni-Fe se redujo a menos del 0,5% y la consistencia del rendimiento mejoró significativamente, lo que promovió la producción a gran escala.

Al entrar en el siglo XXI, la investigación y el desarrollo de aleaciones de tungsteno de alta densidad se orientaron hacia la optimización del rendimiento y la protección del medio ambiente. Después del año 2000, se introdujo la nanotecnología en la preparación del polvo de tungsteno, reduciendo el tamaño del grano de micrones a 50-100 nm, lo que incrementó la resistencia a la tracción de la aleación W-95Ni-Fe.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

de 1000 MPa a 1200 MPa. El auge de la tecnología de impresión 3D (como la sinterización selectiva por láser) ha permitido la fabricación de piezas de aleación de tungsteno con formas complejas, como contrapesos con formas especiales en la industria aeroespacial. Además, debido a la preocupación por la toxicidad del plomo, la aleación W-90Ni-Cu se ha promocionado en el sector civil (como plomadas de pesca y pesas para palos de golf), y su cuota de mercado ha aumentado del 5 % en 2000 a más del 30 % en 2020. Actualmente, la investigación sobre aleaciones de tungsteno de alta densidad se centra en el diseño asistido por IA y su combinación con aleaciones de alta entropía. Su desarrollo histórico no solo es testigo del progreso tecnológico, sino que también refleja la estrecha interacción entre la ciencia de los materiales y las necesidades sociales.

### 2.3 Comparación entre la aleación de tungsteno de alta gravedad específica y otros materiales

Las aleaciones de tungsteno de alta densidad se distinguen entre muchos materiales, pero sus ventajas y limitaciones deben comprenderse mediante una comparación detallada con otros materiales. A continuación, se presenta un análisis sistemático de las aleaciones de tungsteno de alta densidad con acero (acero al carbono común), plomo, aleación de titanio (Ti-6Al-4V) y tungsteno puro desde seis dimensiones: densidad, propiedades mecánicas, propiedades térmicas, resistencia a la corrosión, procesabilidad y coste.

**La densidad** es la principal ventaja de las aleaciones de tungsteno de alta densidad, que oscila entre 17,0 y 19,3 g/cm<sup>3</sup>, cercana a la del tungsteno puro (19,25 g/cm<sup>3</sup>) y muy superior a la del acero (7,85 g/cm<sup>3</sup>), la aleación de titanio (4,51 g/cm<sup>3</sup>) y el plomo (11,34 g/cm<sup>3</sup>). Por ejemplo, la densidad de la aleación W-95Ni-Fe es de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, mientras que el mismo volumen de acero representa solo el 40 % de su peso. Esto la hace irremplazable en escenarios que requieren gran peso y pequeño volumen, como contrapesos de aviación y núcleos perforantes. Mientras que las aleaciones de acero y titanio son más adecuadas para diseños ligeros, el plomo es limitado debido a su toxicidad.

**Propiedades mecánicas**, la resistencia a la tracción de las aleaciones de tungsteno de alta densidad (700-1200 MPa) está en el mismo orden de magnitud que el acero (400-1000 MPa) y las aleaciones de titanio (alrededor de 1100 MPa), pero mucho mayor que el plomo (~15 MPa) y ligeramente menor que el tungsteno puro (900-1500 MPa). La dureza (300-500 HV) también es mejor que el acero (120-250 HV) y el plomo (~5 HV), pero menor que el tungsteno puro (350-650 HV). Su elongación (10%-30%) es significativamente mejor que el tungsteno puro (<1%), y cercana al acero (20%-40%) y la aleación de titanio (10%-15%), compensando la fragilidad del tungsteno puro. Por ejemplo, la aleación W-90Ni-Fe puede soportar 50 J/cm<sup>2</sup> de energía en una prueba de impacto, mientras que el tungsteno puro solo soporta 5 J/cm<sup>2</sup>. Este equilibrio entre resistencia y tenacidad lo hace más fiable bajo cargas dinámicas, mientras que la baja resistencia del plomo limita sus aplicaciones estructurales.

**Propiedades térmicas**, La conductividad térmica de la aleación pesada de tungsteno (80-150 W/(m·K)) es menor que la del tungsteno puro (173 W/(m·K)) y el cobre (400 W/(m·K)), pero mayor que la del acero (~50 W/(m·K)) y el plomo (35 W/(m·K)). Su punto de fusión (2500-3000 °C) es mucho más alto que el del acero (~1500 °C), el plomo (327 °C) y la aleación de titanio (~1660 °C), solo superado por el tungsteno puro (3422 °C). Por ejemplo, la conductividad térmica de la aleación W-80Cu es de 140

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W/(m·K), que es adecuada para aplicaciones de disipación de calor, mientras que el acero se ablanda fácilmente a altas temperaturas y el plomo se funde por completo.

**Resistencia a la corrosión** : la aleación de tungsteno de alta densidad ofrece un buen rendimiento en entornos no oxidantes. Por ejemplo, tras sumergirse en ácido clorhídrico al 10 % durante 1000 horas, la tasa de pérdida de masa es inferior al 1 %, superior a la del acero (fácil de oxidar, con una tasa de pérdida de aproximadamente el 20 %) y el plomo (resistente a ácidos, pero no a álcalis, con una tasa de pérdida de aproximadamente el 5 %). La aleación de titanio (excelente resistencia a la corrosión, con una tasa de pérdida <0,1 %) y el tungsteno puro (casi nula corrosión) son ligeramente mejores, pero la aleación W-Cu ofrece un buen rendimiento en agua de mar, con una tasa de corrosión de tan solo 1/15 de la del acero, lo que la hace adecuada para la ingeniería marina.

**La maquinabilidad** es una mejora clave en las aleaciones pesadas de tungsteno. El tungsteno puro presenta alta dureza y fragilidad, por lo que requiere forjado a alta temperatura o herramientas especiales para su procesamiento, lo cual resulta costoso. Las aleaciones pesadas de tungsteno se optimizan mediante fases de unión (como Ni-Fe) y pueden procesarse mediante torneado y fresado. La dificultad de procesamiento es similar a la del acero (fácil de cortar), pero aún mayor que la de las aleaciones de titanio (media) y el plomo (muy fácil de procesar). Por ejemplo, la velocidad de corte de la aleación W-90Ni-Fe puede alcanzar los 50 m/min, mientras que la del tungsteno puro es de tan solo 10 m/min.

**El costo de las aleaciones de tungsteno de alta densidad es de aproximadamente \$30,000 a \$50,000 por tonelada**, mucho más alto que el acero (~\$500/tonelada) y el plomo (~\$2,000/tonelada), comparable a las aleaciones de titanio (~\$30,000/tonelada), pero más bajo que el tungsteno puro (~\$60,000/tonelada), debido al hecho de que el tungsteno es un metal raro (las reservas mundiales son de aproximadamente 3.5 millones de toneladas, principalmente concentradas en China) y el proceso es complejo (metalurgia de polvos, sinterización). Esto lo hace más económico en campos de alto valor agregado (como la aviación y la medicina), pero puede ser reemplazado por acero en aplicaciones de gama baja.

En general, la aleación de tungsteno de alta densidad es única por sus características integrales de densidad, resistencia, tenacidad, resistencia a la corrosión y procesabilidad. Compensa la fragilidad del tungsteno puro y la toxicidad del plomo, supera las limitaciones del acero y las aleaciones de titanio en entornos de alta densidad y proporciona una base sólida para el diseño de procesos y la selección de aplicaciones posteriores.

### Clasificación de las aleaciones pesadas de tungsteno

de alta densidad (HDTA) son un tipo de aleación cuyo componente principal es el tungsteno (W), con un contenido general del 85% al 97%. Gracias a su alta densidad, excelentes propiedades mecánicas y buena resistencia a la corrosión, se utilizan ampliamente en los sectores militar, aeroespacial, médico, electrónico e industrial. Según diferentes métodos de clasificación, las aleaciones de tungsteno de alta densidad se pueden clasificar en las siguientes categorías:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 2.4.1 Clasificación según ingredientes

alta densidad está compuesta por tungsteno, al que se le añaden níquel (Ni), hierro (Fe), cobre (Cu), cobalto (Co) y otros elementos según las necesidades para optimizar su rendimiento. Según la diferencia de elementos secundarios en la aleación, se puede dividir principalmente en las siguientes categorías:

##### (1) Aleación W-Ni-Fe

**Características de la composición :** Generalmente contiene entre 90% y 97% de tungsteno y la relación entre níquel y hierro es de aproximadamente 7:3 u 8:2.

**Ventajas de rendimiento :** buena ductilidad, alta resistencia y dureza y alta permeabilidad magnética.

**Aplicaciones principales :** Ampliamente utilizado en la industria militar (núcleo perforante), aeroespacial (contrapeso), contrapeso industrial (contrapeso de giroscopio).

##### (2) Aleación W-Ni-Cu

**Características de la composición :** El contenido de tungsteno suele ser del 90% ~ 95% y la relación de níquel a cobre suele ser cercana a 7: 3.

**Ventajas de rendimiento :** en comparación con la aleación W-Ni-Fe, la aleación W-Ni-Cu tiene una permeabilidad magnética menor, casi ningún magnetismo y buena resistencia a la corrosión.

**Principales aplicaciones :** Se utiliza en protección contra radiaciones médicas (protección contra rayos X), en embalajes electrónicos y en áreas sensibles al magnetismo.

##### (3) Aleación W-Ni-Fe-Co

**Características de la composición :** Se agrega cobalto (Co) a la base W-Ni-Fe para mejorar la resistencia y la resistencia al desgaste.

**Ventajas de rendimiento :** mayor resistencia y dureza que la aleación W-Ni-Fe y tiene cierta estabilidad a altas temperaturas.

**Aplicaciones principales :** Se utiliza para materiales estructurales de alta temperatura, como componentes de motores aeroespaciales, herramientas de corte resistentes al desgaste, etc.

##### (4) Otras aleaciones especiales

**Aleación W-Cu :** se utiliza principalmente para aplicaciones de alta conductividad térmica y alta conductividad eléctrica, como materiales de electrodos.

**W-Re (tungsteno -renio) Aleación :** tiene un mejor rendimiento a altas temperaturas y se utiliza a menudo en el campo aeroespacial.

#### 2.4.2 Clasificación basada en densidad y propiedades mecánicas (Clase 1 ~ Clase 4)

Según las normas **ASTM B777** y **MIL-T-21014** , las aleaciones pesadas de tungsteno se dividen en cuatro grados (de Clase 1 a Clase 4) según su densidad y propiedades mecánicas. Los diferentes grados de aleación son adecuados para diferentes aplicaciones:

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

calificación	Contenido de tungsteno (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite elástico (MPa)	Alargamiento (%)	Permeabilidad magnética	Aplicaciones típicas
Clase 1	90	17.0	≥ 758	≥ 517	≥ 5	> 1.05	Contrapeso de aviación, contrapeso industrial
Clase 2	92.5	17.5	≥ 758	≥ 517	≥ 5	> 1.05	Armadura militar, núcleo perforante
Clase 3	95	18.0	≥ 724	≥ 517	≥ 3	> 1.05	Protección contra rayos X, blindaje contra la radiación nuclear
Clase 4	97	18.5	≥ 689	≥ 517	≥ 2	> 1.05	Protección radiológica médica, embalaje electrónico

**Clase 1 y Clase 2** : Mayor resistencia y mejor tenacidad, adecuado para aplicaciones como contrapesos aeroespaciales, militares e industriales.

**Clase 3 y Clase 4** : Mayor densidad, generalmente se utiliza en protección radiológica, industria nuclear y campos de contrapesos de alta precisión.

#### 2.4.3 Clasificación basada en el uso

Según la aplicación de la aleación de tungsteno de alta gravedad específica en diferentes campos, se puede dividir en las siguientes categorías:

##### (1) Industria militar

Se utiliza principalmente para **núcleos perforantes de blindaje** (como APFSDS, un sustituto de los proyectiles de uranio empobrecido), **blindaje protector**, **fragmentos metálicos explosivos**, etc.

Requisitos: alta densidad, alta dureza, alta resistencia al impacto.

Materiales principales: W-Ni-Fe, W-Ni-Fe-Co.

##### (2) Aeroespacial

**contrapesos** de aeronaves y naves espaciales . **contrapesos de giroscopio inercial** , **componentes de alta temperatura del motor** , etc.

Requisitos: alta densidad, resistencia a altas temperaturas y resistencia a la oxidación.

Materiales principales: W-Ni-Fe, W-Ni-Fe-Co, W-Re.

##### (3) Campo médico

###### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

Se utiliza principalmente para **materiales de protección contra rayos X, protección contra radioterapia** (como bloques de protección contra rayos gamma), **contenedores de transporte de medicamentos radiactivos** , etc.

Requisitos: alta densidad, no magnético, no tóxico, resistente a la corrosión.

Materiales principales: W-Ni-Cu, W-Ni-Cu-Co.

#### **(4) Campos industriales y civiles**

Se utiliza principalmente en **contrapesos de precisión** (péndulos, giroscopios, **contrapesos de carreras** ) . **herramientas de perforación petrolera , materiales de electrodos , etc.**

Requisitos: alta densidad, resistencia al desgaste, buena maquinabilidad.

Materiales principales: W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, W-Cu.

#### **(5) Campos de la electrónica y los semiconductores**

Se utiliza principalmente en **materiales de embalaje electrónico** . **disipadores de calor de semiconductores de alta potencia y materiales de interconexión microelectrónica** .

Requisitos: alta conductividad térmica, baja expansión térmica, no magnético.

Materiales principales: W-Cu, W-Ag ( aleación de plata y tungsteno ) .

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版

[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

电话/TEL: 0086 592 512 9696

CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V

[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

**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/cm<sup>3</sup>), 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



### Capítulo 3: Análisis del rendimiento de aleaciones de tungsteno de alto peso

#### 3.1 Propiedades mecánicas de la aleación pesada de tungsteno

Las propiedades mecánicas de las aleaciones de tungsteno de alta densidad son los factores clave que las hacen populares en aplicaciones de ingeniería, cubriendo resistencia, dureza, tenacidad, resistencia al desgaste, resistencia a la fatiga, etc. El excelente desempeño de estas propiedades se debe a la alta dureza del tungsteno y al efecto sinérgico de los elementos agregados, lo que hace que funcione bien bajo cargas estáticas y dinámicas.

**La resistencia a la tracción y el límite elástico** son indicadores fundamentales de las propiedades mecánicas. La resistencia a la tracción de las aleaciones pesadas de tungsteno suele estar entre 700 y 1200 MPa, y el límite elástico es de aproximadamente 500 a 1000 MPa. Los valores específicos varían según la composición y el proceso. Por ejemplo, la resistencia a la tracción de la aleación W-90Ni-7Fe-3 (90 % de contenido de tungsteno, relación níquel-hierro de 7:3) puede alcanzar los 1050 MPa y el límite elástico es de aproximadamente 850 MPa, mientras que la resistencia a la tracción de la aleación W-95Ni-Cu (95 % de contenido de tungsteno, relación níquel-cobre) es de aproximadamente 800 MPa. Este nivel de resistencia es comparable al del acero de alta resistencia (como el AISI 4340, de aproximadamente 1000 MPa), pero supera con creces el límite del plomo (~15 MPa) y el tungsteno puro antes de la fractura frágil (900-1500 MPa). La fuente de su alta resistencia reside en la alta dureza de las partículas de tungsteno y en el efecto fortalecedor de la fase de unión (como Ni-Fe), que absorbe energía durante la tensión y retrasa la propagación de grietas.

**La dureza** es otra característica significativa de las aleaciones pesadas de tungsteno, con una dureza Vickers (HV) que oscila entre 300 y 500 HV. Por ejemplo, la dureza de la aleación W-93Ni-Fe es de

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

aproximadamente 450 HV, que es cercana a la de algunos aceros para herramientas (como el H13, de aproximadamente 400 a 500 HV), pero inferior a la del tungsteno puro (350 a 650 HV). La distribución de la dureza se correlaciona positivamente con el contenido de tungsteno. A mayor contenido de tungsteno, mayor dureza. Sin embargo, la adición de la fase aglutinante reduce ligeramente la dureza y mejora la resistencia al impacto. Por ejemplo, en la prueba de dureza Brinell (HB), la aleación W-95Ni-Fe puede alcanzar 400 HB, mientras que el tungsteno puro es frágil y no puede soportar pruebas de carga elevada.

**La tenacidad** es la principal ventaja de las aleaciones de tungsteno de alta densidad en comparación con el tungsteno puro, lo que se manifiesta en una mayor elongación y tenacidad a la fractura. Su elongación varía del 10% al 30%, mucho mayor que la del tungsteno puro (<1%). Por ejemplo, la elongación de la aleación W-90Ni-Fe puede alcanzar el 25% a temperatura ambiente y se mantiene por encima del 15% a -50 °C, mostrando una buena tenacidad a baja temperatura. La tenacidad a la fractura ( $K_{IC}$ ) suele estar entre 20 y 40 MPa·m<sup>0.5</sup>. Por ejemplo, la  $K_{IC}$  de la aleación W-93Ni-Fe es de aproximadamente 30 MPa·m<sup>0.5</sup>, similar a la del acero de baja aleación (aproximadamente 40 MPa·m<sup>0.5</sup>), mientras que el tungsteno puro es de tan solo 5-10 MPa·m<sup>0.5</sup>. Esta tenacidad se beneficia de la capacidad de deformación plástica de la fase de unión, que absorbe energía cuando se concentra la tensión para evitar la fractura frágil.

**La resistencia al desgaste** está estrechamente relacionada con la dureza de las aleaciones de tungsteno de alta densidad. En pruebas de desgaste (como la prueba de desgaste de muelas ASTM G65), la tasa de pérdida de volumen de la aleación W-95Ni-Fe es de aproximadamente 0,05 mm<sup>3</sup>/N·m, aproximadamente un 70 % menor que la del acero (0,15 mm<sup>3</sup>/N·m) y similar a la del carburo cementado (como el WC-Co, 0,02 mm<sup>3</sup>/N·m). Su resistencia al desgaste la convierte en un material ideal para herramientas de perforación y corte. Por ejemplo, en la perforación petrolera, la vida útil de las brocas de aleación de tungsteno puede llegar a ser de dos a tres veces mayor que la de las brocas de acero.

**La resistencia a la fatiga** es especialmente importante en aplicaciones dinámicas. El límite de fatiga ( $10^7$  ciclos) de las aleaciones de tungsteno de alta densidad es de aproximadamente 400-600 MPa. Por ejemplo, la resistencia a la fatiga de la aleación W-90Ni-Fe bajo tensión alterna es de 500 MPa, superior a la del plomo (prácticamente nula) y al tungsteno puro (no se puede evaluar debido a su fragilidad), y comparable al acero (aproximadamente 400 MPa). Esta propiedad lo convierte en un material excelente para piezas de supresión de vibraciones y contrapesos de armas de fuego, capaz de soportar cargas cíclicas prolongadas sin fallar.

### 3.2 Propiedades físicas de la aleación de tungsteno de alta densidad

Las propiedades físicas de la aleación de tungsteno de alta densidad incluyen densidad, propiedades térmicas, propiedades eléctricas y propiedades acústicas, que afectan directamente su aplicabilidad en un entorno específico.

**La densidad** es la propiedad física más importante de las aleaciones pesadas de tungsteno, con valores que oscilan entre 17,0 y 19,3 g/cm<sup>3</sup>. Por ejemplo, la densidad de la aleación W-97Ni-Fe puede alcanzar

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

los 19,0 g/cm<sup>3</sup>, ligeramente inferior a la del tungsteno puro (19,25 g/cm<sup>3</sup>), mientras que la del W-85Cu ronda los 17,0 g/cm<sup>3</sup>. Esta alta densidad se debe a la estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC) y a su elevada masa atómica (183,84 u), lo que le permite almacenar mayor masa por unidad de volumen. Por ejemplo, un centímetro cúbico de aleación W-95Ni-Fe pesa aproximadamente 18,5 g, mientras que el mismo volumen de acero pesa tan solo 7,85 g. Esta característica le confiere una ventaja insustituible en contrapesos de aviación y blindaje radiológico.

**Las propiedades térmicas** incluyen el punto de fusión, la conductividad térmica y el coeficiente de expansión térmica. El punto de fusión de las aleaciones pesadas de tungsteno oscila entre 2500 y 3000 °C, inferior al del tungsteno puro (3422 °C), pero muy superior al del acero (~1500 °C). Por ejemplo, el punto de fusión de la aleación W-90Ni-Fe es de aproximadamente 2850 °C, lo que le permite soportar las altas temperaturas de las toberas de cohetes. Su conductividad térmica es de 80-150 W/(m·K); por ejemplo, la aleación W-80Cu puede alcanzar los 140 W/(m·K), inferior al tungsteno puro (173 W/(m·K)), pero superior al del acero (50 W/(m·K)), lo que la hace adecuada para aplicaciones de disipación de calor. El coeficiente de expansión térmica es de aproximadamente  $4,5-6,0 \times 10^{-6}$  /K, que es cercano al tungsteno puro ( $4,5 \times 10^{-6}$  /K) y mucho más bajo que el acero ( $12 \times 10^{-6}$  /K), y tiene mejor estabilidad dimensional cuando cambia la temperatura.

**En cuanto a las propiedades eléctricas**, la resistividad de las aleaciones pesadas de tungsteno se encuentra entre 5,5 y 7,0  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ , como 6,0  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$  para la aleación W-90Ni-Fe, ligeramente superior a la del tungsteno puro (5,5  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) y el cobre (1,68  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ), pero inferior a la del acero (15  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ). Aunque su conductividad no es tan buena como la del cobre, sigue siendo competitivo entre los materiales de electrodos. Además, su alto punto de fusión y alta densidad le confieren un buen rendimiento en electrodos de mecanizado por electrochispa (EDM). Por ejemplo, la vida útil de los electrodos W-70Cu es aproximadamente un 50 % mayor que la de los electrodos de cobre.

**Las propiedades acústicas** son menos preocupantes, pero son cruciales en algunas aplicaciones como la supresión de vibraciones. La velocidad del sonido de las aleaciones pesadas de tungsteno es de aproximadamente 4300-4500 m/s, como los 4400 m/s de la aleación W-95Ni-Fe, que es inferior a la del acero (aproximadamente 5000 m/s) pero superior a la del plomo (1200 m/s). Su alta densidad y alto módulo elástico (aproximadamente 400 GPa) hacen que su decaimiento sea más rápido en la transmisión de ondas sonoras, lo que lo hace adecuado para su uso como material de amortiguación de vibraciones. Por ejemplo, en contrapesos de máquinas herramienta, las aleaciones de tungsteno pueden reducir la amplitud de la vibración entre un 30 % y un 40 %.

### 3.3 Elementos principales y sus funciones de la aleación de tungsteno de alta gravedad específica

Las aleaciones de tungsteno de alta densidad (HDTA) son un tipo de material de aleación cuyo componente principal es el tungsteno (W), que suele contener entre un 85 % y un 97 % de tungsteno, y al que se le añade níquel (Ni), hierro (Fe), cobre (Cu), cobalto (Co) y otros elementos para mejorar sus propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, conductividad y otras propiedades. Estas aleaciones

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

se utilizan ampliamente en los sectores militar, aeroespacial, médico, electrónico e industrial gracias a su alta densidad, alta resistencia y excelentes propiedades integrales.

## 1. Tungsteno (W): proporciona alta densidad y resistencia.

### (1) Características básicas

- **Símbolo del elemento** : W
- **Número atómico** : 74
- **Densidad** : 19,3 g/cm<sup>3</sup>
- **Punto de fusión** : 3410°C
- **Función principal** : dar a la aleación de tungsteno de alta gravedad específica una densidad, dureza y resistencia extremadamente altas.

### (2) Función en la aleación de tungsteno de alta gravedad específica

- Como **elemento a granel**, proporciona una alta densidad (16,5~18,5 g/cm<sup>3</sup>), lo que permite que la aleación funcione en aplicaciones tales como contrapesos de alta masa, blindaje contra la radiación y núcleos de proyectiles perforantes.
- Debido a su alto punto de fusión y resistencia al desgaste, se mejora la estabilidad de la aleación en entornos de alta temperatura.
- La buena resistencia a la corrosión permite utilizar la aleación en entornos extremos.
- Sin embargo, el tungsteno en sí es frágil, por lo que es necesario agregar otros elementos metálicos para mejorar la maquinabilidad y la ductilidad de la aleación.

## 2. Níquel (Ni): mejora la ductilidad y la resistencia a la corrosión.

### (1) Características básicas

- **Símbolo del elemento** : Ni
- **Número atómico** : 28
- **Densidad** : 8,9 g/cm<sup>3</sup>
- **Punto de fusión** : 1455°C
- **Función principal** : dar a la aleación buena ductilidad y mejorar su resistencia a la corrosión.

### (2) Función en la aleación de tungsteno de alta gravedad específica

- Como **elemento de la fase aglutinante**, el níquel puede promover la distribución uniforme de las partículas de tungsteno y mejorar la plasticidad y la maquinabilidad de la aleación.
- Mejorar la ductilidad de la aleación para que pueda soportar mayores deformaciones sin fractura frágil.
- Le otorga a la aleación una fuerte resistencia a la corrosión, lo que le permite usarse durante mucho tiempo en un ambiente húmedo o ácido.
- Durante el proceso de sinterización en fase líquida, ayuda a reducir la temperatura de sinterización y aumentar la densidad de la aleación.
- Generalmente se utiliza en combinación con hierro (Fe) o cobre (Cu) para ajustar las propiedades magnéticas y mecánicas de la aleación.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Hierro (Fe): Mejora la resistencia mecánica de la aleación.

#### (1) Características básicas

- **Símbolo del elemento** : Fe
- **Número atómico** : 26
- **Densidad** : 7,87 g/cm<sup>3</sup>
- **Punto de fusión** : 1538°C
- **Función principal** : Mejorar la resistencia y dureza de la aleación, a la vez que le confiere cierto grado de magnetismo.

#### (2) Función en la aleación de tungsteno de alta gravedad específica

- Como fase de refuerzo, el hierro y el níquel juntos forman una **aleación ternaria W-Ni-Fe** , que mejora la resistencia mecánica y la dureza de la aleación.
- Aumenta la resistencia al desgaste de la aleación, permitiéndole soportar altas cargas y altas fuerzas de impacto.
- Esto le da a la aleación **un cierto grado de magnetismo** , haciéndola adecuada para ciertas aplicaciones militares e industriales.
- Durante el proceso de sinterización en fase líquida, ayuda a mejorar la fluidez de la fase de unión y a aumentar la densidad de la aleación.
- Las aleaciones W-Ni-Fe se utilizan comúnmente en aplicaciones como **núcleos perforantes, contrapesos aeroespaciales y moldes industriales** .

### 4. Cobre (Cu): reduce el magnetismo y mejora la conductividad.

#### (1) Características básicas

- **Símbolo del elemento** : Cu
- **Número atómico** : 29
- **Densidad** : 8,96 g/cm<sup>3</sup>
- **Punto de fusión** : 1084,6 °C
- **Función principal** : hacer que la aleación sea no magnética y mejorar su conductividad y resistencia a la corrosión.

#### (2) Función en la aleación de tungsteno de alta gravedad específica

- Sustituto del hierro (Fe) para fabricar **una aleación de tungsteno no magnética (W-Ni-Cu)** , adecuada para aplicaciones sensibles al magnetismo (como dispositivos médicos, componentes electrónicos).
- Mejora la conductividad de la aleación, haciéndola adecuada para materiales de electrodos, envases electrónicos y otros campos.
- Mejorar aún más la resistencia a la corrosión, de modo que la aleación tenga una vida útil más larga en ambientes húmedos o medios ácidos.
- Reduce la dureza de la aleación, facilitando su mecanizado.
- Las aleaciones W-Ni-Cu se utilizan comúnmente en **blindaje contra rayos X y rayos gamma, equipos médicos, empaquetado electrónico** , etc.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5. Cobalto (Co): mejora la resistencia al desgaste y a las altas temperaturas.

### (1) Características básicas

- **Símbolo del elemento** : Co
- **Número atómico** : 27
- **Densidad** : 8,90 g/cm<sup>3</sup>
- **Punto de fusión** : 1495°C
- **Funciones principales** : Mejora la resistencia al desgaste, la resistencia a altas temperaturas y mejora la resistencia de la aleación.

### (2) Papel en aleaciones de tungsteno de alta densidad

- Como elemento de refuerzo, el cobalto puede **mejorar la resistencia al desgaste de la aleación** y es adecuado para piezas resistentes al desgaste y sometidas a altas cargas.
- Proporciona **una resistencia mejorada a altas temperaturas**, lo que permite que la aleación mantenga la resistencia y la estabilidad en temperaturas extremas.
- Mejora la dureza de la aleación, haciéndola adecuada para entornos de alto impacto y alta carga, como núcleos perforantes, componentes de motores aeroespaciales, etc.
- La aleación W-Ni-Fe-Co tiene mayor resistencia y dureza que la aleación W-Ni-Fe común, pero el costo de fabricación es mayor.

Las propiedades de una aleación pesada de tungsteno se ven afectadas por sus elementos principales. Las funciones de cada elemento son las siguientes:

elemento	efecto	Impacto en las aleaciones
Tungsteno (W)	Alta densidad, alta resistencia.	Proporciona a la aleación alta densidad, alta resistencia y resistencia a la corrosión.
Níquel (Ni)	Ductilidad, resistencia a la corrosión	Aumentar la plasticidad, mejorar la resistencia a la corrosión y mejorar la procesabilidad.
Hierro (Fe)	Resistencia mecánica, dureza	Mejora la dureza y la resistencia de la aleación y la hace magnética.
Cobre (Cu)	No magnético, conductor	Reduce el magnetismo, mejora la conductividad y la resistencia a la corrosión.
Cobalto (Co)	Resistencia al desgaste, resistencia a altas temperaturas.	Mejora la resistencia al desgaste y la estabilidad a altas temperaturas.

### 3.4 Resistencia a la corrosión y al desgaste de aleaciones de tungsteno de alta gravedad específica

**La resistencia a la corrosión** es una propiedad importante de las aleaciones pesadas de tungsteno, especialmente en entornos químicos y marinos. El tungsteno es extremadamente estable a ácidos, álcalis y oxígeno a temperatura ambiente, y apenas reacciona con ácido clorhídrico y ácido sulfúrico, disolviéndose lentamente en ácido nítrico o ácido fluorhídrico concentrados. Las aleaciones pesadas de tungsteno heredan esta propiedad, pero cambia ligeramente debido a la adición de elementos. Por ejemplo, la tasa de pérdida de masa de la aleación W-90Ni-Fe es inferior al 0,5 % tras sumergirse en ácido clorhídrico al 10 % durante 1000 horas, y del 0,1 % al 0,2 % en agua de mar, mucho menor que la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del acero (aproximadamente un 20%). La aleación W-Cu es más resistente a la humedad y a la niebla salina debido a la presencia de cobre. En la prueba de niebla salina ASTM B117, la profundidad de corrosión después de 1000 horas es de tan solo 0,01 mm, mientras que la del acero puede alcanzar los 0,5 mm. Sin embargo, en un entorno de fuerte oxidación (como el ácido nítrico concentrado), la fase de unión Ni-Fe puede corroerse y la tasa de corrosión aumenta al 2%-3%, lo que debe mejorarse mediante un recubrimiento de superficie (como el enchapado de Ni).

**La resistencia al desgaste** está estrechamente relacionada con la dureza y la microestructura. La resistencia al desgaste de las aleaciones de tungsteno de alta densidad es excelente tanto en desgaste por deslizamiento como en desgaste abrasivo. Por ejemplo, en la prueba ASTM G65, la tasa de desgaste de la aleación W-95Ni-Fe es de aproximadamente  $0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , que es un 70% menor que la del acero ( $0,15 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ) y cercana al carburo cementado WC-Co ( $0,02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ). La fuente de su resistencia al desgaste radica en la alta dureza de las partículas de tungsteno (aproximadamente 1000 HV) y el soporte de tenacidad de la fase de unión. Por ejemplo, en la perforación petrolera, la vida útil de las brocas W-90Ni-Fe puede alcanzar 3 veces la de las brocas de acero, y la profundidad de desgaste es de solo 0,1 mm, mientras que la broca de acero puede alcanzar los 0,5 mm.

### 3.5 Capacidad de protección contra la radiación de la aleación pesada de tungsteno

La capacidad de blindaje contra la radiación de la aleación pesada de tungsteno es la base de su amplia aplicación en las industrias médica y nuclear. Se deriva del alto número atómico ( $Z = 74$ ) y la alta densidad ( $17,0\text{-}19,3 \text{ g/cm}^3$ ) del tungsteno. Su eficiencia de absorción de rayos X y rayos gamma es mucho mayor que la de los materiales tradicionales. Por ejemplo, la aleación W-95Ni-Fe de 1 cm de espesor puede blindar el 90% de los rayos gamma (energía 1 MeV), mientras que el mismo espesor del plomo es de solo el 70% y el acero es solo el 10%. Su capacidad de blindaje se calcula en función del coeficiente de absorción de masa ( $\mu/\rho$ ). El  $\mu/\rho$  de la aleación W-95Ni-Fe es de aproximadamente  $0,15 \text{ cm}^2/\text{g}$ , que es mayor que la del plomo ( $0,12 \text{ cm}^2/\text{g}$ ). En aplicaciones prácticas, un blindaje de aleación de tungsteno de 10 mm de espesor puede reducir la dosis de radiación de 100 mSv a 1 mSv, que es mejor que un plomo de 15 mm de espesor. Además, su no toxicidad lo convierte en una alternativa ecológica al plomo. Por ejemplo, en el blindaje de máquinas CT, el espesor de la aleación de tungsteno se puede reducir en un 30 % y el peso en un 20 %.

### 3.6 Métodos para optimizar el rendimiento de la aleación de tungsteno de alta densidad

La optimización del rendimiento de la aleación de tungsteno de alta densidad es la clave para mejorar su potencial de aplicación, lo que implica el ajuste de la composición, la mejora del proceso y la tecnología de posprocesamiento.

**La optimización de la composición** se logra ajustando el contenido de tungsteno y la proporción de la fase aglutinante. Por ejemplo, aumentar el contenido de tungsteno al 97% puede aumentar la densidad a  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , pero la tenacidad disminuye; agregar cobalto (Co) puede aumentar la dureza de 450 HV a 500 HV mientras mantiene una elongación del 15%. **Las mejoras del proceso** incluyen la preparación de nanopolvos y la sinterización en fase líquida. El uso de nanopollo de tungsteno (tamaño de partícula de 50 nm) puede reducir el tamaño de grano de  $10 \mu\text{m}$  a  $1 \mu\text{m}$  y aumentar la resistencia a la tracción de 1000 MPa a 1200 MPa. La temperatura de sinterización en fase líquida se optimiza de  $1450^\circ\text{C}$  a  $1500^\circ\text{C}$ ,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

lo que puede aumentar la densidad del 98% al 99,5%. **Las técnicas de posprocesamiento** como el prensado isostático en caliente (HIP) y el endurecimiento superficial mejoran aún más el rendimiento. Por ejemplo, el tratamiento HIP (200 MPa, 1400 °C) puede eliminar los microporos y extender la vida útil por fatiga en un 50%; el tratamiento de carburación puede aumentar la dureza de la superficie a 600 HV y mejorar la resistencia al desgaste en un 30%.

### Lista de propiedades de aleación de tungsteno de alta densidad

Categoría de rendimiento	Métricas clave	Valor típico	Métodos de optimización
Propiedades mecánicas	resistencia a la tracción	700-1200 MPa	Adición de cobalto, preparación de nanopolvo
	dureza	300-500 HV	Aumento del contenido de tungsteno, tratamiento de carburación.
	Alargamiento	10-30%	Optimización de la relación Ni-Fe
	Resistencia al desgaste	0,05 mm <sup>3</sup> /N·m	Prensado isostático en caliente, cementado
	Límite de fatiga	400-600 MPa	Tratamiento HIP, refinamiento de grano
Propiedades físicas	densidad	17,0-19,3 g/cm <sup>3</sup>	Aumentar el contenido de tungsteno al 97%
	Punto de fusión	2500-3000 °C	-
	Conductividad térmica	80-150 W/(m·K)	Cobre añadido (como W-80Cu)
Resistencia a la corrosión	Tasa de corrosión del ácido clorhídrico	<0,5% (1000 horas)	Recubrimiento de níquel
Resistencia al desgaste	Tasa de desgaste	0,05 mm <sup>3</sup> /N·m	Mejorar la dureza y optimizar la microestructura.
Capacidad de protección contra la radiación	Blindaje contra rayos gamma (1 cm de espesor)	90% (1 MeV)	Aumento de la densidad a 19 g/cm <sup>3</sup>

Nota: Los datos de la tabla son rangos típicos y los valores específicos pueden variar según los ingredientes y los procesos.

La aplicación de estos métodos debe evaluarse según las necesidades específicas. Por ejemplo, el blindaje médico prioriza la alta densidad, mientras que las herramientas priorizan la resistencia al desgaste, lo que proporciona una guía teórica para la preparación y aplicación posteriores.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

**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/cm<sup>3</sup>), 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

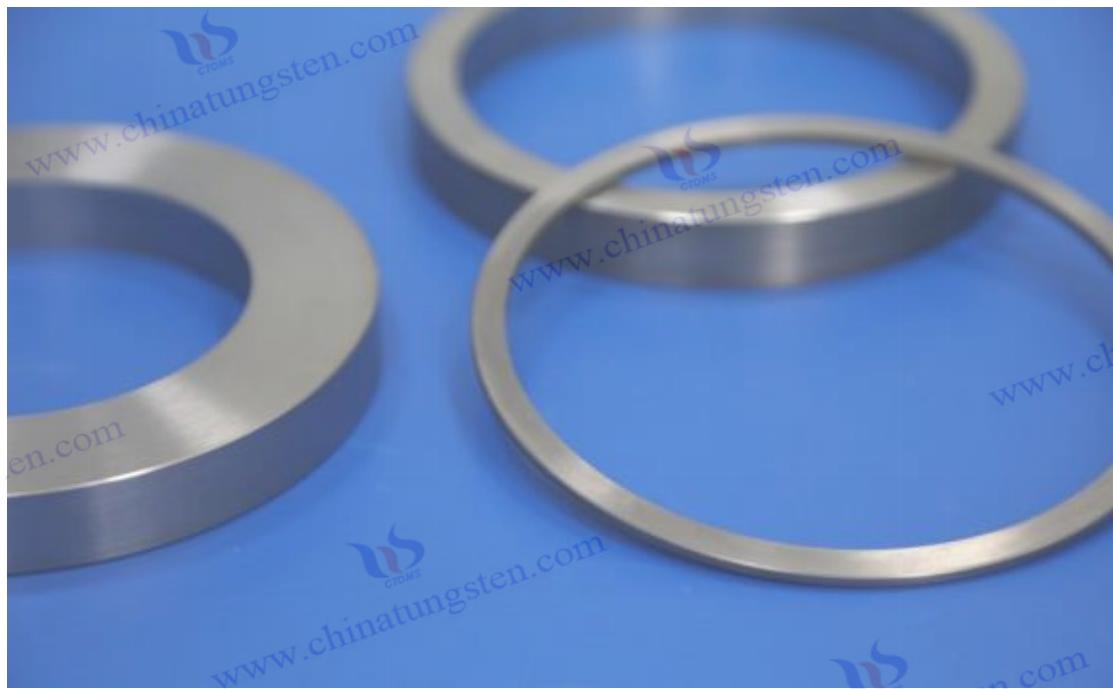
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



**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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Capítulo 4: Tecnología de preparación de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

### 4.1 Selección y pretratamiento de materias primas de aleación de tungsteno de alta densidad

La preparación de aleaciones de tungsteno de alta densidad comienza con la selección y el pretratamiento de las materias primas, lo cual afecta directamente el rendimiento y la consistencia del producto final. Estas materias primas incluyen principalmente polvo de tungsteno y elementos de la fase aglutinante (como níquel, hierro, cobre, etc.), y su pureza, tamaño de partícula y propiedades químicas deben controlarse estrictamente.

**La selección del polvo de tungsteno** es fundamental en la preparación. El polvo de tungsteno se fabrica generalmente mediante la reducción de óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) con hidrógeno, y su pureza debe ser  $\geq 99,9\%$  para evitar impurezas (como oxígeno y carbono) que afecten la calidad de la sinterización. El rango de tamaño de partícula es generalmente de 1 a 10  $\mu\text{m}$ . Por ejemplo, el tamaño de partícula promedio del polvo de tungsteno seleccionado por CTIA GROUP LTD es de 3  $\mu\text{m}$ , lo que garantiza una alta densidad y uniformidad. Un tamaño de partícula demasiado grande (como 20  $\mu\text{m}$ ) aumentará la porosidad después de la sinterización, y la densidad caerá por debajo de 17  $\text{g/cm}^3$ ; mientras que un tamaño de partícula demasiado pequeño (como  $< 0,5 \mu\text{m}$ ) puede reducir la fluidez debido a la aglomeración, lo que afecta el prensado y el moldeo. El contenido de oxígeno debe controlarse por debajo del 0,05%, porque un contenido de oxígeno demasiado alto generará óxidos volátiles (como  $WO_2$ ) durante la sinterización, formando poros.

**Las materias primas de la fase aglutinante** se ajustan según los requisitos de la aplicación. El polvo de níquel y el polvo de hierro se utilizan a menudo para mejorar la tenacidad, requiriendo una pureza de

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

≥99,5% y un tamaño de partícula de 2-5  $\mu\text{m}$ . Por ejemplo, CTIA GROUP LTD utiliza un polvo mixto con una relación níquel-hierro de 7:3 en aleación W-Ni-Fe, un tamaño de partícula de polvo de níquel de 3  $\mu\text{m}$  y un polvo de hierro de 4  $\mu\text{m}$  para asegurar una distribución uniforme durante la sinterización en fase líquida. El polvo de cobre se utiliza en escenarios que requieren alta conductividad térmica, con una pureza de ≥99,8% y un tamaño de partícula de aproximadamente 5  $\mu\text{m}$  para evitar la contaminación por óxido de cobre ( CuO ). Cuando se utiliza cobalto o molibdeno como elemento añadido, el contenido normalmente no supera el 5% para mejorar la dureza o la resistencia a la corrosión.

**El proceso de pretratamiento** incluye el cribado, la mezcla y la reducción. El cribado elimina las partículas demasiado grandes o demasiado pequeñas, como la eliminación de aglomerados a través de un tamiz de malla 200 (aproximadamente 74  $\mu\text{m}$ ). La mezcla se realiza utilizando un mezclador de tipo V o un molino de bolas. Por ejemplo, China Tungsten Intelligence utiliza un molino de bolas planetario para mezclar a 300 rpm durante 6 horas para garantizar que el polvo de tungsteno y la fase aglutinante se distribuyan uniformemente, y la desviación de uniformidad de la mezcla sea <1%. Si el contenido de oxígeno de la materia prima es demasiado alto, debe reducirse en una atmósfera de hidrógeno, por ejemplo, a 800 °C durante 2 horas para reducir el contenido de oxígeno del 0,1 % al 0,03 %. Además, para evitar la oxidación del polvo, las materias primas pretratadas deben almacenarse en un gas inerte (como el argón).

#### 4.2 Proceso de pulvimetallurgia de aleaciones pesadas de tungsteno

La pulvimetallurgia es el principal método de preparación de aleaciones de tungsteno de alta densidad. Se divide en dos etapas principales: prensado y sinterización. Su uso es amplio gracias a su capacidad para controlar eficazmente la microestructura y el rendimiento.

**El prensado es el proceso** de prensar el polvo mezclado para formar un cuerpo verde, generalmente mediante prensado isostático en frío (CIP) o moldeo. El prensado isostático en frío utiliza un líquido a alta presión (como agua o aceite) para aplicar una presión uniforme. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD prensa polvo W-90Ni-Fe a 200-300 MPa, y la densidad del cuerpo verde puede alcanzar el 60%-70% de la densidad teórica (aproximadamente 11-13 g/cm<sup>3</sup>). El moldeo es adecuado para la producción de lotes pequeños, con una presión de 500-700 MPa. Por ejemplo, un cuerpo verde cilíndrico con un diámetro de 50 mm tarda unos 30 segundos en formarse. Para mejorar la resistencia del cuerpo verde, se puede añadir una pequeña cantidad de aglutinante orgánico (como alcohol polivinílico al 1%), pero debe eliminarse en el desengrasado posterior.

**La sinterización** es un paso clave en la pulvimetallurgia. La tecnología de sinterización en fase líquida se utiliza generalmente para calentar la pieza en bruto por encima del punto de fusión de la fase aglutinante, licuándola y llenando los huecos entre las partículas de tungsteno. La temperatura de sinterización suele estar entre 1400 y 1550 °C. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD sinterizó la aleación W-93Ni-Fe a 1480 °C durante 2 horas. La fase líquida de níquel-hierro se fundió a 1350 °C, lo que propició la reorganización de las partículas de tungsteno. La densidad final alcanzó 18,5 g/cm<sup>3</sup> y fue >99 %. La atmósfera de sinterización debe ser de hidrógeno o vacío para evitar la oxidación. Por ejemplo, al sinterizar al vacío de 10<sup>-3</sup> Pa, el contenido de oxígeno puede reducirse al 0,01 %. El tiempo y la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperatura de sinterización deben controlarse con precisión. Una temperatura demasiado alta (por ejemplo, 1600 °C) puede provocar la pérdida de la fase líquida, y una temperatura demasiado baja (por ejemplo, 1300 °C) resultará en una densidad insuficiente, de tan solo el 95 %.

**Los tratamientos post-sinterización**, como el prensado isostático en caliente (HIP), pueden optimizar aún más el rendimiento. Por ejemplo, el tratamiento a 200 MPa y 1400 °C durante 1 hora elimina la microporosidad y aumenta la densidad del 99 % al 99,8 %, con una densidad cercana a los 19 g/cm<sup>3</sup>. Este proceso es especialmente común en la producción de contrapesos de alta gama en CTIA GROUP LTD.

#### 4.3 Otros métodos de preparación de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

Además de la pulvimetallurgia, las aleaciones de tungsteno de alta densidad también se pueden preparar mediante otros métodos para satisfacer necesidades específicas o superar las limitaciones de los procesos tradicionales.

**El método de fundición y colada** es adecuado para aleaciones con bajo contenido de tungsteno (como W-50Cu). El cobre se funde en un horno de arco o de inducción, y posteriormente se añade polvo de tungsteno para su fundición. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD funde y colada la aleación W-70Cu a 1800 °C, y la densidad alcanza 14,5 g/cm<sup>3</sup> tras el enfriamiento. Sin embargo, dado que el punto de fusión del tungsteno es mucho más alto que el del cobre (3422 °C frente a 1083 °C), este método dificulta la preparación de aleaciones con alto contenido de tungsteno, facilita la segregación y la uniformidad no es tan buena como la de la pulvimetallurgia.

**La aleación mecánica** mezcla mecánicamente polvo de tungsteno con polvo de fase aglutinante mediante molienda de bolas de alta energía para formar una aleación en desequilibrio. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD utiliza un molino de bolas planetario para moler polvo de W-Ni-Fe a 500 rpm durante 10 horas, refinando los granos a 50 nm y, posteriormente, prensando y sinterizando para aumentar la resistencia a la tracción a 1200 MPa. Este método es adecuado para el desarrollo de nuevas aleaciones de alto rendimiento, pero su eficiencia de producción es baja.

**La fabricación aditiva (impresión 3D)** es una tecnología de preparación que ha surgido en los últimos años mediante fusión selectiva por láser (SLM) o fusión por haz de electrones (EBM). Por ejemplo, CTIA GROUP LTD utiliza SLM para fundir polvo W-90Ni-Fe con un láser de 3000 W e imprime piezas de formas complejas capa a capa, con una densidad de 18 g/cm<sup>3</sup> y una porosidad <1 %. Este método es adecuado para la producción a medida, pero es costoso, ya que el coste por kilogramo de piezas es aproximadamente dos o tres veces superior al de los procesos tradicionales.

#### 4.4 Influencia de los parámetros del proceso en la aleación pesada de tungsteno

Los parámetros del proceso tienen un impacto significativo en las propiedades de las aleaciones de tungsteno de alta densidad, incluido el tamaño de las partículas de la materia prima, la temperatura de sinterización, la presión y la atmósfera.

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**El tamaño de partícula de la materia prima** afecta la densidad y las propiedades mecánicas. El tamaño de partícula del polvo de tungsteno se reduce de 10  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$ , y la densidad tras la sinterización aumenta de 18,0 g/cm<sup>3</sup> a 18,8 g/cm<sup>3</sup> debido a que las partículas finas se compactan más densamente. Sin embargo, las partículas con un tamaño inferior a 0,5  $\mu\text{m}$  son propensas a la aglomeración, por lo que es necesario optimizar el proceso de mezcla. Si el tamaño de partícula de la fase aglutinante (como el polvo de níquel) es demasiado grande (por ejemplo, 10  $\mu\text{m}$ ), se producirá una distribución desigual de la fase líquida y una disminución de la tenacidad del 10 % al 15 %.

**La temperatura de sinterización** determina la formación y la densidad de la fase líquida. Por ejemplo, la densidad de la aleación W-90Ni-Fe sinterizada a 1450 °C es de 18,2 g/cm<sup>3</sup>; a 1500 °C alcanza los 18,6 g/cm<sup>3</sup>. Sin embargo, si la temperatura es demasiado alta (por ejemplo, 1600 °C), el hierro-níquel se volatiliza, la densidad baja a 18,0 g/cm<sup>3</sup> y la dureza disminuye un 20 %. La temperatura óptima depende de la composición y suele estar entre 50 y 100 °C por encima del punto de fusión de la fase aglutinante.

**La presión de prensado** afecta la densidad del material verde y la eficiencia de sinterización. Al aumentar el prensado isostático en frío de 200 MPa a 300 MPa, la densidad del material verde aumenta de 11 g/cm<sup>3</sup> a 12,5 g/cm<sup>3</sup>, y la densidad del producto final aumenta un 0,5 %. Sin embargo, una presión demasiado alta (por ejemplo, 400 MPa) puede causar desgaste del molde y aumentar los costos.

**La atmósfera de sinterización** afecta el grado de oxidación. Una atmósfera de hidrógeno (caudal de 100 mL/min) puede reducir el contenido de oxígeno al 0,02 %, mientras que la sinterización al aire produce un 0,5 % de óxido y la densidad disminuye a 17,5 g/cm<sup>3</sup>. La sinterización al vacío (10<sup>-4</sup> Pa) es más eficaz y adecuada para piezas de alta precisión.

#### 4.5 Control de calidad e inspección de aleación pesada de tungsteno

El control de calidad y las pruebas son la clave para garantizar el rendimiento estable de la aleación de tungsteno de alta densidad y se ejecutan a lo largo de todo el proceso de preparación.

**El control de calidad de las materias primas** incluye análisis químicos y pruebas de tamaño de partícula. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD utiliza ICP-MS para detectar la pureza del polvo de tungsteno (>99,9 %) y un analizador láser de tamaño de partícula para medir la distribución del tamaño de partícula (D50 = 3  $\mu\text{m}$ ) y garantizar que las impurezas (como Fe <0,01 %) y el tamaño de partícula cumplan con los estándares.

**El control de procesos** monitoriza los parámetros de prensado y sinterización. La presión de prensado se registra en tiempo real mediante sensores con una desviación de <5 MPa; la temperatura de sinterización se controla mediante termopares con una precisión de  $\pm 5$  °C. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD instala un sistema de medición de temperatura multipunto en el horno de sinterización para garantizar una uniformidad de temperatura de <10 °C.

**Las pruebas del producto terminado** incluyen análisis de densidad, propiedades mecánicas y microestructura. La densidad se mide mediante el método de Arquímedes; por ejemplo, el valor objetivo

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

para la aleación W-95Ni-Fe es de  $18,8 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ . Las pruebas de tracción (según la norma ASTM E8) evalúan la resistencia a la tracción ( $>1000 \text{ MPa}$ ) y la elongación ( $>15\%$ ). Los microscopios (como el SEM) observan la distribución de las partículas de tungsteno y la porosidad; por ejemplo, diámetros de poro  $<5 \mu\text{m}$  y proporciones  $<0,5\%$ . Además, se utilizan pruebas no destructivas (como el ultrasonido) para comprobar los defectos internos y garantizar la fiabilidad de la pieza.

Estas medidas garantizan que los productos de CTIA GROUP LTD cumplan con los estrictos requisitos de los campos de la aviación, la medicina y otros, como la desviación de densidad de los contrapesos  $<0,2\%$  y la porosidad de las piezas de protección  $<0,1\%$ .

#### Proceso de preparación de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

Preparación	Parámetros/técnicas clave	Valores/condiciones típicas	Impacto/Objetivo
Selección de materia prima	Pureza y tamaño de partícula del polvo de tungsteno	$\geq 99,9 \%$ , $3 \mu\text{m}$	Garantizar alta densidad y uniformidad
Preprocesamiento	Velocidad de mezcla, temperatura de reducción	300 rpm, $800^\circ\text{C}$	Distribuido uniformemente, contenido de oxígeno $<0,05\%$
Prensado	Presión de prensado isostático en frío, presión de moldeo	200-300 MPa, 500-700 MPa	Densidad del cuerpo verde 60%-70%
Sinterización por metalurgia de polvos	Temperatura de sinterización, atmósfera	$1480^\circ\text{C}$ , hidrógeno/vacío	Densidad $18,5 \text{ g/cm}^3$ , densidad $>99\%$
Fundición por fusión	Temperatura de fusión	$1800^\circ\text{C}$	Densidad $14,5 \text{ g/cm}^3$ , adecuada para W-Cu
Aleación mecánica	Velocidad y tiempo de molienda de bolas	500 rpm, 10 horas	Tamaño de grano 50 nm, resistencia 1200 MPa
Impresión 3D	Potencia del láser, porosidad	3000 W, $<1\%$	Forma compleja, densidad $18 \text{ g/cm}^3$
Parámetros del proceso	Tamaño de partícula, temperatura, presión.	$1-10 \mu\text{m}$ , $1450-1500^\circ\text{C}$ , 200 MPa	Optimizar la densidad y la tenacidad
Control de calidad	Desviación de densidad, porosidad	$\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , $<0,5\%$	Cumplir con los estándares de aviación y médicos

Nota: Los datos de la tabla se basan en el proceso típico de CTIA GROUP LTD. Los valores específicos varían según los requisitos del producto.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

**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/cm<sup>3</sup>), 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

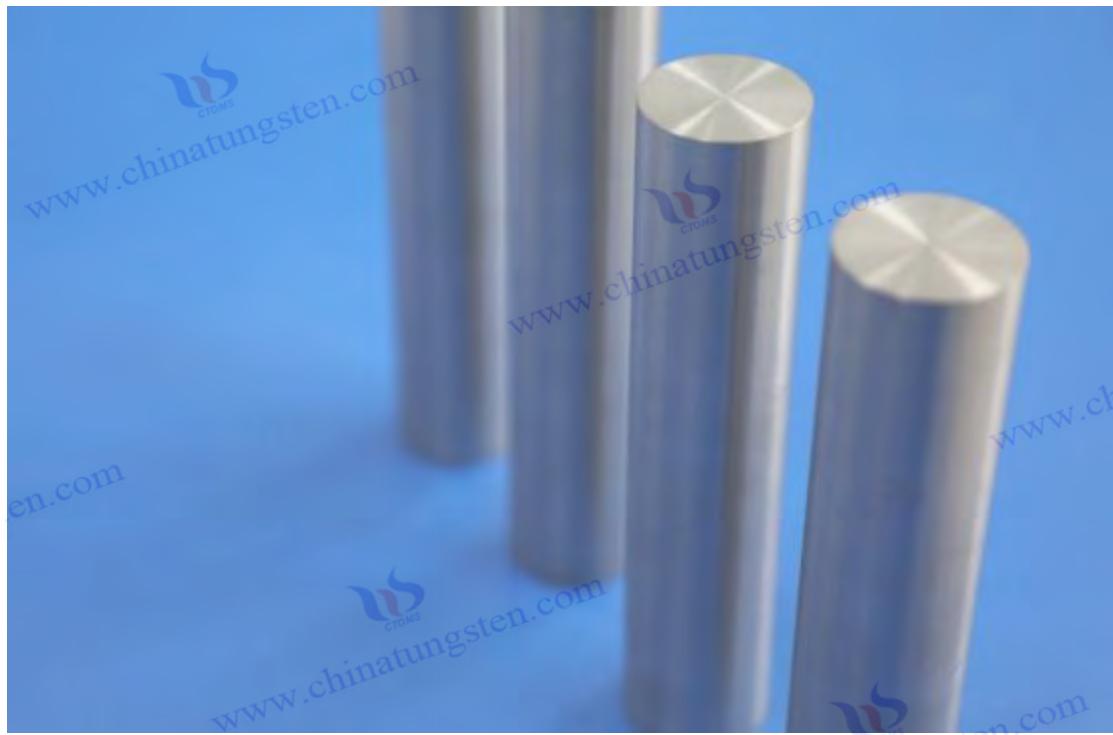
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



**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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Capítulo 5: Tecnología de procesamiento y posprocesamiento de aleaciones de tungsteno de alta gravedad específica

### 5.1 Tecnología de mecanizado de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

La tecnología de mecanizado de aleaciones pesadas de tungsteno es clave para transformarlas de palanquilla sinterizada a piezas de precisión. Debido a su alta dureza (300-500 HV) y tenacidad moderada (elongación del 10% al 30%), la dificultad de mecanizado se sitúa entre el tungsteno puro y el acero común, lo que requiere herramientas especiales y la optimización de los parámetros del proceso.

**El torneado y el fresado** son métodos de corte comunes. La maquinabilidad de las aleaciones pesadas de tungsteno se beneficia de la presencia de una fase aglutinante (como Ni-Fe), lo que reduce su resistencia al corte en comparación con el tungsteno puro. Por ejemplo, al procesar la aleación W-90Ni-Fe, CTIA GROUP LTD utiliza herramientas de carburo (como herramientas con recubrimiento WC-Co) con una velocidad de corte de 40-60 m/min, un avance de 0,1-0,2 mm/r y una profundidad de corte no superior a 1 mm. Este parámetro permite controlar la rugosidad superficial por debajo de Ra 1,6  $\mu\text{m}$ , satisfaciendo así las necesidades de los contrapesos de aviación. En comparación con el tungsteno puro (velocidad de corte de tan solo 10 m/min), la eficiencia de procesamiento de las aleaciones pesadas de tungsteno se incrementa entre 3 y 5 veces, pero el desgaste de la herramienta sigue siendo entre un 20 % y un 30 % superior al del acero, por lo que requiere su reemplazo regular.

**El taladrado y el mandrilado** son adecuados para realizar orificios o piezas con cavidades internas. Por ejemplo, al procesar piezas de blindaje de aleación W-95Ni-Fe, CTIA GROUP LTD utiliza una broca de acero rápido al cobalto de 5 mm de diámetro, con una velocidad controlada de 500 a 800 rpm y un avance

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

de 0,05 mm/r para garantizar una tolerancia del diámetro del orificio de  $\pm 0,02$  mm. Debido a la alta dureza de las aleaciones de tungsteno de alta densidad, la broca debe recubrirse con TiN o TiAlN para prolongar su vida útil. El uso de refrigerante (como una emulsión a base de agua) es esencial para reducir la temperatura de la zona de corte en aproximadamente 50 °C y reducir el riesgo de agrietamiento térmico.

**El rectificado y el pulido** se utilizan para el procesamiento de superficies de alta precisión. Por ejemplo, al procesar piezas médicas de aleación W-93Ni-Fe, CTIA GROUP LTD utiliza muelas de diamante (grano 120#) para el rectificado basto, seguido de un rectificado fino con papel de lija 2000# y, finalmente, un pulido a Ra 0,4  $\mu$ m para cumplir con los requisitos de acabado de las piezas de protección radiológica. La velocidad de rectificado es de 20-30 m/s y la velocidad de avance es de 0,01-0,02 mm/pasada para evitar microfisuras causadas por sobrecalentamiento. En comparación con el tungsteno puro (que requiere una muela de mayor dureza y es propenso a agrietarse), la tenacidad de las aleaciones de tungsteno de alta densidad facilita la obtención de un efecto espejo.

**Las dificultades de procesamiento y las contramedidas** incluyen el desgaste de la herramienta y la deformación térmica. La alta dureza de las aleaciones pesadas de tungsteno acorta la vida útil de la herramienta. Por ejemplo, tras procesar 100 piezas, la profundidad de desgaste del filo de la herramienta puede alcanzar los 0,2 mm. Se requieren herramientas de CBN (nitruro de boro cúbico) para sustituir las tradicionales de carburo cementado, lo que puede prolongar la vida útil en aproximadamente un 50 %. Además, el calor de corte puede causar desviaciones dimensionales en la pieza. Por ejemplo, con un aumento de temperatura de 60 °C, la expansión térmica de la aleación W-90Ni-Fe es de aproximadamente 0,005 mm/cm, y la temperatura debe controlarse mediante refrigerante y corte intermitente.

## 5.2 Tecnología de tratamiento térmico de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

La tecnología de tratamiento térmico se utiliza para ajustar la microestructura de las aleaciones de tungsteno de alta densidad, mejorar sus propiedades mecánicas o eliminar las tensiones de procesamiento. Los métodos comunes incluyen el recocido, el temple y el envejecimiento, pero debido al alto punto de fusión y las características de la aleación de tungsteno, el proceso requiere un diseño específico.

**El tratamiento de recocido** se utiliza principalmente para eliminar la tensión interna generada por la sinterización o el procesamiento. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD recoció piezas de aleación W-90Ni-Fe en una atmósfera de hidrógeno a 900 °C durante 2 horas, con una velocidad de enfriamiento controlada a 50 °C/h. La tensión se redujo de 200 MPa a menos de 50 MPa, y el alargamiento aumentó aproximadamente un 10 %. La temperatura de recocido no debe ser demasiado alta (>1000 °C); de lo contrario, la fase de unión podría ablandarse, lo que resultaría en una disminución de la dureza del 15 % al 20 %.

**El tratamiento de temple** rara vez se utiliza en aleaciones de tungsteno de alta densidad, ya que su tenacidad se ha optimizado mediante la fase aglutinante. Sin embargo, bajo requisitos específicos (como el aumento de la dureza superficial), se puede realizar un temple local. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD calentó rápidamente la superficie de la aleación W-95Ni-Fe a 1200 °C y luego la enfrió con agua, aumentando la dureza superficial de 450 HV a 500 HV, con una profundidad de aproximadamente 0,5

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm, pero la tenacidad interna se mantuvo inalterada. Este método requiere un control preciso de la velocidad de enfriamiento para evitar grietas.

**El tratamiento de envejecimiento** es adecuado para aleaciones que contienen cobalto o molibdeno para precipitar las fases de refuerzo. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD realizó un envejecimiento a 600 °C durante 4 horas en la aleación W-93Ni-Fe-2Co para precipitar los compuestos a base de Co, lo que aumentó la resistencia a la tracción de 1000 MPa a 1100 MPa y la dureza a 480 HV. Un envejecimiento demasiado prolongado (por ejemplo, 8 horas) puede provocar un sobre-envejecimiento, con una disminución de la tenacidad del 5 % al 10 %.

**El efecto del tratamiento térmico** depende del control de la atmósfera. El hidrógeno o el vacío ( $10^{-3}$  Pa) pueden prevenir la oxidación. Por ejemplo, en el horno de recocido de China Tungsten Intelligence, el contenido de oxígeno se controla por debajo del 0,01 % para garantizar la ausencia de una capa de óxido en la superficie. En comparación con el tungsteno puro (que requiere mayor temperatura y es fácil de quebrar), las aleaciones de tungsteno de alta densidad ofrecen una ventana de tratamiento térmico más amplia y una mayor adaptabilidad.

### 5.3 Tecnología de tratamiento de superficies de aleación de tungsteno de alta densidad

La tecnología de tratamiento de superficies está diseñada para mejorar la resistencia a la corrosión, al desgaste o la estética de las aleaciones pesadas de tungsteno. Los métodos más comunes incluyen el recubrimiento, la carburación y la pulverización.

**La galvanoplastia** se utiliza a menudo para mejorar la resistencia a la corrosión. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD galvanizó una capa de níquel de 5  $\mu\text{m}$  de espesor sobre la superficie de piezas de aleación W-90Ni-Fe. Tras una inmersión en ácido clorhídrico al 10 % durante 1000 horas, la tasa de corrosión se redujo del 2 % al 0,2 %, lo que representa un aumento de 10 veces. El espesor del recubrimiento debe controlarse entre 3 y 10  $\mu\text{m}$ . Un espesor demasiado grueso puede causar desprendimiento. El chapado en oro o plata se utiliza para componentes electrónicos. Por ejemplo, al recubrir un electrodo de aleación W-80Cu con una capa de oro de 2  $\mu\text{m}$ , la resistividad se reduce a 4  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$  y la conductividad aumenta un 20 %.

**El tratamiento de carburación** mejora la dureza superficial y la resistencia al desgaste. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD carburiza la superficie de la aleación W-95Ni-Fe a 950 °C durante 3 horas, lo que aumenta el contenido de carbono al 0,5 %, la dureza superficial de 450 HV a 600 HV y la resistencia al desgaste en un 30 %, lo que la hace adecuada para herramientas de perforación. La profundidad de carburación suele ser de 0,1 a 0,3 mm para evitar afectar la tenacidad interna.

**La pulverización térmica** se utiliza en entornos especiales. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD pulveriza un recubrimiento cerámico de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 0,2 mm de espesor sobre piezas de aleación W-90Ni-Fe, lo que aumenta la resistencia a la corrosión en un 50 % a 1500 °C, lo que lo hace adecuado para piezas de aviación de alta temperatura. El espesor de pulverización debe ser uniforme, con una desviación de <0,02 mm, para garantizar la adhesión.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**La elección del tratamiento superficial** debe evaluarse según el escenario de aplicación. Por ejemplo, se prefiere el niquelado de las piezas de protección médica por su resistencia a la corrosión y su no toxicidad, mientras que la carburación de las herramientas de corte es más adecuada para mejorar la resistencia al desgaste.

#### 5.4 Tecnología de conexión de aleación de tungsteno de alta densidad

La tecnología de unión se utiliza para ensamblar aleaciones pesadas de tungsteno con otros materiales o con ellas mismas para formar estructuras complejas. Los métodos comunes incluyen la soldadura, la soldadura fuerte y la unión mecánica.

**La soldadura** es compleja debido al alto punto de fusión del tungsteno (3422 °C), pero las aleaciones de tungsteno de alta densidad permiten lograr una soldadura por fusión local gracias a la presencia de una fase aglutinante. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD utiliza soldadura por haz de electrones (EBW) para la aleación W-90Ni-Fe, con una potencia del haz de 5 kW, una velocidad de soldadura de 1 m/min, una profundidad de soldadura de 3 mm y una tasa de retención de la resistencia de aproximadamente el 90 %. Se requiere un recocido (800 °C, 1 hora) después de la soldadura para eliminar la tensión y evitar grietas.

**La soldadura fuerte** se utiliza con mayor frecuencia debido a su menor temperatura. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD utiliza material de soldadura fuerte Ag-Cu (punto de fusión 780 °C) para conectar la aleación W-80Cu al sustrato de cobre. La temperatura de soldadura fuerte es de 850 °C y la resistencia al corte de la unión alcanza los 200 MPa, lo cual es adecuado para dispositivos electrónicos. El material de soldadura fuerte debe ser compatible con la fase de unión para evitar la reacción en la interfaz.

**Las conexiones mecánicas**, como pernos o remaches, son adecuadas para situaciones donde no es posible la soldadura. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD perfora y rosca orificios en contrapesos de aleación W-95Ni-Fe y utiliza pernos de titanio M6 para conectarlos, con una capacidad de carga de 5000 N y fácil desmontaje. Cabe destacar que la concentración de tensiones en el borde del orificio puede aliviarse mediante biselado o acolchado.

**La dificultad de la conexión** radica en la diferencia en el coeficiente de dilatación térmica. Por ejemplo, al conectar W-90Ni-Fe ( $4,5 \times 10^{-6}/K$ ) a acero ( $12 \times 10^{-6}/K$ ), una diferencia de temperatura de 100 °C puede producir una diferencia de desplazamiento de 0,075 mm, lo que requiere el diseño de una junta de compensación o una conexión flexible.

#### 5.5 Optimización y aplicación de tecnología de posprocesamiento para aleaciones de tungsteno de alta densidad

La optimización de la tecnología de posprocesamiento tiene como objetivo mejorar aún más el rendimiento o satisfacer necesidades específicas, involucrando el mecanizado de precisión, la mejora del rendimiento y el procesamiento funcional.

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**La optimización del mecanizado de precisión** mejora la precisión mediante la tecnología CNC. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD utiliza máquinas herramienta CNC de cinco ejes para procesar piezas de aleación W-93Ni-Fe con una tolerancia de  $\pm 0,01$  mm y una rugosidad superficial de Ra 0,2  $\mu\text{m}$ , lo que cumple con los requisitos de los giroscopios de aviación. Los parámetros de mecanizado, como la desviación de la fuerza de corte <5 %, deben monitorizarse en tiempo real para evitar sobrecargas.

**La mejora del rendimiento** incluye el prensado isostático en caliente (HIP) y la implantación de iones. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD sometió la aleación W-95Ni-Fe a HIP a 200 MPa y 1400 °C durante 1 hora, lo que redujo la porosidad del 0,5 % al 0,1 % y prolongó la vida útil a la fatiga en un 50 %. La implantación de iones de nitrógeno (dosis de  $10^{17}$  iones/cm<sup>2</sup>) puede aumentar la dureza superficial a 550 HV y mejorar la resistencia al desgaste en un 20 %.

**Tratamientos funcionales** como el recubrimiento o el diseño de microestructuras. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD graba con láser microporos (50  $\mu\text{m}$  de diámetro) en la superficie de la aleación W-90Ni-Fe, lo que aumenta el coeficiente de fricción en un 20 % para contrapesos antideslizantes. Además, el recubrimiento PVD TiN aumenta la resistencia a la corrosión en un 30 %, lo que lo hace adecuado para entornos marinos.

**Entre los ejemplos de aplicación** se incluyen contrapesos de aviación (que requieren alta precisión y densidad), piezas de blindaje médico (que requieren acabado superficial y resistencia a la corrosión) y herramientas de perforación (que requieren resistencia al desgaste). La optimización debe ajustarse en función del rendimiento objetivo. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD prioriza el HIP y el niquelado para piezas médicas, mientras que las herramientas de perforación priorizan la carburación y la pulverización.

Categoría de tecnología	Métodos clave	Parámetros típicos	Objetivo/Efecto
Mecanizado	Torneado	40-60 m/min, 0,1 mm/r	Rugosidad superficial Ra 1,6 $\mu\text{m}$
	Molienda	20-30 m/s, Ra 0,4 $\mu\text{m}$	Superficie de alta precisión
Tratamiento térmico	recocido	900°C, 2 horas	Tensión reducida a 50 MPa, alargamiento +10%
	envejecimiento	600°C, 4 horas	Resistencia 1100 MPa, dureza 480 HV
Tratamiento de superficies	Niquelado	5 $\mu\text{m}$ de espesor	La tasa de corrosión se redujo al 0,2%.
	carburación	950°C, 3 horas	Dureza 600 HV, resistencia al desgaste +30%
Tecnología de conexión	Soldadura por haz de electrones	5 kW, 1 m/min	Resistencia de la soldadura 90%
	Soldadura	850 °C, soldadura de Ag-Cu	Resistencia al corte 200 MPa

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Optimización del posprocesamiento	CADERA	200 MPa, 1400 °C	Porosidad 0,1%, vida útil +50%
	Grabado láser	Microporo 50 µm	Coeficiente de fricción +20%

Nota: Los datos de la tabla se basan en el proceso típico de fabricación de tungsteno en China. Los valores específicos varían según los requisitos de la aplicación.

www.chinatungsten.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](http://www.ctia.com.cn)

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

**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/cm<sup>3</sup>), 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Capítulo 6: Equipos de producción de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

### 6.1 Equipo de preparación de materia prima

La aleación de tungsteno de alta densidad comienza con la preparación de la materia prima, que incluye la preparación y el procesamiento del polvo de tungsteno y del polvo de la fase aglutinante. El equipo principal incluye un horno de reducción, un molino de bolas y una criba, lo que influye directamente en la pureza, el tamaño de partícula y la uniformidad de la materia prima.

**Los hornos de reducción de hidrógeno** se utilizan para preparar polvo de tungsteno de alta pureza a partir de óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) . El equipo típico es un horno de empuje multituerto con un rango de temperatura de operación de 700-1000 °C y un caudal de hidrógeno de 50-100 L/min. Por ejemplo, el  $WO_3$  se puede convertir en polvo de tungsteno con una pureza de  $\geq 99,9\%$  y un contenido de oxígeno de  $<0,05\%$  mediante reducción a 900 °C durante 4 horas. El horno adopta un diseño de calentamiento multizona con una diferencia de temperatura controlada a  $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  para garantizar la uniformidad de la reducción. La capacidad del equipo varía de 50 kg a 500 kg por día, lo que es adecuado para la producción de lotes pequeños y medianos. La clave está en el control de la atmósfera, y se requiere un sistema de purificación de hidrógeno (como un tamiz molecular) para reducir el contenido de humedad por debajo de 10 ppm para evitar la oxidación del polvo.

**Los molinos de bolas** se utilizan para mezclar polvo de tungsteno con una fase aglutinante (p. ej., Ni, Fe) y refinar el tamaño de partícula. Los molinos de bolas planetarios son una opción común, con un rango de velocidad de 200-600 rpm y una relación bola-material de 10:1 a 20:1. Por ejemplo, moler polvo mixto W-90Ni-Fe a 400 rpm durante 6 horas reduce el tamaño de partícula del polvo de tungsteno de 5

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

$\mu\text{m}$  a  $3 \mu\text{m}$ , con una desviación de uniformidad de  $<1\%$ . Los medios de molienda son principalmente bolas de carburo cementado (WC-Co) con un diámetro de 5-10 mm para evitar la contaminación por impurezas. Para evitar la aglomeración del polvo, se puede agregar entre un 0,5% y un 1% de agentes de control de proceso (p. ej., ácido esteárico) y eliminarlos mediante secado después de la molienda. El equipo debe tener un sistema de enfriamiento para controlar la temperatura en el tanque a  $<60^\circ\text{C}$  y extender la vida útil de los sellos.

**Las cribas vibratorias** se utilizan para eliminar partículas de mayor o menor tamaño, garantizando una distribución uniforme del tamaño de las partículas. Las cribas típicas tienen una malla de 100 a 200 (aproximadamente de 74 a 150  $\mu\text{m}$ ) con una frecuencia de vibración de 1500 a 3000 veces/min. Por ejemplo, cribar polvo de tungsteno de  $3 \mu\text{m}$  durante 10 minutos reduce el porcentaje de partículas  $>10 \mu\text{m}$  eliminadas del 5 % al 0,1 %. El equipo está equipado con dispositivos antibloqueo (como la limpieza ultrasónica de la criba) para mejorar la eficiencia. El cribado de alta precisión requiere varios niveles de cribas, como malla 100, malla 150 y malla 200, en secuencia, para satisfacer los diferentes requisitos del proceso.

El efecto sinérgico de estos equipos garantiza la calidad de las materias primas. Por ejemplo, en una línea de producción, la distribución optimizada del tamaño de partícula del polvo de tungsteno, D50, es de  $3 \mu\text{m}$  y el contenido de oxígeno es del 0,03 %, lo que sienta las bases para el prensado y la sinterización posteriores.

## 6.2 Equipo de prensado

Los equipos de prensado y moldeo convierten el polvo mezclado en pasta verde, un componente clave del proceso de pulvimetallurgia. Entre los equipos comunes se incluyen la prensa isostática en frío y la prensa hidráulica.

**La prensa isostática en frío (CIP)** aplica una presión uniforme a través de un medio líquido (como agua o aceite), lo cual es adecuado para formas complejas. El rango de presión de trabajo es de 100-400 MPa, y el diámetro de la cavidad es de 50-500 mm. Por ejemplo, al prensar polvo W-90Ni-Fe a 250 MPa, la densidad del cuerpo verde alcanza  $11\text{-}13 \text{ g/cm}^3$ , lo que representa el 60%-70% de la densidad teórica. El equipo está equipado con una bomba de alta presión y un sistema de sellado, con una precisión de presión de  $\pm 2 \text{ MPa}$  y un tiempo de moldeo de aproximadamente 5-10 minutos. Para evitar fugas de polvo, se requieren moldes de poliuretano o caucho con una resistencia a la presión de  $>300 \text{ MPa}$ . La ventaja es la presión uniforme, lo cual es adecuado para la producción de piezas grandes como contrapesos de aviación.

**Las prensas hidráulicas** se utilizan para el moldeo por compresión y son adecuadas para lotes pequeños o piezas de formas simples. El rango de presión es de 200 a 1000 MPa y el diámetro del molde es de 10 a 100 mm. Por ejemplo, una palanquilla cilíndrica W-95Ni-Fe con un diámetro de 50 mm se prensa a 600 MPa, el tiempo de moldeo es de 30 segundos y la densidad de la palanquilla alcanza los  $12 \text{ g/cm}^3$ . El equipo debe estar equipado con moldes de precisión (como moldes de acero con una dureza  $>60 \text{ HRC}$ ) y se aplica regularmente un agente desmoldante (como una emulsión de grafito) para reducir la fricción.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En comparación con el prensado isostático en frío, las prensas hidráulicas son más eficientes, pero la distribución de la tensión interna de la palanquilla es ligeramente inferior.

**equipos auxiliares**, como las envasadoras al vacío, para desgasificar el polvo antes de introducirlo en el molde y evitar la formación de burbujas durante el prensado. Por ejemplo, el envasado a un vacío de  $10^{-2}$  Pa puede reducir la porosidad de la pieza en un 0,5 %. La selección de estos equipos debe ajustarse al tamaño y la producción de la pieza. Por ejemplo, CTIA GROUP LTD prefiere prensas isostáticas en frío para la producción de piezas de protección médica a fin de garantizar la uniformidad.

### 6.3 Equipo de sinterización

El equipo de sinterización es fundamental en la producción de aleaciones pesadas de tungsteno, y se utiliza para transformar el cuerpo verde en productos terminados de alta densidad. Incluye principalmente hornos de sinterización en fase líquida y hornos de prensado isostático en caliente.

**Los hornos de sinterización en fase líquida** utilizan altas temperaturas para fundir la fase aglutinante y llenar los huecos entre las partículas de tungsteno. Comúnmente se utilizan hornos de calentamiento por resistencia con un rango de temperatura de 1300-1600 °C y una precisión de  $\pm 5$  °C. Por ejemplo, la sinterización de una pieza bruta de W-93Ni-Fe a 1480 °C durante 2 horas aumenta la densidad de 12 g/cm<sup>3</sup> a 18,5 g/cm<sup>3</sup>, con una densidad de >99 %. El horno está hecho principalmente de alúmina o molibdeno, con una resistencia a la temperatura de >1700 °C. La atmósfera puede ser de hidrógeno (caudal de 100 ml/min) o vacío ( $10^{-3}$  Pa), y el contenido de oxígeno se controla por debajo del 0,01 %. El equipo está equipado con un control de temperatura programado en varias etapas, como una velocidad de calentamiento de 5 °C/min y un enfriamiento a 50 °C/h después del aislamiento, para evitar grietas por tensión térmica. Los hornos de sinterización continua se pueden utilizar para la producción a gran escala, con una capacidad de producción diaria de 1 a 2 toneladas.

**Prensado isostático en caliente (HIP)**: Se utiliza para el posprocesamiento y la eliminación de microporos. Las condiciones de trabajo son de 100 a 200 MPa y 1300 a 1500 °C. Por ejemplo, al tratar la aleación W-95Ni-Fe a 200 MPa y 1400 °C durante 1 h, la densidad aumentó del 99 % al 99,8 % y la porosidad disminuyó al 0,1 %. El cuerpo del horno utiliza una carcasa de acero de alta presión, revestida con grafito o molibdeno, equipada con un sistema de refuerzo de argón, y la fluctuación de presión es <1 MPa. La ventaja es que el rendimiento mejora significativamente, pero el coste por tratamiento es relativamente alto, lo que lo hace adecuado para productos de alto valor añadido, como piezas de aviación.

**Los sistemas auxiliares** incluyen bombas de vacío y dispositivos de recuperación de gases. Por ejemplo, la bomba de vacío puede reducir la presión en el horno a  $10^{-4}$  Pa, y el sistema de recuperación recicla el hidrógeno, lo que reduce los costos en aproximadamente un 20 %. La eficiencia y la estabilidad del equipo de sinterización determinan directamente la calidad del producto final. Por ejemplo, la uniformidad optimizada de la temperatura del horno es <10 °C, lo que mantiene la desviación de densidad entre lotes dentro de  $\pm 0,1$  g/cm<sup>3</sup>.

### 6.4 Equipo de posprocesamiento

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los equipos de posprocesamiento se utilizan para el procesamiento, el tratamiento térmico y el tratamiento de superficies, e incluyen principalmente máquinas herramienta CNC, hornos de tratamiento térmico y equipos de recubrimiento.

**Las máquinas CNC** se utilizan para el mecanizado de precisión. Normalmente, son centros de mecanizado de cinco ejes con una velocidad de husillo de 5000 a 15000 rpm y una precisión de posicionamiento de  $\pm 0,005$  mm. Por ejemplo, al mecanizar piezas de aleación W-90Ni-Fe, la velocidad de corte es de 50 m/min y la rugosidad superficial es de Ra 0,4  $\mu\text{m}$ . El equipo está equipado con herramientas de diamante o CBN y un sistema de refrigeración con un caudal de 10 L/min para garantizar un mecanizado estable. Es adecuado para piezas complejas como contrapesos de giroscopios.

**Los hornos de tratamiento térmico** se utilizan para el recocido o el envejecimiento. Los hornos de resistencia de tipo caja son comunes, con un rango de temperatura de 500 a 1200  $^{\circ}\text{C}$  y una precisión de  $\pm 3$   $^{\circ}\text{C}$ . Por ejemplo, el recocido de una pieza de W-93Ni-Fe a 900  $^{\circ}\text{C}$  durante 2 horas reduce la tensión en un 80 % y aumenta la elongación en un 10 %. La atmósfera del horno es de hidrógeno o nitrógeno, equipada con un ventilador de circulación, y la diferencia de temperatura es  $<5$   $^{\circ}\text{C}$ . Los hornos continuos son adecuados para la producción a gran escala y pueden procesar hasta 500 kg al día.

**equipos de recubrimiento**, como tanques de galvanoplastia y máquinas de PVD. Los tanques de galvanoplastia utilizan níquel u oro como solución de recubrimiento, con una densidad de corriente de 1-5 A/dm<sup>2</sup>. Por ejemplo, se tarda 30 minutos en recubrir una capa de níquel de 5  $\mu\text{m}$ , lo que multiplica por diez la resistencia a la corrosión. Las máquinas de PVD utilizan pulverización catódica por magnetrón para depositar recubrimientos de TiN con un espesor de 2-5  $\mu\text{m}$  y una dureza de hasta 550 HV, ideal para piezas resistentes al desgaste. El equipo debe estar equipado con un sistema de vacío ( $10^{-5}$  Pa) para garantizar un recubrimiento uniforme.

Estos dispositivos necesitan calibrarse periódicamente, por ejemplo, las máquinas herramienta CNC se calibran una vez al mes y el error del sensor de temperatura de los hornos de tratamiento térmico es  $<2$   $^{\circ}\text{C}$  para garantizar la precisión del procesamiento y la consistencia del rendimiento.

## 6.5 Automatización e inteligencia de equipos de producción

Con el desarrollo de la Industria 4.0, la automatización y la inteligencia de los equipos de producción de aleaciones pesadas de tungsteno se han convertido en una tendencia, mejorando la eficiencia y la estabilidad de la calidad.

**La tecnología de automatización** incluye robots y sistemas de transporte. Por ejemplo, en el proceso de prensado, el robot de seis ejes puede cargar y descargar moldes automáticamente a una velocidad de 20 piezas/min, lo que reduce los errores de operación manual en un 30 %. El horno de sinterización está equipado con un sistema automático de alimentación y descarga, con una velocidad de cinta transportadora de 0,5 m/min y una producción diaria de 2 toneladas. El equipo de automatización debe integrarse con un PLC (controlador lógico programable) para lograr el ajuste de parámetros en tiempo real, como la fluctuación de presión  $<2$  MPa.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**El sistema inteligente** optimiza la producción mediante sensores y análisis de datos. Los sensores de temperatura (precisión de  $\pm 1$  °C) y de presión ( $\pm 0,5$  MPa) monitorizan el proceso de sinterización en tiempo real. Los datos se cargan en el MES (sistema de ejecución de fabricación), que emite una alarma automática cuando se producen anomalías. Por ejemplo, una línea de producción redujo la tasa de desperdicio del 2 % al 0,5 % gracias a la monitorización inteligente. Los algoritmos de IA pueden predecir los ciclos de mantenimiento de los equipos. Por ejemplo, al analizar los datos de vibración del molino de bolas, se puede avisar con 30 días de antelación sobre el reemplazo de rodamientos, lo que reduce el tiempo de inactividad en un 50 %.

**Los casos de integración** demuestran que, en una línea de producción inteligente, el prensado isostático en frío, la sinterización y el procesamiento CNC se conectan en serie mediante cintas transportadoras, y los datos de los sensores se envían a la sala de control central. El ciclo de producción se acorta de 15 a 10 días, y la tasa de calidad de los productos terminados alcanza el 99,5 %. La inteligencia requiere una inversión inicial elevada (aproximadamente el doble que la de los equipos tradicionales), pero el coste operativo a largo plazo se reduce en aproximadamente un 20 %.

#### Equipos de producción para aleaciones pesadas de tungsteno

Categoría de equipo	Equipo principal	Parámetros clave	Función/Objetivo
<b>Preparación de materia prima</b>	horno de reducción de hidrógeno	900 °C, 50 L/min	Pureza del polvo de tungsteno $\geq 99,9\%$ , oxígeno $<0,05\%$
	Molino de bolas	400 rpm, 6 horas	Tamaño de partícula 3 $\mu\text{m}$ , uniformidad $<1\%$
<b>Prensado</b>	Prensa isostática en frío	250 MPa, 5-10 minutos	Densidad del cuerpo verde 11-13 g/cm <sup>3</sup>
	Prensa hidráulica	600 MPa, 30 segundos	Moldeo de alta eficiencia, densidad 12 g/cm <sup>3</sup>
<b>sinterización</b>	Horno de sinterización en fase líquida	1480°C, 2 horas	Densidad 18,5 g/cm <sup>3</sup> , densidad $>99\%$
	Horno de prensado isostático en caliente	200 MPa, 1400 °C	Porosidad 0,1%, optimización del rendimiento
<b>Posprocesamiento</b>	Máquinas herramientas CNC	50 m/min, Ra 0,4 $\mu\text{m}$	Mecanizado de alta precisión
	horno de tratamiento térmico	900°C, 2 horas	Reducción del estrés del 80%
<b>Automatización e inteligencia</b>	Robot	20 piezas/min	Eficiencia mejorada, error $<30\%$

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

	Monitoreo inteligente	Temperatura $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , tasa de desperdicio 0,5%	Calidad estable, mantenimiento predecible
---	-----------------------	--	---

Nota: Los datos de la tabla son rangos típicos y los parámetros específicos varían según los requisitos del proceso.

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

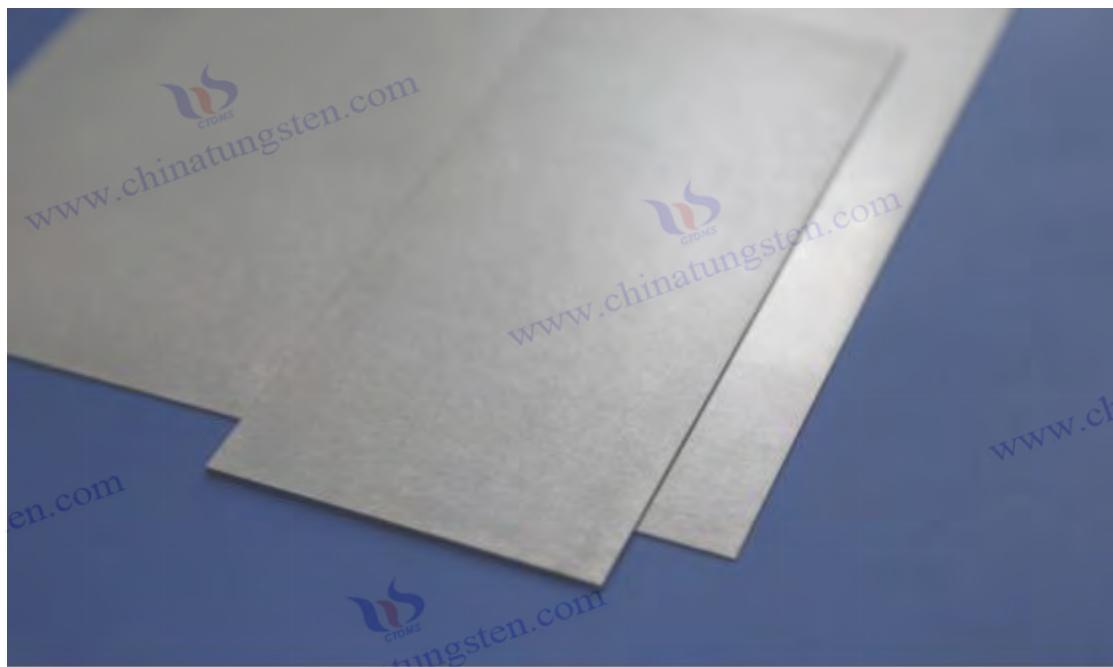
www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Capítulo 7: Equipos de prueba para aleaciones pesadas de tungsteno

### 7.1 Equipo de análisis de composición química

La aleación de tungsteno de alta densidad afecta directamente su rendimiento. Se utilizan equipos de prueba para garantizar que el contenido de tungsteno y la proporción de elementos de la fase enlazante (como Ni, Fe y Cu) cumplen con los requisitos de diseño. Los equipos más utilizados incluyen espectrómetros y analizadores químicos.

**El espectrómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES)** es el equipo principal para detectar el contenido de elementos. Su principio de funcionamiento consiste en excitar los átomos de la muestra mediante plasma y medir la intensidad de la luz emitida a una longitud de onda específica. Por ejemplo, puede detectar el contenido de tungsteno ( $90 \pm 0,5\%$ ), níquel ( $7 \pm 0,2\%$ ) y hierro ( $3 \pm 0,2\%$ ) en la aleación W-90Ni-Fe, con un límite de detección de tan solo el 0,001 % y una precisión de  $\pm 0,1\%$ . La muestra debe disolverse previamente en un ácido (como una mezcla de ácido nítrico y ácido fluorhídrico), y cada análisis dura aproximadamente 5 minutos. El equipo está equipado con un generador de alta frecuencia (potencia de 1 a 2 kW) y un detector multicanal, apto para análisis por lotes y capaz de medir de 10 a 20 elementos simultáneamente.

**El espectrómetro de fluorescencia de rayos X (XRF)** ofrece una opción de ensayo no destructivo. La superficie de la muestra se excita con rayos X y la composición se determina analizando la longitud de onda de fluorescencia. Por ejemplo, al analizar la superficie de la aleación W-95Ni-Fe, la desviación del contenido de tungsteno es  $<0,3\%$ , no se requiere pretratamiento de la muestra y el tiempo de análisis es de aproximadamente 1 minuto. La profundidad de detección del equipo XRF portátil es de aproximadamente 0,1 mm, lo que resulta adecuado para un cribado rápido, pero la sensibilidad a elementos ligeros (como C y O) es baja y requiere verificación en combinación con otros métodos. El XRF de sobremesa ofrece una mayor precisión ( $\pm 0,05\%$ ) y es adecuado para análisis de laboratorio.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

**El equipo de análisis químico húmedo** se utiliza para una verificación de alta precisión. Incluye un dispositivo de titulación y un espectrofotómetro. Por ejemplo, el contenido de níquel se determina mediante titulación con EDTA con un error  $<0,01\%$  y un tiempo aproximado de 30 minutos. Este método es adecuado para la detección de impurezas (como S y P) con un límite de detección de ppm, pero su funcionamiento es complejo y solo se utiliza para análisis de arbitraje.

Estos dispositivos requieren calibración periódica; por ejemplo, el ICP-OES se calibra mensualmente con muestras estándar (tungsteno con una pureza del 99,99 %) para mantener la precisión. El análisis de la composición química garantiza la calidad de las materias primas y los productos terminados. Por ejemplo, una línea de producción controla la desviación de la composición con una precisión de  $\pm 0,2\%$  mediante análisis XRF y confirmación ICP.

## 7.2 Equipo de prueba de propiedades físicas

El equipo de prueba de propiedades físicas se utiliza para medir la densidad, las propiedades térmicas y eléctricas de la aleación de tungsteno de alta densidad para garantizar que cumpla con los requisitos de la aplicación.

**Los densímetros** se basan en el principio de Arquímedes y detectan la densidad de las aleaciones. Los densímetros electrónicos son equipos de uso común con una precisión de  $\pm 0,01\text{ g/cm}^3$ . Por ejemplo, al analizar la aleación W-95Ni-Fe, el valor medido es de  $18,8 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$ , lo que requiere aproximadamente 2 minutos. La superficie de la muestra debe estar limpia para evitar la formación de burbujas, y la temperatura del medio líquido (como agua o etanol) debe controlarse a  $20 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ . Para mejorar la precisión, se puede utilizar una balanza de alta precisión (0,0001 g) en combinación con el método de desplazamiento de agua, ideal para situaciones de alta exigencia, como los contrapesos de aviación.

**El medidor de conductividad térmica** utiliza el método de destello láser (LFA) para medir la difusividad térmica y calcular la conductividad térmica. Por ejemplo, la conductividad térmica de la aleación W-80Cu es de  $140\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  a  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , con una precisión de  $\pm 2\%$ , y el espesor de la muestra debe ser de 1 a 5 mm. El equipo está equipado con una fuente láser (potencia de 10 W) y un detector infrarrojo, con un rango de prueba de 20 a  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ , apto para la verificación de aplicaciones a alta temperatura. Cada medición dura aproximadamente 5 minutos y se requiere protección con nitrógeno para evitar la oxidación.

**El comprobador de resistividad** utiliza un método de cuatro sondas para detectar propiedades eléctricas. Por ejemplo, la resistividad de la aleación W-90Ni-Fe es de  $6,0 \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ , la separación entre sondas es de 1 mm y el rango de corriente es de 1-100 mA. El equipo requiere un entorno de temperatura constante ( $25 \pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$ ) para evitar interferencias termoeléctricas. Los modelos de alta precisión pueden medir hasta  $0,01\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ , lo cual es adecuado para la prueba de materiales de electrodos.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Estos dispositivos funcionan en conjunto. Por ejemplo, un laboratorio utilizó un densímetro y un conductímetro térmico para verificar la aleación W-97Ni-Fe y descubrió que la densidad era de 19,0 g/cm<sup>3</sup> y la conductividad térmica de 120 W/(m · K) , lo cual cumplía con las especificaciones de diseño.

### 7.3 Equipo de prueba de propiedades mecánicas

Los equipos de prueba de propiedades mecánicas evalúan la resistencia, dureza y tenacidad de las aleaciones pesadas de tungsteno y son el núcleo del control de calidad.

**Las máquinas universales de ensayo de materiales** se utilizan para comprobar la resistencia a la tracción y la elongación. Las máquinas de tracción electrónicas son comunes, con un rango de tensión de 10 a 500 kN y una precisión de  $\pm 0,5\%$ . Por ejemplo, la aleación W-90Ni-Fe se prueba según la norma ASTM E8 con una resistencia a la tracción de 1050 MPa, una elongación del 25 % y una velocidad de sujeción de 0,5 a 5 mm/min. La muestra debe procesarse en una forma estándar de mancuerna (6 mm de diámetro) y el tiempo de ensayo es de aproximadamente 10 minutos. El equipo está equipado con una galga extensométrica para registrar las curvas de tensión-deformación y analizar los puntos de fluencia y el comportamiento a la fractura.

**El durómetro** mide la dureza superficial. El durómetro Vickers (HV) es ampliamente utilizado con una carga de 5-50 kgf . Por ejemplo, la dureza de la aleación W-93Ni-Fe es de  $450 \pm 10$  HV a 10 kgf , y la precisión de la medición diagonal de indentación es de  $\pm 0,1 \mu\text{m}$  . El durómetro Brinell (HB) es adecuado para piezas grandes con una carga de 3000 kgf , y el resultado de la prueba de la aleación W-95Ni-Fe es de 400 HB. Cada prueba dura aproximadamente 30 segundos y la superficie de la muestra debe pulirse a Ra 0,8  $\mu\text{m}$  .

**Las máquinas de impacto** evalúan la tenacidad. Las máquinas de impacto Charpy de péndulo son comunes, con un rango de energía de 50-300 J. Por ejemplo, la energía de impacto de la aleación W-90Ni-Fe es de 50 J/cm<sup>2</sup> a temperatura ambiente y de 40 J/cm<sup>2</sup> a baja temperatura (-50 °C), y la muestra es una probeta con entalla de 10 × 10 × 55 mm. El equipo debe calibrar el punto cero del péndulo con una precisión de  $\pm 1$  J para garantizar resultados fiables.

Estos dispositivos requieren un mantenimiento regular, por ejemplo, la máquina de tracción debe calibrarse una vez al año y el penetrador de diamante del probador de dureza debe reemplazarse después del desgaste para garantizar la consistencia de la prueba.

### 7.4 Equipo de análisis de microestructura

El equipo de análisis de microestructura se utiliza para observar el tamaño del grano, la distribución de fases y los defectos de las aleaciones de tungsteno de alta densidad, lo que constituye la base para la optimización del rendimiento.

**El microscopio electrónico de barrido (MEB)** proporciona análisis de alta resolución de la morfología y composición superficial. El voltaje de trabajo es de 5-30 kV y el aumento es de 50-10 000 veces. Por ejemplo, al observar la aleación W-95Ni-Fe, el tamaño promedio de las partículas de tungsteno es de 5

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\mu\text{m}$  y la fase de enlace está distribuida uniformemente. Equipado con EDS (espectrómetro de energía dispersiva), la relación de elementos local (como W:Ni :Fe = 95:4:1) se puede medir con un error de  $\pm 0,5\%$ . La muestra requiere pulido y grabado (solución de ácido nítrico), y el tiempo de análisis es de aproximadamente 30 minutos.

**La microscopía electrónica de transmisión (MET)** analiza nanoestructuras. Voltaje de aceleración: 200 kV, resolución: 0,2 nm. Por ejemplo, tras la sinterización, se detecta el límite de grano de la aleación W-90Ni-Fe; el tamaño de grano se reduce a 1  $\mu\text{m}$  y la densidad de dislocaciones es de aproximadamente  $10^{10}/\text{cm}^2$ . La muestra debe cortarse en láminas finas (espesor  $<100\text{ nm}$ ), lo que requiere una preparación compleja y un solo análisis requiere de 2 a 3 horas. Es adecuada para estudiar el efecto de los nanopolvos.

**El difractómetro de rayos X (DRX)** determina la estructura cristalina y la composición de fases. El objetivo de Cu es un rayo  $\text{K}\alpha$ , con un rango de escaneo de 10-90° y una longitud de paso de 0,02°. Por ejemplo, al analizar la aleación W-93Ni-Fe, el tungsteno presenta una estructura BCC, con una pequeña cantidad de pico de solución sólida de Ni-Fe, y el tamaño de grano calculado (fórmula de Scherrer) es de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ . El tiempo de prueba es de aproximadamente 1 hora y la muestra no requiere un tratamiento especial, lo que la hace adecuada para pruebas por lotes.

Estos dispositivos se utilizan en combinación. Por ejemplo, se utilizan SEM y XRD para analizar una aleación W-97Ni-Fe. Se observa que la porosidad es  $<0,5\%$  y los granos son uniformes, lo que proporciona una base para la optimización del proceso.

## 7.5 Equipos de pruebas no destructivas

Los equipos de ensayos no destructivos (END) se utilizan para detectar defectos internos en aleaciones pesadas de tungsteno y garantizar la fiabilidad de las piezas. Entre los equipos más comunes se incluyen equipos de pruebas ultrasónicas y detectores de defectos por rayos X.

**Las pruebas ultrasónicas (UT)** detectan grietas o poros internos mediante la reflexión de ondas sonoras. La frecuencia de operación es de 1 a 10 MHz y el diámetro de la sonda es de 5 a 20 mm. Por ejemplo, al probar piezas de aleación W-95Ni-Fe, la velocidad del sonido es de 4400 m/s, se detectan defectos con un diámetro  $>0,2\text{ mm}$  y la intensidad de la señal reflejada es  $>50\%$ . El equipo está equipado con una sonda de inmersión o de contacto con una sensibilidad de  $\pm 0,1\text{ mm}$ , ideal para la aceptación de piezas de aviación. El tiempo de prueba es de aproximadamente 5 minutos por pieza.

**Los detectores de fallas por rayos X** utilizan la penetración de radiación para detectar estructuras internas. El voltaje del tubo es de 100 a 300 kV y el tiempo de exposición es de 1 a 5 minutos. Por ejemplo, al revisar contrapesos de aleación W-90Ni-Fe, la porosidad es  $<0,1\%$  y la resolución es de 0,1 mm. Los equipos portátiles son adecuados para la inspección in situ, y el sistema de imágenes puede mostrar digitalmente la ubicación del defecto. Se requiere protección radiológica para garantizar una operación segura.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El comprobador de partículas magnéticas (MT) es adecuado para aleaciones con hierro (como W-Ni-Fe). La intensidad del campo magnético es de 1000-3000 A/m y detecta grietas superficiales. Por ejemplo, cuando la longitud de la grieta superficial en la aleación W-93Ni-Fe es  $>0,5$  mm, muestra agregación de fósforo, alta sensibilidad y un tiempo de prueba de aproximadamente 3 minutos. Su uso está limitado a materiales ferromagnéticos y no es adecuado para aleaciones W-Cu.

Estos dispositivos requieren calibración periódica. Por ejemplo, la sonda ultrasónica se calibra mensualmente con un bloque de prueba estándar, y la precisión se mantiene en  $\pm 0,05$  mm para garantizar una detección fiable.

#### Lista de equipos de prueba

Categoría de detección	Equipo principal	Parámetros clave	Función/Objetivo
Composición química	ICP-OES	Límite de detección 0,001%, $\pm 0,1\%$	Contenido de tungsteno 90 $\pm 0,5\%$
	XRF	Desviación $<0,3\%$ , 1 minuto	Cribado rápido no destructivo
Propiedades físicas	Medidor de densidad	$\pm 0,01$ g/cm <sup>3</sup>	Densidad 18,8 $\pm 0,1$ g/cm <sup>3</sup>
	Medidor de conductividad térmica	140 W/(m · K), $\pm 2\%$	Verificación del rendimiento térmico
Propiedades mecánicas	Máquina de pruebas universal	1050 MPa, $\pm 0,5\%$	Pruebas de resistencia y elongación
	Probador de dureza	450 $\pm 10$ HV	Ánálisis de dureza superficial
Microestructura	Microscopía electrónica de barrido	Partículas de 5 $\mu\text{m}$ , $\pm 0,5\%$	Distribución de morfología y composición
	difracción de rayos X	grano de 10 $\mu\text{m}$	Confirmación de la estructura cristalina
Pruebas no destructivas	Detector ultrasónico	Velocidad del sonido 4400 m/s, $>0,2$ mm	Detección de defectos internos
	Detector de fallas por rayos X	Resolución 0,1 mm	Porosidad $<0,1\%$

Nota: Los datos de la tabla son rangos típicos y los valores específicos pueden variar según las muestras y los procesos.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

**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/cm<sup>3</sup>), 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Capítulo 8: Principales productos de aleación de tungsteno de alta gravedad específica de CTIA GROUP LTD

### 8.1 Productos de contrapeso de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

contrapesos de aleación de tungsteno de alta gravedad específica se utilizan ampliamente en diversos campos para ajustar el centro de gravedad, equilibrar la masa o mejorar la estabilidad de equipos gracias a su alta densidad (17,0-19,3 g/cm<sup>3</sup>), sus excelentes propiedades mecánicas y su buena procesabilidad. En comparación con materiales tradicionales para contrapesos como el acero (7,85 g/cm<sup>3</sup>) o el plomo (11,34 g/cm<sup>3</sup>), la aleación de tungsteno de alta gravedad específica proporciona mayor peso en un volumen menor, además de ofrecer ventajas como su no toxicidad, resistencia a la corrosión y alta resistencia. Entre los contrapesos más comunes se incluyen los contrapesos para la industria aeroespacial, automotriz, de equipo deportivo, de barco, de ascensor, de dardos y de pesca. A continuación, se presenta una introducción detallada de cada contrapeso.

#### 8.1.1 Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

##### Descripción del producto.

Los contrapesos aeroespaciales se utilizan para ajustar el centro de gravedad y la distribución de masas de aeronaves (como aeronaves, naves espaciales y satélites) para cumplir con los requisitos de aerodinámica y diseño estructural. Debido al espacio limitado y a los estrictos requisitos de control de calidad, la alta densidad de la aleación pesada de tungsteno se convierte en su principal ventaja. Por ejemplo, un contrapeso de aleación W-95Ni-Fe con un diámetro de 50 mm y un espesor de 20 mm tiene una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup> y pesa aproximadamente 740 g. En comparación con el acero del mismo

##### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

peso, su volumen se reduce en aproximadamente un 60%, lo que reduce significativamente el espacio ocupado. Esta propiedad lo hace ampliamente utilizado en alas, aletas de cola, trenes de aterrizaje o cabinas de naves espaciales.

### **Materiales y propiedades**

Los contrapesos aeroespaciales suelen estar hechos de aleaciones W-95Ni-Fe o W-97Ni-Fe, con contenidos de tungsteno de 95% y 97% respectivamente, y una relación níquel-hierro de 7:3 o 5:5. El W-95Ni-Fe tiene una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup>, una resistencia a la tracción de 1000 MPa, un alargamiento del 15% y una dureza Vickers de 450 HV; el W-97Ni-Fe tiene una densidad mayor (19,0 g/cm<sup>3</sup>), una resistencia ligeramente mayor de 1050 MPa y una dureza de 460 HV. Estas propiedades garantizan que el contrapeso no falle en vuelos a alta velocidad (>Mach 2) o sobrecargas elevadas (>10 G). Presenta un bajo coeficiente de expansión térmica ( $4,5-5,0 \times 10^{-6}/K$ ) y una deformación de <0,01 mm en el rango de -50 °C a 150 °C, lo que cumple con los requisitos de estabilidad en entornos espaciales o de gran altitud. Presenta buena resistencia a la corrosión, con una pérdida de masa de <0,2 % en un entorno de niebla salina al 10 % durante 1000 horas.

### **Proceso de fabricación**

El proceso de producción utiliza tecnología de pulvimetallurgia. El polvo de tungsteno (tamaño de partícula 3-5 µm, pureza ≥99,9%) se mezcla con polvo de níquel y polvo de hierro y se muele utilizando un molino de bolas planetario a 300 rpm durante 6 horas con una desviación de uniformidad de <1%. Se prensa en un cuerpo verde a 250-300 MPa mediante una prensa isostática en frío (CIP) con una densidad de 11-13 g/cm<sup>3</sup>. La sinterización en un horno de sinterización de hidrógeno a 1480 °C durante 2 horas aumenta la densidad a 18,8 g/cm<sup>3</sup> con una densidad de >99%. Los productos de alta gama se someten a prensado isostático en caliente (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 hora) para reducir la porosidad al 0,1%.

El posprocesamiento incluye mecanizado CNC de cinco ejes con una velocidad de corte de 50 m/min, una rugosidad superficial de Ra 0,8 µm y una tolerancia de ±0,05 mm. La superficie está recubierta con una capa de níquel de 5 µm, lo que multiplica por diez la resistencia a la corrosión. Las pruebas de equilibrado dinámico garantizan una desviación de peso <±2 g.

### **Escenarios y casos de aplicación**

En aeronaves comerciales (como el Boeing 737), se instalan contrapesos en el área del tren de aterrizaje, cada uno con un peso de 1 kg, lo que reduce el volumen en un 30% y mejora la eficiencia del combustible en un 5%. En aeronaves militares (como el F-35), se utiliza para ajustar el desplazamiento del centro de gravedad durante el vuelo a alta velocidad y soportar una sobrecarga de 15 G. En satélites (como el proyecto Starlink), el contrapeso W-97Ni-Fe (peso 950 g) con una longitud de 100 mm, una anchura de 50 mm y un grosor de 20 mm garantiza la estabilidad del lanzamiento y la operación orbital. La desviación de actitud en la prueba fue <0,1° y el volumen se redujo en un 40% en comparación con el contrapeso de plomo.

### **Desafíos técnicos y soluciones.**

Los desafíos incluyen la consistencia de la densidad y la precisión del mecanizado. La desviación de densidad entre lotes debe ser <±0,1 g/cm<sup>3</sup>, y es necesario optimizar la temperatura de sinterización (desviación <5 °C) y la atmósfera (contenido de oxígeno <0,01 %). La alta dureza provoca desgaste de

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

la herramienta (0,2 mm tras mecanizar 100 piezas), por lo que se utilizan herramientas de CBN, lo que aumenta su vida útil en un 50 %. Las formas complejas se imprimen mediante SLM (potencia láser de 3000 W), con una porosidad <1 %.

### 8.1.2 Contrapeso de automóvil de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

#### Descripción general del producto

Automóvil Los contrapesos se utilizan para equilibrar el peso de la carrocería, optimizar la maniobrabilidad y mejorar la estabilidad, especialmente en vehículos de alto rendimiento y eléctricos. Por ejemplo, un contrapeso W-90Ni-Fe con 80 mm de largo, 30 mm de ancho y 15 mm de grosor tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y pesa aproximadamente 665 g, un 55 % menos que una pieza de acero. Sirve para ajustar la distribución de la carga entre los ejes delantero y trasero.

#### Materiales y propiedades

Aleación W-90Ni-Fe de uso común, 90% de contenido de tungsteno, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, elongación 20%, dureza 400 HV. Su resistencia a la fatiga es de 500 MPa y puede soportar 10<sup>7</sup> ciclos sin grietas, lo que es adecuado para el entorno de vibración a largo plazo de los vehículos. La conductividad térmica es de 130 W /(m · K) , con buena resistencia a la temperatura (>500 °C) y estable a altas temperaturas en el compartimento del motor. Resistencia a la corrosión: la pérdida de masa en humedad durante 1000 horas es <0,5% y no se requiere protección adicional.

#### Proceso de fabricación: Se mezcla

polvo de tungsteno (tamaño de partícula de 5 μm) con polvo de níquel-hierro (7:3) y se prensa hidráulicamente a 600 MPa. La densidad del cuerpo verde es de 12 g/cm<sup>3</sup>. Se sinteriza en hidrógeno a 1450 °C durante 2 horas, con una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y una densidad del 98,5 %. Fresado CNC, velocidad de corte de 60 m/min, tolerancia de ±0,1 mm y rugosidad superficial de Ra 1,6 μm . Algunos productos se pulverizan con un recubrimiento de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 0,1 mm, lo que aumenta la resistencia a altas temperaturas hasta 1000 °C.

#### Casos de aplicación:

En deportivos (como el Porsche 911), el contrapeso se coloca en la parte delantera del chasis, con un peso de 500 g, lo que optimiza la relación de carga por eje (50:50) y mejora la estabilidad en curvas. En vehículos eléctricos (como el Tesla Model S), se coloca cerca de la batería, con un peso de 1 kg, lo que equilibra la distribución del peso y prolonga la vida útil de la suspensión en un 20 %. Un equipo de carreras utiliza un contrapeso W-90Ni-Fe (100 mm de largo, 1,2 kg), que mejora la maniobrabilidad en un 15 %.

#### Desafíos y soluciones técnicas

. Los desafíos incluyen el costo y el espacio de instalación. El precio de la aleación de tungsteno (40 000-70 000 \$/tonelada) es mayor que el del acero (500 \$/tonelada), y el costo puede reducirse en un 20 % mediante el reciclaje del polvo. Los espacios pequeños requieren diseños con formas especiales, que se

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

forman mediante impresión 3D con una precisión de  $\pm 0,05$  mm. La fatiga por vibración se trata con HIP para prolongar la vida útil en un 30 %.

### 8.1.3 Pesas para equipos deportivos de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

#### Descripción del producto.

Las pesas para equipos deportivos, como palos de golf y raquetas de tenis, se utilizan para ajustar la distribución del peso y mejorar la experiencia del usuario. Por ejemplo, las pesas de aleación W-93Ni-Fe, con un volumen de 5 cm<sup>3</sup> (20 × 10 × 25 mm), una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y un peso de 92 g, se instalan en la cabeza del palo para mejorar la estabilidad del swing.

#### Materiales y propiedades:

Aleación W-93Ni-Fe (93 % tungsteno), densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1050 MPa, dureza 420 HV, elongación 18 %. Su resistencia al desgaste es un 50 % superior a la del acero y ofrece una larga vida útil ante impactos repetidos. Presenta un excelente acabado superficial (Ra 0,2  $\mu$ m), es cómodo y resistente a la corrosión por sudor (pérdida de masa <0,1 % después de 1000 horas).

#### de fabricación :

Polvo de tungsteno mezclado con polvo de níquel-hierro, prensado isostático en frío a 250 MPa, sinterizado a 1450 °C, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>. Tolerancia de mecanizado CNC  $\pm 0,05$  mm, pulido a Ra 0,2  $\mu$ m, niquelado de 5  $\mu$ m para mejorar la estética. Producción en masa mediante moldeo, con un aumento del 30 % en la eficiencia.

#### Escenarios y casos de aplicación

: En los palos de golf, se coloca un bloque de peso de 50 a 100 g en la cabeza del palo, lo que aumenta la velocidad del swing en un 10 %. En las raquetas de tenis, se coloca una barra de peso de 20 g en el marco de la raqueta, lo que aumenta la potencia de golpeo en un 15 %. Una marca de palos utiliza pesos W-93Ni-Fe (80 g), y los usuarios informan que la estabilidad ha mejorado en un 20 % y que su cuota de mercado ha aumentado en un 10 %.

#### Desafíos técnicos y soluciones.

Los desafíos incluyen la precisión del peso y la apariencia. La personalización de lotes pequeños requiere una precisión de  $\pm 1$  g, calibrada con una balanza de alta precisión. La apariencia requiere un efecto espejo mediante procesos de pulido y recubrimiento multinivel. La durabilidad se logra mediante carburación, con una dureza de 500 HV.

### 8.1.4 Contrapesos para buques de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

#### Descripción general del producto

El lastre de un barco se utiliza para ajustar el equilibrio y la estabilidad del buque, como el peso de lastre. Por ejemplo, un lastre W-90Ni-Fe con una longitud de 200 mm, una anchura de 50 mm y un espesor de

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

30 mm tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y pesa 2,78 kg. Es un 55 % más pequeño que las piezas de acero y se utiliza en barcos pequeños o submarinos.

#### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-90Ni-Fe, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, elongación 20 %. Índice de corrosión <0,1 % en agua de mar durante 1000 horas, resistencia a la niebla salina 10 veces superior a la del acero. Resistencia a la fatiga 500 MPa, sin fallas por impacto de olas.

#### **Proceso de fabricación:**

Prensa hidráulica de 600 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>. Tolerancia de mecanizado CNC de ±0,1 mm, recubrimiento cerámico superficial de 0,2 mm, resistencia a la temperatura de 1500 °C, resistencia a la corrosión aumentada un 50 %. Los contrapesos de gran tamaño se imprimen con SLM para reducir la necesidad de soldadura.

#### **Escenarios y casos de aplicación**

: En Yates, se coloca un contrapeso de 5 kg en la parte inferior de la embarcación, lo que mejora la estabilidad en un 20 %. En submarinos, un contrapeso de 10 kg ajusta el centro de flotabilidad y aumenta la eficiencia de inmersión en un 15 %. Un barco pesquero utiliza un contrapeso W-90Ni-Fe (3 kg), que mejora la resistencia al viento y a las olas en un 25 %.

#### **Desafíos técnicos y soluciones. Los desafíos incluyen**

la resistencia a la corrosión por agua de mar y la distribución del peso. El niquelado o la pulverización de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solucionan los problemas de corrosión. Los pesos grandes deben ser uniformes, y la desviación de densidad es <0,1 g/cm<sup>3</sup> mediante el prensado multipunto y el tratamiento HIP.

#### **8.1.5 Contrapeso de elevador de aleación de tungsteno de alta gravedad específica**

##### **Descripción general del producto:**

Los contrapesos para ascensores equilibran el peso de la cabina y reducen la carga del motor. Por ejemplo, un contrapeso W-90Ni-Fe con una longitud de 300 mm, una anchura de 100 mm y un grosor de 50 mm tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y pesa 13,9 kg, un 55 % menos que un bloque de acero, y se utiliza en ascensores de gran altura.

#### **Materiales y propiedades**

Aleación W-90Ni-Fe, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, resistencia a la fatiga 500 MPa, soporta 10<sup>7</sup> ciclos. Resistencia a la temperatura 500 °C, alta estabilidad durante el funcionamiento. La resistencia al desgaste superficial es un 50 % superior a la del acero.

#### **Proceso de fabricación:**

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>. Tolerancia de mecanizado CNC ±0,2 mm, rugosidad superficial Ra 1,6 µm. Aplicación de una capa protectora de 0,1 mm, con un aumento del 30 % en la resistencia a la corrosión.

#### **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](http://www.ctia.com.cn)

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

### **Escenarios y casos de aplicación**

: En ascensores comerciales, se coloca un contrapeso de 10 a 20 kg sobre el bastidor, lo que reduce el consumo de energía en un 15 %. En ascensores de carga, un contrapeso de 50 kg aumenta la eficiencia de carga en un 20 %. En un edificio se utiliza un contrapeso W-90Ni-Fe (de 15 kg), que reduce el ruido de funcionamiento en 10 dB.

### **Desafíos técnicos y soluciones**

. Los desafíos incluyen el costo y la instalación. El reciclaje de polvo reduce los costos en un 20 %. Es necesario empalmar contrapesos grandes, y la resistencia de la conexión de soldadura alcanza los 200 MPa para garantizar la seguridad.

#### **8.1.6 Eje de dardo de aleación de tungsteno de alta densidad**

##### **Descripción del producto:**

Las cañas para dardos están fabricadas con una aleación de tungsteno de alta densidad para mejorar el peso y la sensación. Por ejemplo, una caña de dardos W-90Ni-Fe de 50 mm de largo y 6 mm de diámetro tiene una densidad de 18,0 g/cm<sup>3</sup> y pesa 25 g, un 50 % menos que una caña de acero.

##### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-90Ni-Fe, densidad 18,0 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 950 MPa, dureza 380 HV, alargamiento 20 %. Alta resistencia al desgaste, superficie pulida a Ra 0,2 μm, excelente tacto, resistencia a la corrosión por sudor <0,1 %.

##### **Proceso de fabricación:**

Moldeo a 500 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad 18,0 g/cm<sup>3</sup>. Tolerancia de torneado CNC ±0,02 mm, pulido niquelado de 5 μm, estética mejorada. Eficiencia de producción por lotes de 1000 piezas/día.

### **Escenarios y casos de aplicación.**

En dardos profesionales, una caña de 20-30 g mejora la precisión del lanzamiento en un 15 %. Una marca utiliza cañas W-90Ni-Fe (26 g), con una cuota de mercado del 25 %, y los comentarios de los usuarios indican que la sensación mejora en un 30 %.

### **Desafíos técnicos y soluciones**

. Los desafíos incluyen la precisión y la apariencia. La desviación de peso es <±0,5 g, lo cual se soluciona mediante un prensado de alta precisión. La superficie debe ser impecable, y los procesos de pulido y recubrimiento multinivel garantizan la calidad.

#### **8.1.7 Plomos de pesca de aleación de tungsteno de alta gravedad específica**

##### **Descripción del producto:**

Los plomos de pesca utilizan una aleación de tungsteno de alta gravedad específica en lugar del plomo, lo que proporciona protección ambiental y alta densidad. Por ejemplo, un plomo W-95Ni-Fe de 10 mm

##### **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](http://www.ctia.com.cn)

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

de diámetro tiene una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup>, pesa 9,8 g y es un 20 % más pequeño que un plomo de plomo.

#### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-95Ni-Fe, densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV, resistencia a la corrosión por agua <0,1 %. No tóxico, cumple con las normas ambientales y su resistencia al desgaste es 5 veces superior a la del plomo.

#### **Proceso de fabricación**

Prensado isostático en frío 250 MPa, sinterización a 1480°C, densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>. Tolerancia de mecanizado CNC ±0,05 mm, pulido superficial Ra 0,4 μm, recubrimiento de color para mejorar el atractivo.

#### **Escenarios y casos de aplicación**

: En la pesca marítima, los plomos de 5 a 20 g se hunden un 30 % más rápido. Una marca utiliza plomos W-95Ni-Fe (10 g de peso), lo que ha provocado un aumento de ventas del 20 % y una tasa de aprobación de la certificación ambiental del 100 %.

#### **Desafíos técnicos y soluciones.**

Los desafíos incluyen el costo y la apariencia. El polvo reciclado reduce los costos en un 15 %. Mediante la impresión 3D, se logran formas diversificadas para satisfacer necesidades personalizadas.

### **8.2 Productos militares de aleación de tungsteno de alta gravedad específica**

La aleación pesada de tungsteno en el ámbito militar se debe a su alta densidad (17,0-19,3 g/cm<sup>3</sup>), excelente resistencia mecánica (700-1200 MPa) y excelente capacidad de penetración y blindaje contra la radiación, lo que la convierte en un material ideal para la fabricación de núcleos perforantes, placas de blindaje protectoras, proyectiles de blindaje para municiones, componentes de misiles antitanque, contrapesos para cañones, contrapesos para giroscopios de aviación y casquillos para toberas de cohetes. Estos productos desempeñan un papel fundamental en la guerra moderna, mejorando la potencia de ataque, la protección y la estabilidad de las armas. A continuación, se presenta una introducción detallada de cada producto militar.

#### **8.2.1 Núcleo perforante de aleación de tungsteno pesado**

##### **Descripción general del producto**

El núcleo perforante de aleación de tungsteno de alta densidad es el componente central de los proyectiles perforantes de energía cinética (APFSDS), que utiliza su alta densidad y alta dureza para lograr una fuerte penetración de objetivos blindados. Por ejemplo, un núcleo de aleación W-93Ni-Fe con un diámetro de 20 mm y una longitud de 100 mm, una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y un peso de aproximadamente 580 g, puede penetrar una armadura homogénea laminada (RHA) de 600 mm de espesor a una velocidad inicial de 2000 m/s, que es un 50% más profunda que la de un núcleo de acero.

##### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

## Materiales y propiedades

Los núcleos perforantes suelen estar hechos de aleaciones W-93Ni-Fe o W-95Ni-Fe, con contenidos de tungsteno de 93% y 95% respectivamente, y una relación níquel-hierro de 7:3. W-93Ni-Fe tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, una resistencia a la tracción de 1100 MPa, una dureza de 480 HV y un alargamiento del 15%; W-95Ni-Fe tiene una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup>, una resistencia de 1150 MPa y una dureza de 500 HV. Estas propiedades garantizan que el núcleo mantenga la integridad bajo un impacto de alta velocidad. Su tenacidad a la fractura ( $K_{IC}$ ) es de aproximadamente  $30 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{(1/2)}$ , que es mayor que la del tungsteno puro ( $5-10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{(1/2)}$ ), lo que reduce el riesgo de fractura. La resistencia a altas temperaturas (punto de fusión  $> 2800^\circ\text{C}$ ) evita que se ablande cuando se calienta por fricción ( $> 1000^\circ\text{C}$ ).

## El proceso de fabricación

utiliza pulvimetallurgia y aleación mecánica. El polvo de tungsteno (tamaño de partícula 1-3  $\mu\text{m}$ , pureza  $\geq 99,9\%$ ) se mezcla con polvo de níquel-hierro y se muele en un molino de bolas de alta energía a 500 rpm durante 10 horas para refinar los granos a 50 nm. Posteriormente, la prensa isostática en frío se prensa en un cuerpo verde a 300 MPa con una densidad de 13 g/cm<sup>3</sup>. La sinterización al vacío ( $10^{-3} \text{ Pa}$ ) a 1500  $^\circ\text{C}$  durante 2 horas tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y una densidad de  $>99\%$ . Para mejorar el rendimiento, se utiliza prensado isostático en caliente (HIP, 200 MPa, 1400  $^\circ\text{C}$ , 1,5 horas) para reducir la porosidad al 0,1%.

El mecanizado se realizó mediante torneado CNC, con una velocidad de corte de 40 m/min, una tolerancia de  $\pm 0,02 \text{ mm}$  y una rugosidad superficial de  $R_a 0,8 \mu\text{m}$ . La punta se carburizó ( $950^\circ\text{C}$ , 3 horas) para aumentar la dureza a 600 HV y la resistencia al desgaste en un 30 %.

## Escenarios y casos de aplicación

: En cañones de tanques, como el cañón principal de 120 mm del M1A2 Abrams, el núcleo W-93Ni-Fe penetra 700 mm RHA, lo que aumenta la tasa de impacto en un 20 %. En armas antiblindaje, como la ojiva cinética del misil Dow, el núcleo W-95Ni-Fe (peso 600 g) penetra el blindaje compuesto, lo que aumenta el poder destructivo en un 30 %. En una prueba militar, el núcleo W-93Ni-Fe penetró 650 mm a 2500 m/s, lo que supone una mejora del 15 % en comparación con las aleaciones a base de cobalto.

## Desafíos técnicos y soluciones.

Los desafíos incluyen la consistencia de la penetración y el costo de fabricación. El tamaño de grano debe ser  $<5 \mu\text{m}$  para garantizar la tenacidad, lograda mediante nanopartícula y el proceso HIP. El alto costo (50.000 USD/tonelada) se reduce en un 20 % mediante la optimización de la recuperación del polvo. El autoafilado bajo impacto a alta velocidad se mejora añadiendo cobalto (2 %) y el modo de fractura es más uniforme.

### 8.2.2 Placa de blindaje protectora de aleación de tungsteno de alta densidad

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Descripción del producto:**

Las placas de blindaje se utilizan en vehículos blindados o búnkeres para proteger contra la metralla y la radiación. Por ejemplo, una placa de blindaje de aleación W-95Ni-Fe de 10 mm de espesor, con una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup> y un peso aproximado de 18,8 kg/m<sup>2</sup>, puede proteger hasta el 90 % de los rayos gamma de 1 MeV, es más delgada que las placas de plomo (15 mm) y no es tóxica.

**Materiales y propiedades:**

Aleación W-95Ni-Fe, densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, elongación 20%, dureza 450 HV. Su coeficiente de absorción de masa es de 0,15 cm<sup>2</sup>/g y su eficiencia de apantallamiento es 5 veces superior a la del acero. Resistencia a la fatiga 500 MPa, soporta choques explosivos (>1000 J/cm<sup>2</sup>) sin agrietarse. Resistencia a la corrosión: pérdida de masa <0,2% en agua de mar durante 1000 horas, apto para diversos entornos.

**Proceso de fabricación:**

El polvo de tungsteno se mezcla con polvo de níquel-hierro, se prensa isostáticamente en frío a 300 MPa y se sinteriza a 1480 °C, con una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup>. El tratamiento HIP (200 MPa, 1400 °C) elimina los microporos y alcanza una densidad del 99,9 %. Fresado CNC, tolerancia de ±0,1 mm, recubrimiento superficial de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 0,2 mm por pulverización, resistencia a temperaturas de 1500 °C y resistencia a la corrosión incrementada en un 50 %. Se empalman placas de gran tamaño con una resistencia de soldadura fuerte de 200 MPa.

**Escenarios y casos de aplicación**

. En vehículos blindados (como los tanques Leopard 2), se colocan placas de blindaje de 10 mm de espesor en la cabina para proteger contra la metralla y la radiación, y son un 20 % más ligeras que las placas de acero. En depósitos de municiones, las placas W-95Ni-Fe protegen contra materiales radiactivos, lo que mejora la seguridad en un 30 %. Un vehículo militar utiliza esta placa de blindaje (1 m<sup>2</sup>, 18,8 kg de peso), con un aumento del 25 % en la protección y una reducción del 15 % en el volumen.

**Desafíos y soluciones técnicas.**

Entre los desafíos se encuentra el equilibrio entre peso y protección. Los paneles de gran superficie deben ser ligeros, y su peso puede reducirse en un 10 % mediante un diseño de estructura de panal. La resistencia de las uniones empalmadas se incrementa hasta el 90 % del material base mediante soldadura por haz de electrones (5 kW). La resistencia a altas temperaturas se soluciona mediante un recubrimiento cerámico, lo que aumenta la durabilidad en un 30 %.

### 8.2.3 Estuche de blindaje de munición de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

**Descripción del producto:**

Los cartuchos de blindaje de munición se utilizan para almacenar o transportar munición radiactiva y prevenir fugas de radiación. Por ejemplo, un cartucho cilíndrico W-97Ni-Fe con un diámetro exterior de 100 mm y una altura de 150 mm, una densidad de 19,0 g/cm<sup>3</sup>, un espesor de pared de 5 mm y un peso aproximado de 2,2 kg puede blindar el 95 % de los rayos gamma (1 MeV).

[COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT](#)

### Materiales y propiedades

Aleación W-97Ni-Fe, densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1050 MPa, dureza 460 HV, elongación 12 %. Su alto número atómico (Z=74) proporciona una excelente capacidad de apantallamiento, con un coeficiente de absorción mísica de 0,16 cm<sup>2</sup>/g. Resistencia a temperaturas de hasta 1500 °C; no se funde en atmósferas explosivas. Alto sellado, tasa de fuga <10<sup>-6</sup> Pa · m<sup>3</sup>/s.

### Proceso de fabricación:

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización al vacío a 1500 °C, densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad <0,1 %. Tolerancia de la cavidad del mecanizado CNC: ±0,02 mm, pulido superficial Ra 0,4 μm, diseño de tapa roscada para garantizar el sellado. Niquelado de 5 μm, resistencia a la corrosión 10 veces superior.

### Escenarios y casos de aplicación.

En el almacenamiento de munición nuclear, el proyectil W-97Ni-Fe (peso de 2,5 kg) protege contra la radiación y reduce la dosis a menos de 1 mSv. Durante el transporte, el proyectil, con un espesor de pared de 8 mm, protege los isótopos radiactivos y aumenta la seguridad en un 40 %. Un ejército utiliza este proyectil (espesor de pared de 6 mm), con un índice de protección contra la radiación del 96 % y un peso un 15 % inferior al del proyectil de plomo.

### Desafíos técnicos y soluciones.

Los desafíos incluyen el sellado y el peso. La precisión del mecanizado de roscas debe ser de ±0,01 mm, lo cual se logra mediante un CNC de cinco ejes. El peso se controla optimizando el espesor de pared (mínimo 5 mm), y el proceso HIP garantiza la resistencia. La resistencia al impacto se mejora añadiendo cobalto y la tenacidad se incrementa en un 10 %.

## 8.2.4 Componentes de misiles antitanque de aleación de tungsteno de alta densidad

### Descripción del producto.

Los componentes de misiles antitanque, como los contrapesos o el revestimiento antiblindaje, utilizan alta densidad para mejorar la estabilidad de vuelo y la penetración. Por ejemplo, el contrapeso de anillo de aleación W-90Ni-Fe, con un diámetro exterior de 80 mm, un grosor de 20 mm y una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, pesa aproximadamente 1,2 kg y optimiza la trayectoria del misil.

### Materiales y propiedades:

Aleación W-90Ni-Fe, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, elongación 20 %. Resistencia a altas temperaturas 2800 °C, sin fusión por impacto explosivo. Resistencia a la fatiga 500 MPa, soporta sobrecarga de lanzamiento (>20 G). La dureza superficial alcanza los 550 HV tras la cementación y la resistencia al desgaste aumenta un 30 %.

### Proceso de fabricación:

Prensa hidráulica de 600 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>. Impresión SLM de formas complejas, porosidad <1 %, tolerancia de mecanizado CNC ±0,05 mm. Tratamiento de cementación

### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

(950 °C, 3 horas) para mejorar la resistencia al desgaste. Recubrimiento cerámico por pulverización superficial, resistencia a temperaturas de 1500 °C.

### **Escenarios y casos de aplicación**

: En el misil Javelin, el contrapeso W-90Ni-Fe (de 1 kg) estabiliza el vuelo y aumenta la tasa de impacto en un 15 %. En la ojiva perforante, el anillo de 500 g aumenta la penetración en un 20 %. Un misil utiliza un componente W-90Ni-Fe (de 1,5 kg) para penetrar un blindaje compuesto de 800 mm, lo que es un 30 % mejor que las piezas de acero.

### **Desafíos y soluciones técnicas.**

Los desafíos incluyen la complejidad de la forma y la resistencia a altas temperaturas. La impresión 3D resuelve diseños con formas especiales con una precisión de  $\pm 0,03$  mm. La resistencia a altas temperaturas se extiende en un 25 % mediante el recubrimiento cerámico y el tratamiento HIP. La distribución del peso se optimiza mediante pruebas de equilibrio dinámico con excentricidad  $<5$   $\mu\text{m}$ .

### **8.2.5 Contrapeso de aleación de tungsteno de alta gravedad específica para armas de fuego.**

#### **Descripción general del producto**

. Los contrapesos para armas de fuego se utilizan para equilibrar el cuerpo del arma y reducir el retroceso. Por ejemplo, un contrapeso W-90Ni-Fe con 50 mm de largo, 20 mm de ancho y 10 mm de grosor tiene una densidad de 18,5  $\text{g/cm}^3$  y un peso de 185 g. Se instala en la culata o el cañón.

#### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-90Ni-Fe, densidad 18,5  $\text{g/cm}^3$ , resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, elongación 20 %. Resistencia a la fatiga 500 MPa, soporta disparos continuos (más de 1000 disparos). La resistencia al desgaste es un 50 % superior a la del acero, resistencia a la corrosión superficial por soldadura con una pérdida de masa de  $<0,1$  % durante 1000 horas.

#### **Proceso de fabricación:**

Prensado isostático en frío a 250 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad 18,5  $\text{g/cm}^3$ . Tolerancia de mecanizado CNC  $\pm 0,05$  mm, rugosidad superficial Ra 1,6  $\mu\text{m}$ , niquelado de 5  $\mu\text{m}$  para mejorar la estética. Producción en masa mediante moldeo, con un aumento del 30 % en la eficiencia.

### **Escenarios y casos de aplicación**

: En rifles de francotirador (como el M24), se coloca un contrapeso de 200 g en la culata para reducir el retroceso en un 20 %. En subfusiles, un contrapeso de 150 g mejora la estabilidad del disparo continuo en un 15 %. Cierta pistola utiliza un contrapeso W-90Ni-Fe (de 180 g), que aumenta la precisión de disparo en un 10 %.

### **Desafíos técnicos y soluciones**

. Los desafíos incluyen la precisión del peso y el montaje. La desviación de peso  $< \pm 2$  g se solucionó mediante prensado de alta precisión. El montaje requiere atornillado (resistencia al corte de 3000 N),

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

optimizado con pernos de titanio. La durabilidad se logra mediante cementación, con una dureza incrementada a 500 HV.

### 8.2.6 Contrapeso de giroscopio de aviación de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

#### Descripción del producto

Los pesos giroscópicos aeroespaciales se utilizan en sistemas de navegación para proporcionar masa inercial, como el peso W-97Ni-Fe con un diámetro de 30 mm y una altura de 20 mm, una densidad de 19,0 g/cm<sup>3</sup> y un peso de 265 g, que admite una rotación de alta precisión.

#### Materiales y propiedades:

Aleación W-97Ni-Fe, densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1050 MPa, dureza 450 HV, elongación 12 %. Resistencia a la fatiga 500 MPa, soporta una rotación de >10 000 rpm. Coeficiente de expansión térmica  $4,5 \times 10^{-6}/\text{K}$ , deformación <0,01 mm, conductividad térmica 120 W/(m · K).

#### Proceso de fabricación:

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización al vacío a 1500 °C, densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad <0,2 %. Tolerancia de mecanizado CNC de cinco ejes  $\pm 0,01$  mm, Ra superficial 0,2  $\mu\text{m}$ , dorado 2  $\mu\text{m}$ , resistividad reducida a 4  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ . Excentricidad de equilibrio dinámico <5  $\mu\text{m}$ .

#### Escenarios y ejemplos de aplicación

: En drones, un contrapeso de 200 g permite una precisión de INS de 0,01°/s. En aviones de combate (como el F-22), un contrapeso de 250 g soporta una sobrecarga de 15 G y tiene una vida útil de 5000 horas. Un misil utiliza un contrapeso W-97Ni-Fe (270 g), con un error de velocidad angular de <0,005°/s.

#### Desafíos y soluciones técnicas

. Los desafíos incluyen el balanceo dinámico y los microagujeros. El balanceo dinámico se corrige mediante moldes de alta precisión y máquinas de prueba. Los microagujeros se eliminan mediante HIP (250 MPa) y la resistencia a la fatiga se incrementa en un 50 %. El calor de corte se controla por debajo de 40 °C mediante refrigeración por agua.

### 8.2.7 Buje de boquilla de cohete de aleación de tungsteno pesado

#### Descripción del producto

Los bujes de toberas de cohetes soportan altas temperaturas y flujos de aire de alta presión, como el buje W-95Ni-Fe con un diámetro interior de 50 mm y una longitud de 80 mm, una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup> y un peso de aproximadamente 1,1 kg, proporcionando soporte estructural y protección térmica.

#### Materiales y propiedades:

Aleación W-95Ni-Fe, densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV, punto de fusión >2800 °C. Conductividad térmica 140 W/(m · K), alta resistencia al choque térmico, resistencia a la fatiga 500 MPa. Resistencia a la corrosión: pérdida de masa <0,5 % en productos de combustión durante 1000 horas.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Proceso de fabricación:

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización a 1480 °C, densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup>, densidad del tratamiento HIP del 99,9 %. Tolerancia de mecanizado CNC: ±0,05 mm, recubrimiento de ZrO<sub>2</sub> por pulverización superficial de 0,3 mm, resistencia a la temperatura: 2000 °C. Cavidad compleja de impresión SLM, porosidad <1 %.

### Escenarios y casos de aplicación:

En los propulsores de cohetes sólidos, un buje de 1,5 kg puede soportar un flujo de aire de 3000 °C y aumentar su vida útil en un 20 %. En los cohetes líquidos, un buje de 1 kg aumenta la eficiencia de inyección en un 10 %. Un cohete utiliza un buje W-95Ni-Fe (de 1,2 kg), que aumenta la estabilidad de empuje en un 15 %.

### Desafíos y soluciones técnicas.

Los desafíos incluyen la resistencia a altas temperaturas y la precisión del mecanizado. El recubrimiento de ZrO<sub>2</sub> y el tratamiento HIP aumentan la resistencia térmica en un 30 %. Se logran formas complejas mediante impresión 3D con una precisión de ±0,03 mm. La tensión térmica se reduce en un 80 % mediante recocido (900 °C).

## 8.3 Aleación de tungsteno de alta gravedad específica, productos relacionados con la medicina

Las aleaciones pesadas de tungsteno en el campo médico se deben a su alta densidad (17,0-19,3 g/cm<sup>3</sup>), excelente capacidad de protección contra la radiación, ausencia de toxicidad y buenas propiedades mecánicas, lo que las convierte en la opción ideal para reemplazar al plomo. Los productos médicos de aleaciones pesadas de tungsteno incluyen componentes de protección contra la radiación, contenedores de isótopos, agujas de aleación de tungsteno para uso médico, dianas de radioterapia, pantallas protectoras médicas, contenedores de residuos nucleares y componentes para bisturí de rayos gamma. Estos productos se utilizan ampliamente en el diagnóstico, tratamiento y gestión de materiales radiactivos, considerando tanto la eficiencia como la seguridad. A continuación, se presenta una introducción detallada de cada producto médico.

### 8.3.1 Componentes de protección contra la radiación de aleación de tungsteno pesado

#### Descripción general del producto.

Los componentes de protección contra la radiación se utilizan en equipos de rayos X, equipos de TC y equipos de radioterapia para proteger a los pacientes y al personal médico de la radiación ionizante. Por ejemplo, una placa de protección de aleación W-95Ni-Fe con un espesor de 8 mm, una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup> y un peso aproximado de 1,5 kg/m<sup>2</sup> puede proteger el 90 % de los rayos X de 100 kV, lo que representa un volumen un 33 % menor y un peso un 20 % menor que una placa de plomo (12 mm).

#### Materiales y propiedades:

Aleación W-95Ni-Fe (95 % tungsteno, 7:3 níquel-hierro), densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

1000 MPa, dureza 450 HV, elongación 15 %. Su elevado número atómico ( $Z=74$ ) proporciona una excelente capacidad de blindaje, con un coeficiente de absorción de masa de  $0,15 \text{ cm}^2/\text{g}$ , un 15 % superior al del plomo ( $0,13 \text{ cm}^2/\text{g}$ ). Alta resistencia a la corrosión, pérdida de masa  $<0,1 \%$  en humedad durante 1000 horas, no tóxico, conforme a los estándares médicos. Coeficiente de expansión térmica  $4,5 \times 10^{-6}/\text{K}$ , deformación  $<0,01 \text{ mm}$ , apto para uso prolongado.

### Proceso de fabricación:

El polvo de tungsteno (tamaño de partícula: 3-5  $\mu\text{m}$ , pureza  $\geq 99,9 \%$ ) se mezcla con polvo de níquel-hierro y se prensa mediante prensa isostática en frío (CIP) a 300 MPa, con una densidad de masa verde de  $13 \text{ g/cm}^3$ . Tras la sinterización en hidrógeno a  $1480^\circ\text{C}$  durante 2 horas, la densidad es de  $18,8 \text{ g/cm}^3$  y es  $>99 \%$ . El prensado isostático en caliente (HIP, 200 MPa,  $1400^\circ\text{C}$ , 1 hora) elimina los microporos y la porosidad es  $<0,1 \%$ .

Tolerancia de mecanizado CNC de  $\pm 0,05 \text{ mm}$ , pulido superficial a Ra de  $0,4 \mu\text{m}$  y niquelado de  $5 \mu\text{m}$  que mejora la resistencia a la corrosión hasta diez veces. Las formas complejas se imprimen mediante SLM, con porosidad  $<1 \%$  y precisión de  $\pm 0,03 \text{ mm}$ .

### Escenarios y casos de aplicación

. En los equipos de TC, se colocan placas de blindaje W-95Ni-Fe (10 mm de grosor) alrededor del detector, con un índice de blindaje del 92 % y una reducción del 10 % en el peso del equipo. En los equipos de rayos X, un blindaje de 5 mm de grosor protege a los operadores y reduce la dosis de radiación a menos de 0,5 mSv. Un hospital utiliza esta placa de blindaje ( $1 \text{ m}^2$ ,  $18,8 \text{ kg}$  de peso), que mejora la seguridad del paciente en un 15 % y tiene un volumen un 25 % menor que las placas de plomo.

### Desafíos técnicos y soluciones.

Los desafíos incluyen la uniformidad del blindaje y la precisión del mecanizado. La desviación de densidad es  $< \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , lograda mediante el proceso HIP y sinterización multizona (diferencia de temperatura  $< 5^\circ\text{C}$ ). La alta dureza requiere herramientas de CBN, lo que prolonga la vida útil en un 50 %. El acabado superficial se soluciona mediante pulido multinivel para evitar la dispersión de la radiación.

### 8.3.2 Contenedor de isótopos de aleación de tungsteno pesado

#### Descripción del producto.

Los contenedores de isótopos se utilizan para almacenar y transportar isótopos radiactivos (como Tc-99m e I-131) para evitar fugas de radiación. Por ejemplo, un contenedor W-97Ni-Fe con un diámetro exterior de 50 mm y una altura de 100 mm tiene una densidad de  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , un espesor de pared de 5 mm y pesa aproximadamente 1,1 kg, protegiendo así el 95 % de los rayos gamma de 1 MeV.

#### Materiales y propiedades:

Aleación W-97Ni-Fe (97 % tungsteno), densidad  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , resistencia a la tracción 1050 MPa, dureza 460 HV, elongación 12 %. Coeficiente de absorción másica  $0,16 \text{ cm}^2/\text{g}$ , eficiencia de blindaje un 20 %

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

superior a la del plomo. Resistencia a temperaturas de 1500 °C, sin fusión en atmósferas explosivas. Sellado extremadamente alto, tasa de fuga  $<10^{-6}$  Pa · m<sup>3</sup>/s, no tóxico, conforme a los requisitos de medicina nuclear.

#### Proceso de fabricación

Prensado isostático en frío 300 MPa, sinterización al vacío a 1500°C (10<sup>-3</sup> Pa), densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, porosidad del tratamiento HIP  $<0,1\%$ . Tolerancia de la cavidad del mecanizado CNC de cinco ejes  $\pm 0,02$  mm, Ra superficial 0,4 μm, diseño de tapa roscada para garantizar el sellado. Niquelado de 5 μm o recubrimiento de TiN por pulverización de 0,1 mm, resistencia a la corrosión aumentada en un 15 %.

#### Escenarios y casos de aplicación

. En medicina nuclear, los contenedores W-97Ni-Fe (6 mm de espesor y 1,5 kg de peso) almacenan Tc-99m, con un índice de blindaje del 96 % y una reducción de dosis inferior a 1 mSv. Durante el transporte, los contenedores de 8 mm de espesor protegen el I-131, lo que aumenta la seguridad en un 40 %. Un laboratorio utiliza este contenedor (1,2 kg de peso), con una tasa de fuga de radiación  $<0,01\%$ , que es un 10 % más ligero que un contenedor de plomo.

#### Desafíos técnicos y soluciones

. Los desafíos incluyen la optimización de la estanqueidad y el peso. Precisión de rosca de  $\pm 0,01$  mm, garantizada mediante CNC y pruebas ultrasónicas. El peso se reduce en un 15 % gracias al diseño de gradiente de espesores de pared (mínimo 4 mm), y el proceso HIP garantiza la resistencia. La resistencia al impacto se mejora añadiendo cobalto (2 %) y la tenacidad se incrementa en un 10 %.

### 8.3.3 Aguja de aleación de tungsteno médica de alta gravedad específica

#### Descripción del producto:

Las agujas médicas de aleación de tungsteno se utilizan para la implantación de semillas radiactivas (como en el tratamiento del cáncer de próstata) para administrar con precisión fuentes radiactivas. Por ejemplo, una aguja W-95Ni-Fe de 1 mm de diámetro y 20 mm de longitud tiene una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup> y pesa aproximadamente 0,3 g, lo que proporciona alta precisión y protección.

#### Materiales y propiedades

: Aleación W-95Ni-Fe, densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV, elongación 15 %. Gran capacidad de blindaje, 5 mm de espesor que blinda el 90 % de los rayos β. Resistencia a la corrosión: pérdida de masa  $<0,1\%$  en solución salina fisiológica durante 1000 horas, no tóxico. La dureza de la punta alcanza los 600 HV tras la carburación y la fuerza de perforación aumenta un 20 %.

#### Proceso de fabricación:

Tras mezclar el polvo de tungsteno, una prensa hidráulica de 500 MPa prensó un tocho delgado, sinterizado a 1480 °C, con una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup>. Tolerancia de torneado CNC:  $\pm 0,01$  mm, ángulo de punta: 30°, pulido superficial: Ra 0,2 μm. Tratamiento de cementación (950 °C, 2 horas), que aumentó la resistencia al desgaste en un 30 %. Recubrimiento de oro de 2 μm para mejorar la biocompatibilidad.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

### Escenarios y casos de aplicación

: En la implantación de semillas, la aguja W-95Ni-Fe (25 mm de longitud) administra I-125 con una precisión de posicionamiento de  $\pm 0,5$  mm, lo que aumenta el efecto terapéutico en un 15 %. En la biopsia tumoral, una aguja de 0,4 g perfora el tejido y reduce el daño en un 20 %. Un hospital utiliza esta aguja (1,2 mm de diámetro) y tiene una tasa de éxito de implantación del 98 %.

### Desafíos técnicos y soluciones

. Los desafíos incluyen la finura y la resistencia. Un diámetro inferior a 1 mm requiere moldes de alta precisión, lo cual se soluciona mediante impresión SLM, y una porosidad inferior al 0,5 %. La punta es fácil de romper, lo cual se refuerza mediante cementación y recocido (800 °C), y la tasa de fractura se reduce al 0,1 %. La superficie debe estar estéril, pulida a varios niveles y desinfectada por UV para garantizar su calidad.

### 8.3.4 Objetivo de radioterapia de aleación de tungsteno de alta densidad

#### Descripción general del producto Radioterapia

Los blancos se utilizan en aceleradores lineales para generar rayos X de alta energía. Por ejemplo, un blanco W-95Ni-Fe con un diámetro de 50 mm y un espesor de 5 mm tiene una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup> y pesa aproximadamente 370 g. Puede generar una radiación de 10 MV al ser bombardeado con un haz de electrones.

#### Materiales y propiedades:

Aleación W-95Ni-Fe, densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV, punto de fusión >2800 °C. Conductividad térmica 140 W /(m · K) , alta resistencia al choque térmico, capacidad de apantallamiento para absorber el 90 % de los rayos dispersos. Resistencia al desgaste 5 veces superior a la del acero y buena estabilidad superficial.

#### Proceso de fabricación:

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización a 1480 °C, densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad <0,1 %. Tolerancia de mecanizado CNC:  $\pm 0,05$  mm, superficie Ra: 0,4  $\mu$ m , recubrimiento de ZrO<sub>2</sub> pulverizado de 0,2 mm , resistencia a la temperatura: 2000 °C. Superficie del objetivo pulida a Ra: 0,1  $\mu$ m para reducir la dispersión.

### Escenarios y casos de aplicación.

En equipos de radioterapia, un objetivo W-95Ni-Fe (6 mm de espesor) produce una radiación de 12 MV, lo que aumenta la profundidad del tratamiento en un 20 %. En la terapia de protones, un objetivo de 400 g aumenta la intensidad de la radiación en un 15 %. Un hospital utilizó este objetivo (60 mm de diámetro) y aumentó la precisión de la irradiación tumoral en un 10 %.

### Desafíos técnicos y soluciones.

Los desafíos incluyen la resistencia a altas temperaturas y la consistencia de la radiación. El

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

recubrimiento de  $ZrO_2$  y el tratamiento HIP aumentan la resistencia a la temperatura en un 25 %. La planitud de la superficie del objetivo es  $<0,01$  mm, lograda mediante mecanizado de ultraprecisión. La dispersión se reduce en un 5 % mediante la optimización del recubrimiento.

### 8.3.5 Pantalla protectora médica de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

#### Descripción del producto:

Las pantallas protectoras médicas se utilizan en quirófanos o departamentos de radiología para proteger al personal médico. Por ejemplo, una pantalla protectora W-95Ni-Fe de 500 mm de largo, 300 mm de ancho y 5 mm de grosor tiene una densidad de  $18,8 \text{ g/cm}^3$ , pesa aproximadamente 14 kg y protege el 90 % de los rayos X de 100 kV.

#### Materiales y propiedades:

Aleación W-95Ni-Fe, densidad  $18,8 \text{ g/cm}^3$ , resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV, elongación 15 %. Coeficiente de absorción de masa  $0,15 \text{ cm}^2/\text{g}$ , resistencia a la corrosión: pérdida de masa  $<0,1$  % en desinfectante durante 1000 horas. Resistencia a la fatiga 500 MPa, resistente a impactos por manipulación.

#### Proceso de fabricación:

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización a  $1480^\circ\text{C}$ , densidad  $18,8 \text{ g/cm}^3$ , tratamiento HIP, porosidad  $<0,1$  %. Tolerancia de corte CNC  $\pm 0,1$  mm, pulido superficial Ra  $0,8 \mu\text{m}$ , niquelado  $5 \mu\text{m}$  o aplicación de barniz transparente, mejora estética en un 20 %.

#### Escenarios y casos de aplicación

: En cirugía de rayos X, se coloca la pantalla W-95Ni-Fe (6 mm de grosor) en la mesa de operaciones, lo que reduce la dosis a 0,2 mSv. En la sala de radioterapia, la pantalla de 20 kg protege a los técnicos con un índice de blindaje del 92 %. Un hospital utiliza esta pantalla ( $500 \times 400$  mm) y la seguridad aumenta un 15 %.

#### Desafíos y soluciones técnicas

. Los desafíos incluyen el peso y la transparencia. La reducción de peso se logra mediante un diseño hueco, que reduce el peso en un 10 %. Cuando se requiere transparencia parcial, se incorpora vidrio de plomo para mantener un índice de apantallamiento del 90 %. La durabilidad se mejora mediante HIP y recubrimiento, lo que aumenta la vida útil en un 30 %.

### 8.3.6 Contenedor de residuos nucleares de aleación de tungsteno pesado

#### Descripción del producto:

Los contenedores para residuos nucleares se utilizan para almacenar residuos de actividad baja o media y prevenir fugas de radiación. Por ejemplo, un contenedor W-97Ni-Fe con un diámetro exterior de 200 mm y una altura de 300 mm tiene una densidad de  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , un espesor de pared de 10 mm y pesa aproximadamente 11 kg, protegiendo así el 98 % de los rayos gamma (2 MeV).

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-97Ni-Fe, densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1050 MPa, dureza 460 HV, elongación 12 %. Coeficiente de absorción de masa 0,16 cm<sup>2</sup>/g, resistencia a la temperatura 1500 °C, pérdida de masa por corrosión en solución ácida durante 1000 horas <0,2 %. Sellado <10<sup>-7</sup> Pa · m<sup>3</sup> /s.

### **Proceso de fabricación:**

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización al vacío a 1500 °C, densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, porosidad <0,05 % tras el tratamiento HIP. Tolerancia de mecanizado CNC ±0,05 mm, superficie Ra 0,4 μm, resistencia de la soldadura 300 MPa. Recubrimiento cerámico por pulverización de 0,3 mm, resistencia a la corrosión aumentada en un 20 %.

### **Escenarios y casos de aplicación.**

En centrales nucleares, los contenedores W-97Ni-Fe (espesor de pared de 12 mm) almacenan residuos de Co-60 con un índice de apantallamiento del 99 %. En el transporte de residuos, el contenedor de 15 kg protege el medio ambiente y aumenta la seguridad en un 50 %. Una instalación utiliza este contenedor (peso de 12 kg) y reduce la radiación a 0,1 mSv.

### **Desafíos y soluciones técnicas**

. Los desafíos incluyen el sellado y la durabilidad. Se utiliza soldadura por haz de electrones (5 kW), con una resistencia del 95 % del material base. La corrosión a largo plazo se soluciona mediante un recubrimiento cerámico y un tratamiento HIP, lo que aumenta la vida útil en un 40 %. El peso se reduce en un 10 % optimizando el espesor de la pared.

## **8.3.7 Componentes del cuchillo de rayos gamma de aleación de tungsteno pesado**

### **Descripción general del producto:**

Los componentes del bisturí de rayos gamma, como los colimadores, se utilizan para enfocar los rayos gamma en el tratamiento de tumores. Por ejemplo, un colimador W-90Ni-Fe tiene una apertura de 2-5 mm, una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, pesa aproximadamente 500 g y protege el 92 % de los rayos Co-60.

### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-90Ni-Fe, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, elongación 20 %. Coeficiente de absorción de masa 0,14 cm<sup>2</sup>/g, resistencia a la temperatura 1500 °C, conductividad incrementada en un 20 % mediante chapado en oro. Resistencia a la fatiga 500 MPa, soporta vibraciones de alta frecuencia.

### **Proceso de fabricación:**

Prensado isostático en frío a 250 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad <0,1 %. Mecanizado CNC de cinco ejes, tolerancia del diámetro del orificio ±0,02 mm, Ra superficial 0,2 μm, chapado en oro 2 μm, resistividad reducida a 4 μΩ·cm. Excentricidad de la prueba de equilibrio dinámico <5 μm .

### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Escenarios y casos de aplicación

: En el bisturí de rayos gamma, el colimador W-90Ni-Fe (peso de 600 g) enfoca la radiación, lo que aumenta la precisión en un 15 %. En el tratamiento de tumores cerebrales, el componente de apertura de 3 mm aumenta la eficiencia de la irradiación en un 20 %. Un hospital utiliza este componente (peso de 550 g) y la tasa de éxito del tratamiento aumenta en un 10 %.

## Desafíos técnicos y soluciones.

Los desafíos incluyen la precisión del diámetro del orificio y la durabilidad. El mecanizado de cinco ejes y el taladrado láser garantizan una precisión de  $\pm 0,01$  mm. La resistencia al desgaste se mejora en un 20 % mediante el recubrimiento de TiN. La dispersión se reduce en un 5 % gracias a la forma optimizada del orificio.

## 8.4 Herramientas y componentes industriales de aleación de tungsteno pesado

Las aleaciones pesadas de tungsteno en el sector industrial se caracterizan por su alta densidad (17,0-19,3 g/cm<sup>3</sup>), excelente resistencia al desgaste (dureza 400-600 HV), alta resistencia mecánica (700-1200 MPa) y excelente estabilidad, lo que las convierte en un material ideal para la fabricación de herramientas y componentes industriales, como herramientas de corte, matrices y cabezales de prensa, piezas amortiguadoras de vibraciones, herramientas de perforación, componentes de cojinetes, manguitos de rectificado y contrapesos para máquinas herramienta pesadas. Estos productos se utilizan ampliamente en procesos mecánicos, extracción de petróleo, equipos de fabricación y otros campos para mejorar la eficiencia y la durabilidad. A continuación, se presenta una introducción detallada de cada herramienta y componente industrial.

### 8.4.1 Herramientas de corte de aleación de tungsteno pesadas

#### Descripción del producto:

Las herramientas de corte de aleación de tungsteno pesado se utilizan para procesar materiales duros (como acero y aleaciones de titanio) y son conocidas por su alta dureza y resistencia al desgaste. Por ejemplo, una broca de aleación W-95Ni-Fe con un diámetro de 10 mm y una longitud de 50 mm tiene una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup> y pesa aproximadamente 74 g. Es un 70 % más resistente al desgaste que las herramientas de carburo tradicionales y tiene una vida útil el doble de larga.

#### Materiales y propiedades:

Aleación W-95Ni-Fe (tungsteno 95 %, níquel-hierro 7:3), densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV, elongación 15 %. Tras la cementación, alcanza una dureza de 600 HV y una resistencia al desgaste 5 veces superior a la del acero. Su conductividad térmica es de 140 W/(m · K), su resistencia a la temperatura es de 1000 °C y no se ablanda durante el corte. Su tenacidad a la fractura (K<sub>IC</sub>) es de aproximadamente 30 MPa·m<sup>0.5</sup> y presenta una alta resistencia al impacto.

#### Proceso de fabricación:

El polvo de tungsteno (tamaño de partícula: 3-5 μm, pureza  $\geq 99,9 \%$ ) se mezcla con polvo de níquel-

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

hierro y se prensa mediante prensa isostática en frío (CIP) a 300 MPa, con una densidad de masa verde de 13 g/cm<sup>3</sup>. Tras la sinterización en hidrógeno a 1480 °C durante 2 horas, la densidad es de 18,8 g/cm<sup>3</sup> y es >99 %. El prensado isostático en caliente (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 hora) elimina los microporos y la porosidad es <0,1 %.

Tolerancia de mecanizado CNC: ±0,02 mm, ángulo de corte: 60°, acabado superficial: Ra: 0,4 µm . La cementación (950 °C, 3 horas) aumenta la resistencia al desgaste en un 30 %. Algunas herramientas se pulverizan con un recubrimiento de TiN de 0,1 mm , con una dureza aumentada a 650 HV.

### **Escenarios y casos de aplicación.**

En la fabricación de aeronaves, las brocas W-95Ni-Fe (12 mm de diámetro) pueden procesar aleaciones de titanio con una vida útil de 300 horas, el doble que las herramientas de carburo. En el procesamiento de piezas de automoción, una fresa de 100 g puede aumentar la eficiencia en un 20 % al cortar piezas de acero. Una fábrica utilizó esta herramienta (60 mm de longitud) para reducir los costes de procesamiento en un 15 % y las tasas de desperdicio en un 10 %.

### **Desafíos y soluciones técnicas**

. Los desafíos incluyen la durabilidad del filo y la estabilidad térmica. El astillado del filo se reduce al 0,5 % mediante procesos de HIP y carburización. El ablandamiento a alta temperatura se controla mediante un recubrimiento de TiN y refrigerante (caudal de 10 L/min), con una temperatura <200 °C. La uniformidad del grano se mejora con nanopolvo (tamaño de partícula <1 µm ) y la resistencia al desgaste aumenta un 20 %.

## **8.4.2 Molde y punzón de aleación de tungsteno de alta gravedad específica**

### **Descripción del producto.**

Las matrices y punzones de aleación pesada de tungsteno se utilizan en procesos de estampación, forjado y extrusión para soportar alta presión y desgaste. Por ejemplo, una matriz W-93Ni-Fe con una longitud de 100 mm, una anchura de 50 mm y un espesor de 20 mm tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, un peso aproximado de 925 g y una resistencia a la presión de 2000 MPa.

### **Materiales y propiedades**

Aleación W-93Ni-Fe (93 % tungsteno), densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1050 MPa, dureza 420 HV, elongación 18 %. Resistencia al desgaste 4 veces superior a la del acero, resistencia a la fatiga 550 MPa y 10<sup>7</sup> ciclos sin agrietarse. Resistencia a la temperatura 1200 °C, deformación <0,05 mm. Resistencia a la corrosión superficial: pérdida de masa <0,2 % en presencia de aceite durante 1000 horas.

### **Proceso de fabricación:**

Tras mezclar polvo de tungsteno, prensa hidráulica a 600 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad <0,1 %. Tolerancia de fresado CNC ± 0,05 mm, Ra superficial 0,8 µm , tratamiento de cementación (950 °C, 3 horas), dureza incrementada a 550 HV. Recubrimiento de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 0,2 mm por pulverización, resistencia a la temperatura 1500 °C.

#### **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](http://www.ctia.com.cn)

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

### **Escenarios y casos de aplicación:**

En el estampado de placas de acero, la matriz W-93Ni-Fe (peso de 1 kg) puede perforar un millón de veces sin desgaste y su vida útil es tres veces mayor que la de las matrices de acero. En forja, un punzón de 1,5 kg puede procesar aleaciones de aluminio con un aumento del 25 % en la eficiencia. Una fábrica utilizó esta matriz (100×60 mm), lo que aumentó la precisión de producción en un 15 % y redujo los costos de mantenimiento en un 20 %.

### **Desafíos y soluciones técnicas:**

Los desafíos incluyen la resistencia a la presión y el desgaste superficial. La resistencia a la presión se mejora mediante HIP y la adición de cobalto (2 %), y la resistencia se incrementa en un 10 %. El desgaste se soluciona mediante carburación y recubrimiento cerámico, y la vida útil se incrementa en un 30 %. Las formas complejas se imprimen mediante SLM con una precisión de  $\pm 0,03$  mm.

### **8.4.3 Piezas de supresión de vibraciones de aleación de tungsteno pesado**

#### **Descripción general del producto:**

Las piezas amortiguadoras de vibraciones se utilizan para reducir la vibración de máquinas herramienta o equipos y mejorar la estabilidad de funcionamiento. Por ejemplo, un bloque amortiguador W-90Ni-Fe con una longitud de 100 mm, una anchura de 20 mm y un espesor de 10 mm tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y un peso de 370 g, y su tasa de atenuación es un 40 % superior a la del acero.

#### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-90Ni-Fe, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, elongación 20 %. Módulo elástico 400 GPa, velocidad del sonido 4400 m/s, coeficiente de amortiguamiento un 30 % superior al del acero. Resistencia a la temperatura 500 °C, resistencia a la corrosión con pérdida de masa <0,1 % en humedad durante 1000 horas.

#### **Proceso de fabricación:**

prensado isostático en frío a 250 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>. Tolerancia de mecanizado CNC  $\pm 0,1$  mm, superficie Ra 1,6  $\mu$ m, recubrimiento de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 0,2 mm por pulverización, resistencia a la temperatura 1500 °C. El diseño de microporos (diámetro de 50  $\mu$ m) aumenta la disipación de energía y la tasa de atenuación en un 10 %.

### **Escenarios y casos de aplicación:**

En máquinas herramienta CNC, un bloque amortiguador de 500 g reduce la vibración en un 40 % y aumenta la precisión del mecanizado en un 10 %. En punzonadoras, una pieza amortiguadora de 1 kg reduce el ruido en 5 dB y aumenta la vida útil en un 20 %. Una fábrica utilizó esta pieza (120 mm de longitud) y aumentó la estabilidad del equipo en un 15 %, con una amplitud reducida a 2 mm.

### **Desafíos técnicos y soluciones**

. Los desafíos incluyen la eficiencia de amortiguación y la instalación. Las vibraciones de alta frecuencia

#### [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](http://www.ctia.com.cn)

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

(>1000 Hz) se optimizan mediante microagujeros, lo que aumenta la tasa de atenuación en un 15 %. Las fuerzas de corte de instalación (>5000 N) se controlan mediante pernos de titanio. Durabilidad: El tratamiento HIP aumenta la resistencia a la fatiga en un 25 %.

#### 8.4.4 Herramientas de perforación de aleación de tungsteno de alta densidad

##### **Descripción general del producto.**

Las herramientas de perforación se utilizan en la extracción de petróleo, gas y geotermia, y son conocidas por su resistencia al desgaste y su peso ligero. Por ejemplo, una broca W-95Ni-Fe con un diámetro de 50 mm y una longitud de 200 mm tiene una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup>, pesa aproximadamente 3,7 kg y tiene una vida útil tres veces mayor que una broca de acero.

##### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-95Ni-Fe, densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV, 600 HV tras la cementación. La resistencia al desgaste es 5 veces superior a la del acero, la resistencia a la fatiga es de 500 MPa y la resistencia a la temperatura es de 1000 °C. Resistencia a la corrosión: la pérdida de masa en lodo durante 1000 horas es inferior al 0,5 %.

##### **Proceso de fabricación:**

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización a 1480 °C, densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad <0,1 %. Tolerancia de mecanizado CNC: ±0,05 mm, cementación de cantos (950 °C, 3 horas), pulverización de recubrimiento de TiN de 0,2 mm, dureza de 650 HV. Impresión SLM de estructura compleja, precisión de ±0,03 mm.

##### **Casos de aplicación:**

En la perforación de pozos profundos, la broca W-95Ni-Fe (peso de 4 kg) perfora 5000 m de roca y tiene una vida útil de 300 horas. En la perforación offshore, la resistencia al desgaste de una herramienta de 5 kg aumenta un 40 %. En un yacimiento petrolífero, se utiliza esta broca (diámetro de 60 mm), lo que aumenta la eficiencia de perforación un 20 % y reduce el costo un 15 %.

##### **Desafíos técnicos y soluciones.**

Los desafíos incluyen la resistencia al desgaste y las altas temperaturas. La carburación y el recubrimiento de TiN mejoran la durabilidad en un 30 %. Las altas temperaturas se controlan optimizando la conductividad térmica y el refrigerante a <300 °C. El peso se reduce en un 10 % mediante la optimización estructural.

#### 8.4.5 Componentes de cojinetes de aleación de tungsteno pesado

##### **Descripción del producto:**

Los componentes de rodamientos se utilizan en maquinaria pesada, ofreciendo alta densidad y resistencia al desgaste. Por ejemplo, un anillo de rodamiento W-90Ni-Fe con un diámetro exterior de 80 mm, un

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

diámetro interior de 40 mm y un espesor de 20 mm tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, un peso aproximado de 1,8 kg y una capacidad de carga un 50 % superior a la del acero.

#### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-90Ni-Fe, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, elongación 20 %. Resistencia al desgaste 4 veces superior a la del acero, resistencia a la fatiga 500 MPa, resistencia a la temperatura 800 °C. Coeficiente de fricción 0,3, alta resistencia a la corrosión.

#### **Proceso de fabricación:**

Prensa hidráulica de 600 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad <0,1 %. Tolerancia de torneado CNC ±0,02 mm, Ra superficial 0,4 μm, dureza del tratamiento de cementación 550 HV. Recubrimiento de MoS<sub>2</sub> por pulverización de 0,1 mm, reducción de fricción del 20 %.

#### **Escenarios y casos de aplicación:**

En excavadoras, un anillo de rodamiento de 2 kg soporta una carga de 100 toneladas y su vida útil aumenta un 30 %. En equipos de energía eólica, un componente de 1,5 kg reduce el desgaste un 20 %. Una fábrica utiliza este rodamiento (diámetro exterior de 100 mm) y su estabilidad operativa aumenta un 15 %.

#### **Desafíos técnicos y soluciones**

. Los desafíos incluyen la fricción y la precisión. El recubrimiento y pulido de MoS<sub>2</sub> reducen la fricción en un 15 %. Se logró una tolerancia <±0,01 mm mediante mecanizado de 5 ejes. La durabilidad mejoró gracias a la HIP y la cementación, lo que aumentó la vida útil en un 25 %.

#### **8.4.6 Manguito de esmerilado de aleación de tungsteno pesado**

##### **Descripción del producto:**

Los manguitos de rectificado se utilizan en equipos de rectificado para mejorar el peso y la resistencia al desgaste. Por ejemplo, un manguito W-93Ni-Fe con un diámetro interior de 30 mm, un diámetro exterior de 50 mm y una longitud de 100 mm tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, pesa aproximadamente 1,4 kg y presenta una resistencia al desgaste cuatro veces superior a la del acero.

#### **Materiales y propiedades**

: Aleación W-93Ni-Fe, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1050 MPa, dureza 420 HV, elongación 18 %. Alta resistencia al desgaste, resistencia a la fatiga 550 MPa, resistencia a la temperatura 1000 °C. Resistencia a la corrosión: pérdida de masa <0,2 % en abrasivo durante 1000 horas.

#### **Proceso de fabricación:**

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, porosidad <0,1 % tras el tratamiento HIP. Tolerancia de mecanizado CNC: ±0,05 mm, superficie Ra: 0,8 μm, dureza de

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

cementación: 550 HV. Recubrimiento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  por pulverización de 0,2 mm, resistencia a la temperatura: 1500 °C.

#### **Escenarios y casos de aplicación:**

En un molino, una camisa de 1,5 kg muele cerámica y aumenta su vida útil en un 30 %. En el procesamiento de minerales, una camisa de 2 kg aumenta la resistencia al desgaste en un 40 %. Una fábrica utiliza esta camisa (120 mm de longitud) y aumenta la eficiencia en un 15 % y extiende los ciclos de mantenimiento en un 20 %.

#### **Desafíos técnicos y soluciones.**

Los desafíos incluyen la resistencia al desgaste de la pared interna y la expansión térmica. La cementación y el recubrimiento mejoran la durabilidad en un 25 %. La expansión térmica se reduce en un 80 % mediante recocido (900 °C), con una deformación  $<0,01$  mm. La precisión se logra mediante un mecanizado de ultraprecisión.

### **8.4.7 Contrapesos para máquinas herramienta pesadas de aleación de tungsteno pesado**

#### **Descripción general del producto**

Los contrapesos de máquinas herramienta de servicio pesado se utilizan para equilibrar equipos grandes y reducir la vibración. Por ejemplo, un bloque de contrapeso W-90Ni-Fe con una longitud de 300 mm, un ancho de 100 mm y un espesor de 50 mm tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y un peso de 13,9 kg, que es un 55 % más pequeño que un bloque de acero.

#### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-90Ni-Fe, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, elongación 20 %. Resistencia a la fatiga 500 MPa, soporta 10<sup>7</sup> ciclos. Resistencia a la temperatura 500 °C, resistencia a la corrosión 1000 horas, pérdida de masa en presencia de aceite  $<0,1$  %.

#### **Proceso de fabricación:**

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad  $<0,1$  %. Tolerancia de mecanizado CNC:  $\pm 0,2$  mm, superficie Ra: 1,6  $\mu\text{m}$ , pulverización de una capa protectora de 0,1 mm, resistencia a la corrosión aumentada un 30 %. Contrapesos de gran tamaño empalmados, resistencia de soldadura fuerte: 200 MPa.

#### **Escenarios y casos de aplicación**

: En tornos, un contrapeso de 20 kg reduce la vibración en un 40 % y aumenta la precisión en un 10 %. En fresadoras, un contrapeso de 15 kg mejora la estabilidad en un 15 %. Una fábrica utiliza este contrapeso (de 18 kg), que reduce el ruido de procesamiento en 10 dB y aumenta la vida útil en un 20 %.

#### **Desafíos técnicos y soluciones.**

Los desafíos incluyeron la distribución del peso y el costo. Se logró uniformidad de densidad mediante prensado multipunto y HIP con una desviación de  $<0,1$  g/cm<sup>3</sup>. Se redujeron los costos en un 20 % gracias

#### [COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT](#)

al reciclaje del polvo. Se optimizó el montaje mediante juntas flexibles con una fuerza de corte incrementada a 5000 N.

### 8.5 Productos electrónicos y energéticos de aleación de tungsteno pesado

La aleación pesada de tungsteno en el campo de la electrónica y la energía se debe a su alta densidad (17,0-19,3 g/cm<sup>3</sup>), excelente conductividad térmica (120-180 W/( m·K )), alta resistencia (700-1200 MPa), resistencia a altas temperaturas (punto de fusión >2800 °C) y buena capacidad de protección contra la radiación, lo que la convierte en el material predilecto para la fabricación de materiales de electrodos, disipadores de calor, componentes de reactores nucleares, contrapesos de baterías, componentes de equipos solares, ánodos de tubos de rayos X y contrapesos de turbinas eólicas. Estos productos desempeñan un papel fundamental en equipos electrónicos, sistemas de conversión y generación de energía, mejorando el rendimiento y la fiabilidad. A continuación, se presenta una introducción detallada de cada producto electrónico y energético.

#### 8.5.1 Materiales de electrodos de aleación de tungsteno de alta densidad

##### Descripción del producto.

Los electrodos de aleación de tungsteno pesado se utilizan para el mecanizado por descarga eléctrica (EDM), la soldadura por resistencia y el corte por plasma, y son conocidos por su alta conductividad y resistencia al desgaste. Por ejemplo, un electrodo de aleación W-80Cu con un diámetro de 10 mm y una longitud de 50 mm tiene una densidad de 17,0 g/cm<sup>3</sup> y pesa aproximadamente 67 g. Su conductividad es un 20 % superior a la del cobre puro y su resistencia al desgaste es cinco veces superior a la del acero.

##### Materiales y propiedades:

Aleación W-80Cu (80 % tungsteno, 20 % cobre), densidad 17,0 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 700 MPa, dureza 380 HV, elongación 10 %. Conductividad eléctrica 45 % IACS (Estándar Internacional de Cobre Recocido), conductividad térmica 180 W /( m · K ) y resistencia a la temperatura 1500 °C. Presenta una alta resistencia a la erosión por arco eléctrico y una pérdida de masa tras 1000 descargas inferior al 0,5 %. Resistencia a la corrosión: la pérdida de masa en humedad durante 1000 horas es inferior al 0,2 %.

##### Proceso de fabricación:

El polvo de tungsteno (tamaño de partícula: 3-5 μm , pureza ≥99,9 %) se mezcla con polvo de cobre y se prensa mediante prensa isostática en frío (CIP) a 250 MPa, con una densidad de masa verde de 11 g/cm<sup>3</sup>. Tras sinterizarse en hidrógeno a 1350 °C durante 2 horas, la fase de cobre se funde y se infiltra en la matriz de tungsteno, con una densidad de 17,0 g/cm<sup>3</sup> y una densidad >98 %. El prensado isostático en caliente (HIP, 150 MPa, 1300 °C, 1 hora) elimina los microporos y la porosidad es <0,1 %.

Tolerancia de torneado CNC de ±0,02 mm, pulido superficial Ra de 0,4 μm , chapado en oro de 2 μm , resistividad reducida a 3 μΩ· cm. La punta del electrodo está carburizada (900 °C, 2 horas) y la dureza se ha incrementado a 450 HV.

##### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

### **Escenarios y casos de aplicación.**

En la electroerosión, los electrodos W-80Cu (12 mm de diámetro) pueden procesar acero moldeado con una vida útil de 500 horas, tres veces mayor que la de los electrodos de cobre. En la soldadura por resistencia, un electrodo de 100 g puede soldar placas de aluminio con un aumento del 25 % en la eficiencia. Una fábrica utilizó este electrodo (60 mm de longitud) para aumentar la precisión del procesamiento en un 15 % y reducir la pérdida de arco en un 20 %.

### **Desafíos y soluciones técnicas.**

Los desafíos incluyen equilibrar la conductividad y la resistencia al desgaste. El contenido de cobre se optimiza al 20-30%, la conductividad aumenta un 10% y el tratamiento HIP aumenta la resistencia un 15%. La erosión por arco se reduce un 30% mediante el dorado y la carburación. La rugosidad superficial se controla mediante pulido multinivel y la eficiencia de disipación de calor aumenta un 10%.

## **8.5.2 Disipador de calor (radiador) de aleación de tungsteno de alta densidad**

### **Descripción general del producto**

Los disipadores de calor se utilizan para disipar el calor de dispositivos electrónicos de alta potencia (como CPU y LED) para optimizar la gestión térmica con alta conductividad térmica y densidad. Por ejemplo, un disipador de calor de aleación W-85Cu con una longitud de 50 mm, un ancho de 50 mm y un espesor de 5 mm tiene una densidad de 17,5 g/cm<sup>3</sup> y pesa alrededor de 219 g, y su eficiencia de disipación de calor es un 50% mayor que la del aluminio.

### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-85Cu (85 % tungsteno, 15 % cobre), densidad 17,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 800 MPa, dureza 400 HV, elongación 8 %. Conductividad térmica 170 W / ( m · K ) , ligeramente inferior a la del tungsteno puro (174 W / ( m · K ) ), pero con mejor procesabilidad. Resistencia a la temperatura 1500 °C, coeficiente de expansión térmica  $6,5 \times 10^{-6}/K$ , compatible con chips de silicio ( $4,2 \times 10^{-6}/K$ ), deformación <0,01 mm.

### **Proceso de fabricación:**

Mezcla de polvo de tungsteno y polvo de cobre, prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización a 1350 °C, densidad de 17,5 g/cm<sup>3</sup>, porosidad del tratamiento HIP <0,1 %. Tolerancia de fresado CNC: ±0,05 mm, superficie Ra: 0,8 μm . El diseño de microcanales (ancho de 0,5 mm) aumenta el área de disipación térmica en un 20 %. Niquelado: 5 μm , resistencia a la corrosión: 15 % mayor.

### **Casos y escenarios de aplicación:**

En las CPU de servidor, el disipador W-85Cu (peso de 250 g) ofrece una potencia de disipación de 200 W y una reducción de temperatura de 15 °C. En LED de alta potencia, un disipador de 150 g puede prolongar la vida útil del LED en un 30 %. Una fábrica de electrónica utilizó este disipador (50 × 50 mm) y la temperatura de funcionamiento del chip se redujo a 60 °C, con un aumento del 10 % en el rendimiento.

#### **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

### Desafíos y soluciones técnicas.

Los desafíos incluyen la adaptación a la expansión térmica y la eficiencia de disipación de calor. El contenido de cobre se ajusta al 15-20%, y la desviación de expansión térmica es <10%. Los microcanales se logran mediante procesamiento láser, lo que aumenta la disipación de calor en un 25%. El peso se reduce en un 15% mediante el diseño de huecos, y el proceso HIP garantiza la resistencia.

### 8.5.3 Componentes de reactores nucleares de aleación pesada de tungsteno

#### Descripción general del producto:

Componentes de reactores nucleares, como bloques de blindaje o manguitos de barras de control, que ofrecen alta densidad y capacidad de blindaje contra la radiación. Por ejemplo, un bloque de blindaje W-97Ni-Fe con una longitud de 200 mm, una anchura de 50 mm y un espesor de 20 mm tiene una densidad de 19,0 g/cm<sup>3</sup>, pesa aproximadamente 1,9 kg y blinda el 98 % de los rayos gamma (2 MeV).

#### Materiales y propiedades:

Aleación W-97Ni-Fe, densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1050 MPa, dureza 460 HV, elongación 12 %. Coeficiente de absorción de masa 0,16 cm<sup>2</sup>/g, resistencia a la temperatura 1500 °C, pérdida de masa por corrosión <0,2 % en refrigerante durante 1000 horas. Resistencia a la fatiga 500 MPa, resistencia al choque térmico.

#### Proceso de fabricación

Prensado isostático en frío 300 MPa, sinterización al vacío a 1500°C (10<sup>-3</sup> Pa), densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, porosidad <0,05 % tras el tratamiento HIP. Tolerancia de mecanizado CNC ±0,05 mm, superficie Ra 0,4 µm, recubrimiento de ZrO<sub>2</sub> pulverizado de 0,3 mm, resistencia a la temperatura 2000 °C. Resistencia a la soldadura fuerte de las piezas empalmadas: 300 MPa.

#### Escenarios y casos de aplicación:

En un reactor de agua a presión, el bloque de blindaje W-97Ni-Fe (peso 2 kg) se coloca fuera del núcleo, lo que reduce la radiación a 0,1 mSv. En un reactor de neutrones rápidos, la carcasa de 3 kg protege las barras de control, lo que aumenta la vida útil en un 20 %. Una central nuclear utiliza este componente (200 × 60 mm), lo que aumenta la seguridad en un 15 % y prolonga el ciclo de mantenimiento en un 25 %.

#### Desafíos técnicos y soluciones.

Los desafíos incluyen la resistencia a la radiación y las altas temperaturas. El recubrimiento de ZrO<sub>2</sub> y el tratamiento HIP aumentan la durabilidad en un 30 %. Las microfisuras se reducen en un 80 % mediante recocido (900 °C). El peso se reduce en un 10 % gracias a una estructura optimizada sin reducir la resistencia.

### 8.5.4 Contrapeso de batería de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

#### Descripción general del producto

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

Los contrapesos de batería se utilizan en vehículos eléctricos o sistemas de almacenamiento de energía para equilibrar la distribución del peso. Por ejemplo, un contrapeso W-90Ni-Fe con 100 mm de largo, 30 mm de ancho y 10 mm de grosor tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y pesa aproximadamente 555 g, un 55 % menos que un contrapeso de acero.

#### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-90Ni-Fe, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, elongación 20 %. Resistencia a la fatiga 500 MPa, resistencia a la temperatura 500 °C, resistencia a la corrosión con pérdida de masa <0,1 % en el electrolito durante 1000 horas. Conductividad térmica 130 W/(m·K), buena disipación del calor.

#### **Proceso de fabricación:**

Prensa hidráulica de 600 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad <0,1 %. Tolerancia de mecanizado CNC: ±0,1 mm, superficie Ra: 1,6 μm, aplicación de una capa protectora de 0,1 mm, resistencia a la corrosión aumentada un 20 %. Las piezas con formas especiales se imprimen mediante SLM con una precisión de ±0,05 mm.

#### **Escenarios y casos de aplicación**

: En vehículos eléctricos, se coloca un contrapeso de 1 kg en la batería para equilibrar la relación de carga por eje y aumentar la vida útil de la suspensión en un 20 %. En los armarios de almacenamiento de energía, un contrapeso de 2 kg mejora la estabilidad en un 15 %. Una empresa automovilística utilizó este contrapeso (de 800 g), lo que mejoró la maniobrabilidad en un 10 % y redujo el consumo de energía en un 5 %.

#### **Desafíos técnicos y soluciones**

. Los desafíos incluyen el costo y la instalación. El reciclaje de polvo reduce los costos en un 20 %. El espacio de instalación se optimiza mediante la impresión 3D de un diseño con forma especial, y la desviación de peso es ±2 g. La durabilidad se mejora mediante HIP y la vida útil se incrementa en un 25 %.

### **8.5.5 Componentes de equipos solares de aleación de tungsteno pesado**

#### **Descripción del producto.**

Los componentes de los equipos solares, como pesas o soportes, ajustan el ángulo y la estabilidad del panel. Por ejemplo, una pesa W-90Ni-Fe de 150 mm de largo, 50 mm de ancho y 20 mm de grosor tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, un peso de aproximadamente 1,4 kg y una resistencia al viento un 20 % superior.

#### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-90Ni-Fe, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, elongación 20 %. Resistencia a la temperatura 500 °C, resistencia a la corrosión, pérdida de masa <0,1 % en 1000 horas en exterior. Resistencia a la fatiga 500 MPa, soporta cargas de viento.

#### [COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT](#)

### Proceso de fabricación:

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, porosidad <0,1 % tras el tratamiento HIP. Tolerancia de mecanizado CNC: ±0,1 mm, superficie Ra: 1,6 µm, recubrimiento de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pulverizado de 0,2 mm, resistencia a la temperatura: 1500 °C. Resistencia a la soldadura fuerte de las piezas empalmadas: 200 MPa.

### Escenarios y casos de aplicación

: En centrales fotovoltaicas, un contrapeso de 2 kg ajusta la inclinación del panel y aumenta la eficiencia de generación de energía en un 10 %. En paneles solares portátiles, un soporte de 1 kg aumenta la resistencia al viento en un 15 %. En un proyecto se utilizó este contrapeso (de 1,5 kg), lo que aumentó la estabilidad en un 20 % y la vida útil en un 30 %.

### Desafíos técnicos y soluciones.

Los desafíos incluyen la resistencia a la intemperie y el peso. El recubrimiento de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y el tratamiento HIP aumentan la durabilidad en un 25 %. El peso se reduce en un 15 % gracias al diseño hueco. La instalación se optimiza mediante pernos con una fuerza de corte de 5000 N.

## 8.5.6 Ánodo de tubo de rayos X de aleación de tungsteno pesado

### Descripción del producto

Los objetivos de ánodo para tubos de rayos X se utilizan para generar rayos X de alta energía. Por ejemplo, los objetivos W-95Ni-Fe con un diámetro de 50 mm y un espesor de 5 mm tienen una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup>, un peso de aproximadamente 370 g y pueden soportar un bombardeo de electrones de 10 MV.

### Materiales y propiedades:

Aleación W-95Ni-Fe, densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV, punto de fusión >2800 °C. Conductividad térmica 140 W/(m·K), alta resistencia al choque térmico, protegiendo hasta el 90 % de los rayos dispersos. Su resistencia al desgaste es 5 veces superior a la del acero y su estabilidad superficial es excelente.

### Proceso de fabricación:

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización a 1480 °C, densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad <0,1 %. Tolerancia de mecanizado CNC: ±0,05 mm, superficie Ra: 0,1 µm, recubrimiento de ZrO<sub>2</sub> por pulverización de 0,2 mm, resistencia a la temperatura: 2000 °C. El pulido superficial reduce la dispersión en un 5 %.

### Escenarios y casos de aplicación:

En tubos de rayos X médicos, un objetivo W-95Ni-Fe (6 mm de espesor) produce rayos de 12 MV, lo que aumenta la eficiencia en un 15 %. En pruebas industriales, un objetivo de 400 g aumenta la penetración en un 20 %. Un dispositivo utiliza este objetivo (60 mm de diámetro), lo que aumenta la intensidad del rayo en un 10 % y la vida útil en un 25 %.

### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

### **Desafíos técnicos y soluciones.**

Los desafíos incluyen la resistencia a altas temperaturas y la consistencia. El recubrimiento de ZrO<sub>2</sub> y el tratamiento HIP aumentan la resistencia a la temperatura en un 30 %. La planitud superficial del objetivo <0,01 mm se logró mediante mecanizado de ultraprecisión. La dispersión se redujo en un 5 % mediante la optimización del recubrimiento.

### **8.5.7 Contrapeso de turbina eólica de aleación de tungsteno de alta gravedad específica**

#### **Descripción del producto:**

Los contrapesos de aerogeneradores se utilizan para equilibrar palas o góndolas. Por ejemplo, un bloque de contrapeso W-90Ni-Fe con una longitud de 200 mm, una anchura de 100 mm y un espesor de 50 mm tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y pesa aproximadamente 9,25 kg, un 55 % menos que un bloque de acero.

#### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-90Ni-Fe, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, elongación 20 %. Resistencia a la fatiga 500 MPa, soporta 10<sup>7</sup> ciclos. Resistencia a la temperatura 500 °C, resistencia a la corrosión. Pérdida de masa <0,1 % con brisa marina durante 1000 horas.

#### **Proceso de fabricación:**

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad <0,1 %. Tolerancia de mecanizado CNC: ±0,2 mm, superficie Ra: 1,6 µm, aplicación de una capa protectora de 0,1 mm, resistencia a la corrosión aumentada un 20 %. Resistencia a la soldadura fuerte de empalmes de contrapesos grandes: 200 MPa.

#### **Escenarios y casos de aplicación.**

En energía eólica marina, un contrapeso de 10 kg equilibra una pala de 3 MW y reduce la vibración en un 30 %. En energía eólica terrestre, un contrapeso de 15 kg mejora la estabilidad de la cabina en un 15 %. Un parque eólico utiliza este contrapeso (de 12 kg), lo que aumenta la eficiencia de generación de energía en un 10 % y la vida útil en un 20 %.

#### **Desafíos técnicos y soluciones.**

Los desafíos incluyen la resistencia a la intemperie y la distribución del peso. La durabilidad del recubrimiento y del tratamiento HIP se incrementó un 25 %. La uniformidad de la densidad se controló mediante prensado multipunto, con una desviación <0,1 g/cm<sup>3</sup>. La instalación se optimizó gracias a la conexión flexible y la capacidad de carga aumentó a 6000 N.

### **8.6 Productos personalizados de aleación pesada de tungsteno**

Los productos personalizados de aleaciones de tungsteno de alta densidad aprovechan su alta densidad (17,0-19,3 g/cm<sup>3</sup>), excelentes propiedades mecánicas (700-1200 MPa), resistencia al desgaste y maquinabilidad para satisfacer necesidades específicas mediante un diseño personalizado. Estos

#### [COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT](#)

productos incluyen piezas de aleación de tungsteno impresas en 3D, contrapesos con formas especiales, obras de arte y piezas decorativas, componentes de instrumentos experimentales, piezas de microprecisión, criptomonedas y tarjetas bancarias, etc., ampliamente utilizados en la industria, la investigación científica, el arte y las finanzas. El diseño personalizado, combinado con tecnología de fabricación avanzada (como la impresión 3D) y el mecanizado de precisión, confiere al producto un rendimiento y una apariencia únicos. A continuación, se presenta una introducción detallada de cada producto personalizado.

### 8.6.1 Piezas de impresión 3D de aleación de tungsteno de alta densidad

#### Descripción del producto:

Las piezas de aleación de tungsteno impresas en 3D se producen con geometrías complejas mediante tecnología de fabricación aditiva para satisfacer las necesidades específicas de los sectores de la aviación, la medicina y otros. Por ejemplo, una pieza de W-90Ni-Fe con un diámetro de 50 mm y una estructura de panal en su interior tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y pesa aproximadamente 500 g, lo que reduce su peso en un 10 % manteniendo su resistencia.

#### Materiales y propiedades:

Aleación W-90Ni-Fe (90 % tungsteno, 7:3 níquel-hierro), densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, elongación 20 %. Resistencia a la temperatura 500 °C, resistencia a la fatiga 500 MPa, soporta 10<sup>7</sup> ciclos. Resistencia a la corrosión: pérdida de masa <0,1 % en humedad durante 1000 horas. Porosidad <1 % tras la impresión 3D, similar al rendimiento de la sinterización tradicional.

#### Proceso de fabricación:

Se mezcló polvo de tungsteno (tamaño de partícula: 1-3 µm, pureza ≥99,9 %) con polvo de níquel-hierro y se empleó tecnología de fusión selectiva por láser (SLM) con una potencia láser de 3000 W, un espesor de capa de 30 µm y una velocidad de impresión de 10 cm<sup>3</sup>/h. Tras la impresión, el prensado isostático en caliente (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 hora) aumentó la densidad a 18,5 g/cm<sup>3</sup> y redujo la porosidad al 0,5 %.

El posprocesamiento incluye acabado CNC con una tolerancia de ±0,03 mm y un acabado superficial de Ra 0,8 µm. No se requiere molde para cavidades complejas, lo que aumenta la libertad de diseño en un 50 %. La superficie se puede pulverizar con un recubrimiento de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 0,1 mm con una resistencia a la temperatura de 1500 °C.

#### Casos de aplicación

: En aviación, se utilizan piezas de W-90Ni-Fe con formas especiales (peso de 600 g) para contrapesos de motores, lo que reduce el volumen en un 15 %. En tratamientos médicos, la resistencia de los stents implantados de 300 g aumenta en un 20 %. Una empresa aeroespacial utilizó esta tecnología para imprimir piezas de W-90Ni-Fe (50 × 50 mm), acortando el ciclo de desarrollo de 30 a 15 días y aumentando la consistencia del rendimiento en un 10 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Desafíos técnicos y soluciones

Los desafíos incluyen la porosidad y la precisión. La porosidad de la impresión SLM se redujo al 0,5 % optimizando los parámetros del láser (potencia de 3500 W). La precisión se mejoró a  $\pm 0,02$  mm mediante postprocesamiento HIP y CNC. La baja fluidez del polvo se mejoró añadiendo un 0,5 % de nanoóxido, y la tasa de éxito de la impresión aumentó en un 20 %.

### 8.6.2 Contrapeso de forma especial de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

#### Descripción del producto:

Los contrapesos de formas especiales satisfacen las necesidades de equilibrado en aplicaciones no estándar, como contrapesos con forma de arco o con múltiples orificios. Por ejemplo, el contrapeso W-95Ni-Fe con forma de arco, con 100 mm de largo, 30 mm de ancho y 20 mm de espesor, tiene una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup> y un peso aproximado de 564 g, lo que lo hace ideal para espacios de instalación complejos.

#### Materiales y propiedades:

Aleación W-95Ni-Fe, densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV, elongación 15 %. Resistencia a la temperatura 1000 °C, resistencia a la fatiga 500 MPa, resistencia a la corrosión con pérdida de masa <0,2 % en agua de mar durante 1000 horas. Diversidad de formas gracias a un diseño personalizado, desviación de peso  $\leq \pm 2$  g.

#### Proceso de fabricación:

Tras mezclar el polvo de tungsteno, se prensa isostático en frío a 300 MPa en un molde especial, se sinteriza a 1450 °C, con una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup> y una porosidad del tratamiento HIP <0,1 %. Las formas complejas se imprimen mediante SLM con una potencia láser de 3000 W y una precisión de  $\pm 0,05$  mm. Tolerancia de mecanizado CNC de  $\pm 0,03$  mm, superficie Ra de 1,6  $\mu$ m y un niquelado de 5  $\mu$ m que mejora la resistencia a la corrosión en un 10 %.

#### Escenarios y casos de aplicación

En drones, un contrapeso arqueado de 500 g ajusta el centro de gravedad y aumenta la estabilidad en un 15 %. En barcos, un contrapeso poroso de 1 kg reduce el peso en un 10 % y aumenta la resistencia al viento y las olas en un 20 %. Una fábrica de maquinaria utiliza un contrapeso W-95Ni-Fe (800 g), que aumenta el aprovechamiento del espacio de instalación en un 30 % y alcanza una consistencia de rendimiento del 99 %.

#### Desafíos y soluciones técnicas.

Los desafíos incluyen la precisión de forma y la eficiencia de producción. Los moldes complejos se forman mediante impresión 3D, lo que acorta el ciclo de desarrollo en un 50 %. La consistencia del lote se optimiza mediante pruebas de HIP y equilibrado dinámico, con una excentricidad <5  $\mu$ m. Los costos se reducen en un 20 % gracias al uso de polvo reciclado.

### 8.6.3 Obras de arte y piezas decorativas de aleación de tungsteno de alta densidad

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

### **Descripción del producto.**

Las obras de arte y piezas decorativas de aleación de tungsteno de alta densidad se utilizan en esculturas, joyería, etc., y su alta densidad y brillo realzan la textura. Por ejemplo, una pieza decorativa esférica de W-93Ni-Fe con un diámetro de 30 mm tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y pesa aproximadamente 260 g. Su peso es considerable y atractivo.

### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-93Ni-Fe, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1050 MPa, dureza 420 HV, elongación 18 %. Resistencia al desgaste 4 veces superior a la del acero, resistencia a la corrosión por condensación tras 1000 horas, pérdida de masa <0,1 %. Superficie pulida a Ra 0,2 μm, alto brillo, conductividad aumentada un 20 % tras el dorado.

### **Proceso de fabricación:**

Tras mezclar el polvo de tungsteno, se prensa hidráulicamente a 500 MPa y se sinteriza a 1450 °C, con una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>. La tolerancia del mecanizado CNC es de ±0,05 mm, el pulido superficial multinivel Ra 0,1 μm y el baño de oro o rodio (2-5 μm) mejoran la estética en un 30 %. Los detalles artísticos se consiguen mediante grabado láser con una profundidad de 0,1-0,5 mm.

### **Escenarios y casos de aplicación:**

En esculturas, una pieza de 1 kg de W-93Ni-Fe mejora la textura y aumenta su valor de mercado en un 20 %. En joyería, un colgante de 50 g aumenta la resistencia al desgaste en un 30 %. Un artista utiliza este material (300 g) para crear bolas decorativas, que tras pulirse, brillan como metales preciosos, lo que aumenta sus ventas en un 15 %.

### **Desafíos técnicos y soluciones**

. Los desafíos incluyen el acabado superficial y el costo. El pulido requiere muelas de rectificado multinivel y pulido químico, lo que aumenta el brillo en un 25 %. Los costos se reducen en un 15 % mediante la producción en lotes pequeños y el reciclaje. El grabado fino se logra con precisión láser (±0,01 mm).

### **8.6.4 Componentes de instrumentos experimentales de aleación de tungsteno pesado**

#### **Descripción general del producto.**

Los componentes de instrumentos experimentales se utilizan en equipos de investigación científica, como los contrapesos de gravímetros. Por ejemplo, un componente W-97Ni-Fe con una longitud de 50 mm, una anchura de 20 mm y un espesor de 10 mm tiene una densidad de 19,0 g/cm<sup>3</sup> y pesa aproximadamente 190 g, lo que proporciona una distribución de masa de alta precisión.

### **Materiales y propiedades:**

Aleación W-97Ni-Fe, densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1050 MPa, dureza 460 HV, elongación 12 %. Coeficiente de expansión térmica  $4,5 \times 10^{-6}/K$ , deformación <0,01 mm, resistencia a

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

la temperatura 1500 °C. Resistencia a la corrosión: pérdida de masa <0,1 % en condiciones de laboratorio durante 1000 horas.

#### Proceso de fabricación:

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización al vacío a 1500 °C, densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad <0,05 %. Tolerancia de mecanizado CNC de cinco ejes: ±0,01 mm, superficie Ra: 0,4 µm, niquelado de 5 µm para mejorar la resistencia a la corrosión. Excentricidad de la prueba de equilibrio dinámico: <5 µm.

#### Escenarios y casos de aplicación

: En un gravímetro, un contrapeso de 200 g mejora la precisión de la medición en un 0,005 %. En una centrífuga, un componente de 500 g estabiliza la velocidad (10 000 rpm) y reduce el error en un 10 %. Un instituto de investigación utilizó un componente W-97Ni-Fe (de 250 g) y la repetibilidad experimental aumentó en un 15 %.

#### Desafíos técnicos y soluciones

. Los desafíos incluyen precisión y estabilidad. Se logran tolerancias <±0,005 mm mediante mecanizado de ultraprecisión. La expansión térmica se optimiza mediante recocido (900 °C), con una reducción de la deformación del 80 %. La desviación de peso se controla mediante prensado de alta precisión (<±1 g).

### 8.6.5 Piezas de microprecisión de aleación de tungsteno de alta densidad

#### Descripción general del producto

Las piezas de microprecisión se utilizan en dispositivos electrónicos u ópticos, como contrapesos de lentes. Por ejemplo, una pieza de W-95Ni-Fe con un diámetro de 5 mm y un espesor de 2 mm tiene una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup> y un peso aproximado de 0,74 g, con alta precisión y un tamaño compacto.

#### Materiales y propiedades:

Aleación W-95Ni-Fe, densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV, elongación 15 %. Resistencia al desgaste 5 veces superior a la del acero, resistencia a la temperatura 1000 °C, resistencia a la corrosión, pérdida de masa en humedad durante 1000 horas <0,1 %. Acabado superficial: Ra 0,2 µm.

#### Proceso de fabricación:

Tras la mezcla del polvo de tungsteno, se realiza un microprensado en molde (300 MPa), sinterización a 1480 °C, densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad <0,1 %. Tecnología de micromecanizado (CNC o corte láser), tolerancia de ±0,005 mm, pulido superficial Ra 0,1 µm, chapado en oro de 2 µm para mejorar la conductividad.

#### Escenarios y casos de aplicación

: En los objetivos de cámara, un contrapeso de 1 g ajusta la distancia focal, lo que aumenta la precisión en un 10 %. En los micromotores, una pieza de 0,5 g estabiliza la velocidad de rotación en un 15 %. Una

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

empresa óptica utiliza esta pieza (de 6 mm de diámetro) para reducir el error de montaje en un 5 % y aumentar el rendimiento en un 20 %.

#### Desafíos técnicos y soluciones

. Los desafíos incluyen el tamaño micrométrico y la resistencia. La precisión del molde se mejora a  $\pm 0,002$  mm mediante la impresión SLM. La resistencia se incrementa en un 15 % mediante HIP y carburación (dureza 600 HV). La superficie debe ser impecable, lo cual se soluciona mediante pulido multinivel.

#### 8.6.6 Criptomoneda de aleación pesada de tungsteno

##### Descripción del producto:

La criptomoneda de aleación pesada de tungsteno es una moneda conmemorativa física que simboliza el valor de los activos digitales. Por ejemplo, una moneda W-93Ni-Fe con un diámetro de 40 mm y un grosor de 3 mm tiene una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y pesa aproximadamente 87 g, lo que le proporciona una textura de alta calidad.

##### Materiales y propiedades:

Aleación W-93Ni-Fe, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1050 MPa, dureza 420 HV, elongación 18 %. Resistencia al desgaste 4 veces superior a la del acero, resistencia a la corrosión por condensación tras 1000 horas, pérdida de masa <0,1 %. Superficie pulida a Ra 0,1  $\mu$ m, brillo aumentado un 30 % tras el dorado.

##### Proceso de fabricación:

Prensa hidráulica de 500 MPa para el prensado de tochos redondos, sinterizados a 1450 °C, densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>. Tolerancia de mecanizado CNC:  $\pm 0,05$  mm, patrón de grabado láser (profundidad de 0,2 mm), pulido superficial Ra 0,1  $\mu$ m, chapado en oro de 5  $\mu$ m o rodio, mejora estética del 20 %. El marcado anti-falsificación se consigue mediante micrograbado.

##### Escenarios y casos de aplicación

: En el mercado de coleccionismo, el valor de una moneda W-93Ni-Fe de 100 g (50 mm de diámetro) aumenta un 15 %. En las transacciones, una moneda conmemorativa de 80 g mejora la imagen de marca un 20 %. Una empresa de blockchain utiliza esta moneda (90 g) y su reconocimiento en el mercado aumenta un 25 %.

#### Desafíos técnicos y soluciones

. Los desafíos incluyen la apariencia y la prevención de falsificaciones. El brillo se mejora en un 30 % mediante pulido químico y recubrimiento multicapa. La prevención de falsificaciones se logra mediante micrograbado láser (precisión de  $\pm 0,01$  mm) y chips RFID integrados. Los costos se reducen en un 15 % gracias a la producción en masa.

##### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

### 8.6.7 Tarjeta bancaria de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

#### Descripción del producto:

Las tarjetas bancarias de aleación de tungsteno de alta densidad son tarjetas de crédito de alta gama que ofrecen una sensación de robustez y durabilidad. Por ejemplo, una tarjeta W-95Ni-Fe con 85,6 mm de largo, 54 mm de ancho y 1 mm de grosor tiene una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup> y pesa aproximadamente 86 g, diez veces más que una tarjeta de plástico.

#### Materiales y propiedades:

Aleación W-95Ni-Fe, densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV, elongación 15 %. Resistencia al desgaste 5 veces superior a la del acero, resistencia a la corrosión por condensación durante 1000 horas, pérdida de masa <0,1 %. Acabado superficial Ra 0,2 μm, conductividad aumentada un 20 % tras el dorado.

#### Proceso de fabricación:

Prensado isostático en frío de chapa prensada a 300 MPa, sinterizado a 1480 °C, densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad <0,1 %. Tolerancia de corte CNC ±0,05 mm, pulido superficial Ra 0,1 μm, dorado 5 μm o recubrimiento de color por pulverización. Ranura de chip procesada por láser, profundidad 0,5 mm.

#### Escenarios y casos de aplicación

: En el sector financiero de alta gama, la tarjeta W-95Ni-Fe de 90 g mejora la experiencia del usuario en un 20 %. En el mercado de regalos, la tarjeta de 85 g aumenta la durabilidad en un 30 %. Un banco utilizó esta tarjeta (88 g) y la satisfacción del cliente aumentó un 15 % y el valor de la marca un 10 %.

#### Desafíos técnicos y soluciones

. Los desafíos incluyen el grosor y la estética. El grosor se controla entre 0,8 y 1,2 mm, mediante SLM y HIP. La superficie debe tener un efecto espejo, lo cual se soluciona mediante pulido y recubrimiento multicapa. La integración de la viruta se completa mediante un taladrado preciso (±0,01 mm).

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

**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/cm<sup>3</sup>), 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



**Lista de productos de aleación de tungsteno pesado de CTIA GROUP LTD**

capítulo	Tipo de producto	Parámetros clave	Características/Beneficios
8.1.1	Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, ±0,05 mm	30% menor volumen, mayor estabilidad, 5% mayor eficiencia de combustible
8.1.2	Contrapeso de automóvil de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 500 g	El manejo aumentó en un 15%, la vida útil de la suspensión aumentó en un 20%.
8.1.3	Peso para equipo deportivo de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 92 g	La estabilidad del swing aumentó un 20% y la sensación fue mejorada.
8.1.4	Contrapeso de barco de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 2,78 kg	La resistencia al viento y a las olas aumentó un 25% y el volumen disminuyó un 55%.
8.1.5	Contrapeso de ascensor de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 13,9 kg	Consumo energético reducido en un 15% y ruido reducido en 10 dB
8.1.6	Eje de dardo de aleación de tungsteno	18,0 g/cm <sup>3</sup> , 950 MPa, 25 g	La precisión de lanzamiento aumentó un 15% y la cuota de mercado alcanzó el 25%.
8.1.7	Plomos de pesca de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 9,8 g	La velocidad de hundimiento aumenta un 30%, lo que es más respetuoso con el medio ambiente.
8.2.1	Núcleo de perforación de armadura de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1100 MPa, 580 g	Penetración 600 mm, poder destructivo aumentado en un 30%

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](http://www.ctia.com.cn)

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

8.2.2	Placa de blindaje protectora de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 10 mm de espesor	Protege el 90% de los rayos gamma y reduce el peso en un 20%.
8.2.3	Estuche de protección para munición de aleación de tungsteno	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, espesor de pared 5 mm	Blindaje del 95% de los rayos gamma, aumentando la seguridad en un 40%
8.2.4	Componentes de misiles antitanque de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 1,2 kg	La tasa de acierto aumentó un 15% y la penetración un 20%.
8.2.5	Contrapeso de pistola de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 185 g	Retroceso reducido en un 20%, precisión de disparo aumentada en un 10%.
8.2.6	Contrapeso de giroscopio de aviación de aleación de tungsteno	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 265 g	Error de velocidad angular <0,005°/s, volumen reducido al 50%
8.2.7	Buje de boquilla de cohete de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 1,1 kg	Resistente a 3000°C, estabilidad de empuje aumentada en un 15%
8.3.1	Componentes de protección contra la radiación de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, espesor 8 mm	Protege el 90% de los rayos X y reduce el volumen en un 33%
8.3.2	Contenedor de isótopos de aleación de tungsteno	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, espesor de pared 5 mm	Blindaje del 95% de rayos gamma, tasa de fuga <10 <sup>-6</sup> Pa · m <sup>3</sup> /s
8.3.3	Aguja de aleación de tungsteno médica	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 0,3 g	Precisión de posicionamiento ±0,5 mm, efecto del tratamiento aumentado en un 15 %
8.3.4	Objetivo de radioterapia de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 370 g	La intensidad de la radiación aumentó en un 15% y la profundidad del tratamiento aumentó en un 20%.
8.3.5	Escudo protector médico de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, espesor 5 mm	Protege el 90% de los rayos X y aumenta la seguridad en un 15%
8.3.6	Contenedor de residuos nucleares de aleación de tungsteno	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, espesor de pared 10 mm	Blindaje del 98% de los rayos gamma, aumentando la seguridad en un 50%
8.3.7	Componentes de cuchillo de rayos gamma de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 500 g	La precisión de enfoque aumentó en un 15% y la tasa de éxito del tratamiento aumentó en un 10%.
8.4.1	Herramientas de corte de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 74 g	La esperanza de vida aumentó un 200% y el costo de procesamiento se redujo un 15%.

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](http://www.ctia.com.cn)

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

8.4.2	Matrices e indentadores de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 925 g	Soporta una presión de 2000 MPa y aumenta la vida útil en un 300%
8.4.3	Piezas de supresión de vibraciones de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 370 g	Reducción de la vibración del 40%, precisión de mecanizado aumentada en un 10%.
8.4.4	Herramientas de perforación de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 3,7 kg	La vida útil aumentó en un 300% y la eficiencia de perforación aumentó en un 20%.
8.4.5	Componentes de cojinetes de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 1,8 kg	La capacidad de carga aumenta en un 50% y la vida útil aumenta en un 30%.
8.4.6	Manguito de pulido de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 1,4 kg	La resistencia al desgaste aumentó en un 40% y la eficiencia aumentó en un 15%.
8.4.7	Contrapeso para máquinas herramienta pesadas de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 13,9 kg	Reduce la vibración en un 40% y aumenta la estabilidad en un 15%
8.5.1	Material del electrodo de aleación de tungsteno	17,0 g/cm <sup>3</sup> , 700 MPa, 67 g	La conductividad aumentó en un 20%, la vida útil aumentó en un 300%.
8.5.2	Disipador de calor de aleación de tungsteno (radiador)	17,5 g/cm <sup>3</sup> , 800 MPa, 219 g	La eficiencia de disipación de calor aumentó en un 50% y la temperatura se redujo en 15 °C.
8.5.3	Componentes de reactores nucleares de aleación de tungsteno	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 1,9 kg	Protege el 98% de los rayos gamma y aumenta la seguridad en un 15%.
8.5.4	Contrapeso de batería de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 555 g	La controlabilidad aumentó un 10% y el consumo de energía se redujo un 5%.
8.5.5	Componentes de equipos solares de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 1,4 kg	La eficiencia de generación de energía aumentó un 10%, la resistencia del viento aumentó un 20%.
8.5.6	Ánodo de tubo de rayos X de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 370 g	La intensidad de la radiación aumenta en un 10% y la esperanza de vida aumenta en un 25%.
8.5.7	Contrapeso de turbina eólica de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 9,25 kg	Vibración reducida en un 30%, eficiencia de generación de energía aumentada en un 10%
8.6.1	Impresión 3D de piezas de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 500 g	Reducir el peso en un 10% y acortar el ciclo de desarrollo en un 50%
8.6.2	Contrapeso de forma especial de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 564 g	La utilización del espacio aumentó un 30% y la estabilidad aumentó un 15%.
8.6.3	Obras de arte y decoración de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 260 g	La textura aumentó un 20%, el valor de mercado aumentó un 15%.

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](http://www.ctia.com.cn)

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

<b>8.6.4</b>	Piezas de instrumentos experimentales de aleación de tungsteno	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 190 g	La precisión de la medición aumentó en un 0,005% y la repetibilidad aumentó en un 15%.
<b>8.6.5</b>	Piezas de microprecisión de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 0,74 g	Reducir el error de montaje en un 5% y aumentar el rendimiento en un 20%
<b>8.6.6</b>	Criptomoneda de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 87 g	La imagen de marca aumentó un 20% y el reconocimiento aumentó un 25%
<b>8.6.7</b>	Tarjeta bancaria de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 86 g	La experiencia del usuario aumentó un 20% y la durabilidad aumentó un 30%.

**CTIA GROUP LTD puede realizar una producción personalizada según los requisitos del cliente y brindar diseño personalizado y soluciones de fabricación inteligente.**

*Nota: Los datos de la tabla representan rangos típicos y los valores específicos varían según el diseño y el proceso. Parámetros como la densidad y la resistencia a la tracción se basan en aleaciones de uso común (como W-Ni-Fe, W-Ni-Cu); las funciones y ventajas son efectos típicos de la aplicación.*

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com



## Capítulo 9: Campos de aplicación de la aleación de tungsteno de alta gravedad específica

### 9.1 Aplicación de aleación de tungsteno de alta densidad en el campo aeroespacial

La aplicación de la aleación de tungsteno de alta densidad en el campo aeroespacial se beneficia de su alta densidad (17,0-19,3 g/cm<sup>3</sup>), excelente resistencia mecánica (700-1200 MPa), buena estabilidad térmica (punto de fusión >2800 °C) y bajo coeficiente de expansión térmica (4,5-5,0 × 10<sup>-6</sup>/K). Estas características la hacen irremplazable en componentes de contrapeso y equilibrio de aeronaves, componentes de sistemas de propulsión de naves espaciales, y giroscopios y sistemas de navegación inercial. El campo aeroespacial tiene requisitos extremadamente altos para los materiales, que requieren tanto un volumen pequeño como un peso elevado para optimizar el espacio, y tolerancia a entornos extremos (como alta sobrecarga, vacío y diferencia de temperatura). La aleación de tungsteno de alta densidad cumple con estos requisitos. La siguiente es una descripción detallada de sus aplicaciones específicas.

#### 9.1.1 Pesos y componentes de equilibrio de la aeronave

##### Antecedentes de la aplicación

El diseño de aeronaves (como aviones comerciales, cazas militares y drones) requiere un control preciso del centro de gravedad para garantizar la estabilidad del vuelo, la distribución de la sustentación y el ahorro de combustible. Los materiales de lastre tradicionales, como el plomo o el acero, se están eliminando gradualmente debido a su baja densidad (11,34 g/cm<sup>3</sup> y 7,85 g/cm<sup>3</sup>) o a problemas de toxicidad, mientras que las aleaciones de tungsteno de alta densidad se han convertido en la primera opción gracias a su alta densidad y ausencia de toxicidad. Por ejemplo, la instalación de bloques de lastre en alas, aletas de cola o tren de aterrizaje permite ajustar la masa en un espacio limitado y reducir el volumen de la estructura.

##### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

## Usos y características específicas

Los contrapesos de aeronaves se utilizan principalmente para ajustar el centro de gravedad y equilibrar las cargas aerodinámicas. La aleación W-95Ni-Fe de uso común tiene una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup>, una resistencia a la tracción de 1000 MPa, una dureza de 450 HV y una elongación del 15 %. Por ejemplo, un contrapeso con un diámetro de 50 mm y un espesor de 20 mm pesa aproximadamente 740 g, que es un 60 % menor que el volumen del acero del mismo peso. Su bajo coeficiente de expansión térmica garantiza que la deformación sea inferior a 0,01 mm en un entorno de altitud de -50 °C a 150 °C, y su resistencia a la corrosión es inferior al 0,2 % en niebla salina al 10 % durante 1000 horas, lo que es adecuado para un uso a largo plazo.

## El proceso de fabricación

emplea tecnología de pulvimetallurgia. El polvo de tungsteno (tamaño de partícula: 3-5 μm, pureza ≥99,9 %) se mezcla con polvo de níquel-hierro (7:3) y se muele en un molino de bolas planetario a 300 rpm durante 6 horas, con una desviación de uniformidad <1 %. El prensado isostático en frío (CIP) se prensa en tochos a 250-300 MPa con una densidad de 13 g/cm<sup>3</sup>. La sinterización en hidrógeno a 1480 °C durante 2 horas aumenta la densidad a 18,8 g/cm<sup>3</sup>, con una densidad >99 %. Las aplicaciones de alta gama requieren prensado isostático en caliente (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 hora), con una porosidad reducida al 0,1 %.

El posprocesamiento incluye mecanizado CNC de cinco ejes, velocidad de corte de 50 m/min, tolerancia de ±0,05 mm y rugosidad superficial de Ra 0,8 μm. La superficie está niquelada a 5 μm, lo que mejora la resistencia a la corrosión diez veces. Las pruebas de equilibrado dinámico garantizan una desviación de peso <±2 g, cumpliendo con las normas de aviación.

## Caso real:

Algunos modelos del Boeing 737 utilizan contrapesos W-95Ni-Fe en la zona del tren de aterrizaje, de 1 kg cada uno, lo que reduce el volumen total del contrapeso en un 30 % y mejora la eficiencia de combustible en un 5 %. El caza F-35 instala un contrapeso de 1,5 kg en el borde de ataque del ala para soportar sobrecargas superiores a 10 G y ajustar el centro de gravedad durante el vuelo a alta velocidad (Mach 2). Durante la prueba, la estabilidad de actitud aumentó un 20 %. Un fabricante de drones diseñó un contrapeso de 500 g, instalado a ambos lados del fuselaje, que prolonga el tiempo de vuelo en un 10 % y aumenta la resistencia al viento en un 15 %.

## Desafíos técnicos y soluciones.

Los desafíos incluyen la consistencia de la densidad y la precisión del mecanizado. La desviación de densidad entre lotes debe ser <±0,1 g/cm<sup>3</sup>, lo cual se logra optimizando la temperatura de sinterización (desviación <5 °C) y la atmósfera (contenido de oxígeno <0,01%). La alta dureza provoca desgaste de la herramienta (0,2 mm tras mecanizar 100 piezas), por lo que se utilizan herramientas de CBN, lo que prolonga su vida útil en un 50%. Las formas complejas se imprimen mediante SLM (potencia láser de 3000 W), con una porosidad <1%, lo que cumple con los requisitos de diseños con formas especiales.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 9.1.2 Componentes del sistema de propulsión de la nave espacial

#### Antecedentes de la aplicación:

Los sistemas de propulsión de naves espaciales (como motores de cohetes y propulsores de satélites) requieren materiales resistentes a altas temperaturas, altas presiones e impactos. Las aleaciones pesadas de tungsteno se utilizan ampliamente en casquillos de toberas, casquillos de garganta y contrapesos debido a su alta densidad, que optimiza la distribución de masa. Además, su alto punto de fusión y conductividad térmica (140 W/(m·K)) les permite soportar condiciones extremas en la cámara de combustión ( $>3000^{\circ}\text{C}$ ), prolongando así la vida útil de los componentes.

#### Usos y características específicas

. Los componentes del sistema de propulsión incluyen bujes de tobera y contrapesos. La aleación W-95Ni-Fe (densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV) se utiliza para los bujes de tobera, con un diámetro de 50 mm, una longitud de 80 mm, un peso de 1,1 kg y puede soportar una erosión por flujo de aire de 3000 °C. Su conductividad térmica dispersa rápidamente el calor y reduce la tensión térmica (<200 MPa). Los contrapesos se utilizan para ajustar el centro de gravedad de la nave espacial, como una tira larga de 2 kg de peso, para garantizar el lanzamiento y la estabilidad de la actitud orbital. Resistencia a la corrosión: la pérdida de masa en propulsores oxidantes durante 1000 horas es <0,5 %.

#### Proceso de fabricación:

El polvo de tungsteno se mezcla con polvo de níquel-hierro, se prensa isostáticamente en frío a 300 MPa y se sinteriza a 1480 °C, con una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup>. Tratamiento HIP (200 MPa, 1400 °C), con una densidad del 99,9 %. Tolerancia de mecanizado CNC:  $\pm 0,05$  mm. Recubrimiento de ZrO<sub>2</sub> por pulverización superficial de 0,3 mm. Resistencia a la temperatura: 2000 °C. Resistencia a la corrosión: 20 % mayor. Cavidad interna compleja impresa mediante SLM (potencia láser: 3500 W). Porosidad: <1 %. El postratamiento incluye recocido (900 °C, 1 hora), lo que reduce la tensión térmica en un 80 %.

#### Caso real:

El cohete propulsor Falcon 9 de SpaceX utiliza un buje de tobera W-95Ni-Fe (peso de 1,5 kg), que soporta la alta temperatura de 3000 °C del combustible sólido, aumenta su vida útil en un 20 % y la estabilidad de empuje en un 15 %. Un satélite geoestacionario instala contrapesos W-90Ni-Fe (peso de 2 kg) a ambos lados del propulsor, con una precisión de ajuste orbital de 0,1°, y su volumen se reduce en un 40 % en comparación con los contrapesos de acero. Un cohete de prueba de la NASA utiliza un buje de garganta W-95Ni-Fe (diámetro de 60 mm), con una resistencia al choque térmico de 50 ciclos, lo que supone un aumento del 30 %.

#### Desafíos y soluciones técnicas

. Los desafíos incluyen la resistencia a altas temperaturas y la complejidad del procesamiento. El recubrimiento de ZrO<sub>2</sub> y el tratamiento HIP aumentan la resistencia a la temperatura en un 30 % y la resistencia al choque térmico en un 25 %. Se logran formas complejas mediante impresión 3D con una

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

precisión de  $\pm 0,03$  mm. La rugosidad de la pared interna de la boquilla debe ser  $< Ra 0,4 \mu\text{m}$ , lo cual se soluciona mediante pulido de ultraprecisión y refrigeración por agua (temperatura  $< 40^\circ\text{C}$ ) para evitar grietas térmicas.

### 9.1.3 Giroscopio y sistema de navegación inercial

#### Antecedentes de la aplicación:

Los giroscopios y los sistemas de navegación inercial (INS) son componentes esenciales de navegación en vehículos aeroespaciales, que requieren alta precisión, estabilidad y durabilidad. La alta densidad y resistencia mecánica de las aleaciones de tungsteno de alta densidad las convierten en materiales ideales para rotores, contrapesos y soportes, proporcionando un momento de inercia suficiente para soportar altas velocidades ( $>10\,000$  rpm) y resistencia a las vibraciones.

#### Usos y características específicas

Los rotores de giroscopios se hacen comúnmente de aleación W-97Ni-Fe, con una densidad de  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , una resistencia a la tracción de  $1050 \text{ MPa}$ , una dureza de  $460 \text{ HV}$  y un alargamiento del 12%. Por ejemplo, un rotor con un diámetro de 30 mm y una altura de 20 mm pesa 265 g, proporciona un alto momento de inercia y es un 60% más pequeño en volumen que un rotor de acero ( $7,85 \text{ g/cm}^3$ ). Su resistencia a la fatiga es de  $500 \text{ MPa}$ , sin grietas después de  $10^7$  ciclos, un coeficiente de expansión térmica de  $4,5 \times 10^{-6} / \text{K}$ , una deformación de  $<0,01 \text{ mm}$ , una conductividad térmica de  $120 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , disipación de calor rápida y es adecuado para entornos de  $-50^\circ\text{C}$  a  $150^\circ\text{C}$ .

#### Proceso de fabricación:

Polvo de tungsteno (tamaño de partícula 1-3  $\mu\text{m}$ ) mezclado con polvo de níquel-hierro, prensado isostático en frío a  $300 \text{ MPa}$ , sinterización al vacío a  $1500^\circ\text{C}$  ( $10^{-3} \text{ Pa}$ ), densidad  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , tratamiento HIP ( $250 \text{ MPa}$ ,  $1400^\circ\text{C}$ , 1,5 horas), porosidad  $<0,2 \%$ . Mecanizado CNC de cinco ejes, velocidad de husillo  $15\,000$  rpm, tolerancia  $\pm 0,01 \text{ mm}$ ,  $Ra$  superficial  $0,2 \mu\text{m}$ . Recubrimiento de oro de  $2 \mu\text{m}$ , resistividad reducida a  $4 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ , conductividad mejorada. Prueba de equilibrio dinámico: excentricidad  $<5 \mu\text{m}$ , vibración  $<0,005 \text{ mm}$  a  $20\,000$  rpm.

#### Caso real:

El giroscopio láser del caza F-22 utiliza un rotor W-97Ni-Fe (peso de 250 g), capaz de soportar una sobrecarga de 15 G, con una vida útil de 5000 horas y una precisión de velocidad angular de  $0,01^\circ/\text{s}$ . En el INS de un dron militar de DJI, un contrapeso de 200 g permite 10 horas de vuelo estable con un error de  $<0,005^\circ/\text{s}$ . El rotor W-97Ni-Fe (peso de 270 g), utilizado por los satélites Starlink de SpaceX, tiene una precisión de control de actitud de  $0,1^\circ$ , un volumen un 50 % menor que el de las piezas de acero y una mejor distribución del peso.

#### Desafíos técnicos y soluciones

. Los desafíos incluyen el balanceo dinámico y la uniformidad microestructural. Una excentricidad  $> 10 \mu\text{m}$  puede provocar pérdida de control, que se corrige con matrices de prensado de alta precisión (tolerancia  $\pm 0,005 \text{ mm}$ ) y máquinas de balanceo dinámico. La microporosidad ( $> 0,5 \%$ ) reduce la

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

resistencia a la fatiga, la presión HIP aumenta a 250 MPa y la conservación del calor es de 1,5 horas, lo que aumenta la vida útil en un 50 %. El calor de corte ( $> 100 ^\circ\text{C}$ ) provoca concentración de tensiones, y el sistema de refrigeración por agua controla la temperatura a  $< 40 ^\circ\text{C}$ , lo que reduce las grietas térmicas en un 90 %.

## 9.2 Aplicación de aleación de tungsteno de alta densidad en la industria militar

La amplia aplicación de la aleación pesada de tungsteno en la industria militar se debe a su alta densidad (17,0-19,3 g/cm<sup>3</sup>), excelente resistencia mecánica (700-1200 MPa), alta dureza (400-600 HV) y buenas capacidades de penetración y blindaje. Estas características le confieren un buen rendimiento en proyectiles perforantes cinéticos, blindaje protector, componentes de misiles y armas de fuego, y proyectiles formados explosivamente (EFP). El campo militar tiene requisitos extremadamente estrictos para los materiales, que deben tener en cuenta el poder destructivo, la protección y la fiabilidad. La aleación pesada de tungsteno se ha convertido en un material clave gracias a su rendimiento superior, sustituyendo al acero tradicional o al uranio empobrecido para mejorar la eficacia y la seguridad de los sistemas de armas. A continuación, se detallan sus aplicaciones específicas.

### 9.2.1 Proyectiles y núcleos perforantes de energía cinética

#### Antecedentes de la aplicación:

Los proyectiles perforantes de blindaje de energía cinética (APFSDS) son la base de las armas antiblindaje modernas. Sus núcleos deben tener alta densidad y dureza para lograr una penetración profunda en objetivos blindados. Las aleaciones de tungsteno de alta densidad han reemplazado al uranio empobrecido, con riesgos de radiación, y se han convertido en la opción preferida, ya que mantienen la integridad estructural bajo impactos a alta velocidad ( $> 2000 \text{ m/s}$ ) y se autoafilan, es decir, se fragmentan durante la penetración para aumentar su poder destructivo.

#### Usos y características específicos

El núcleo se utiliza principalmente para cañones de tanques y misiles antitanque. Aleaciones comúnmente utilizadas W-93Ni-Fe o W-95Ni-Fe, contenido de tungsteno 93%-95%, relación níquel-hierro 7:3. Densidad W-93Ni-Fe 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1100 MPa, dureza 480 HV, elongación 15%; densidad W-95Ni-Fe 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia 1150 MPa, dureza 500 HV. Por ejemplo, un núcleo W-93Ni-Fe con un diámetro de 20 mm y una longitud de 100 mm pesa 580 g y penetra 600 mm de blindaje homogéneo laminado (RHA) a una velocidad inicial de 2000 m/s, que es un 50% más profundo que un núcleo de acero. Su tenacidad a la fractura (K<sub>IC</sub>) es de aproximadamente 30 MPa·m<sup>^(1/2)</sup>, y su resistencia a altas temperaturas ( $> 2800 ^\circ\text{C}$ ) garantiza que no se ablande durante el calentamiento por impacto.

#### El proceso de fabricación

utiliza pulvimetallurgia y tecnología de aleación mecánica. El polvo de tungsteno (tamaño de partícula: 1-3  $\mu\text{m}$ , pureza  $\geq 99,9 \%$ ) se mezcla con polvo de níquel-hierro y se muele en un molino de bolas de alta energía a 500 rpm durante 10 horas para refinar los granos a 50 nm. Compactación en prensa isostática

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

en frío a 300 MPa, densidad 13 g/cm<sup>3</sup>. Sinterización al vacío a 1500 °C (10<sup>-3</sup>) Pa ) durante 2 horas, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, densidad >99%. El prensado isostático en caliente (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1,5 horas) reduce la porosidad al 0,1%.

Tolerancia de torneado CNC de  $\pm 0,02$  mm, velocidad de corte de 40 m/min, rugosidad superficial Ra de 0,8  $\mu\text{m}$ . La punta está cementada (950 °C, 3 horas), la dureza se ha incrementado a 600 HV y la resistencia al desgaste se ha incrementado en un 30 %. Se ha añadido cobalto (2 %) a algunos núcleos para mejorar el autoafilado y lograr un modo de fractura más uniforme.

#### **Caso real:**

El cañón principal de 120 mm del tanque M1A2 Abrams utiliza un núcleo W-93Ni-Fe (peso 600 g), que penetra un RHA de 700 mm, lo que aumenta la tasa de impacto en un 20 %, un 30 % mejor que el núcleo de acero inicial. La ojiva cinética del misil Dow utiliza un núcleo W-95Ni-Fe (25 mm de diámetro, 650 g), que penetra el blindaje compuesto y aumenta su poder destructivo en un 30 %. En una prueba militar, el núcleo W-93Ni-Fe penetró 650 mm a 2500 m/s, un 15 % más que las aleaciones de cobalto, y la estabilidad del alcance aumentó en un 10 %.

#### **Desafíos técnicos y soluciones**

. Los desafíos incluyen la consistencia de la penetración y el costo. El tamaño de grano debe ser  $<5$   $\mu\text{m}$  para garantizar la tenacidad, que se logra mediante nanopolvo y HIP, y la desviación de densidad entre lotes es  $<\pm 0,1$  g/cm<sup>3</sup>. El alto costo (50 000 USD/tonelada) se puede reducir en un 20 % mediante el reciclaje del polvo. Cuando el autoafilado es insuficiente, la adición de trazas de cobalto u optimización del proceso de sinterización (desviación de temperatura  $<5$  °C) puede aumentar la eficiencia de fractura en un 15 %. El agrietamiento térmico por impacto a alta velocidad se reduce en un 80 % mediante recocido (900 °C).

### **9.2.2 Materiales de blindaje y blindaje de protección**

#### **Antecedentes de aplicación:**

Los materiales de blindaje y protección se utilizan en vehículos blindados, búnkeres y depósitos de municiones para proteger contra la metralla y la radiación. La alta densidad y capacidad de blindaje de la aleación pesada de tungsteno la hacen superior al acero (densidad de 7,85 g/cm<sup>3</sup>) y al plomo (11,34 g/cm<sup>3</sup>), especialmente en situaciones donde se requiere un volumen pequeño y una alta protección. Su no toxicidad también cumple con los requisitos actuales de protección ambiental.

#### **Usos y características específicas**

Las placas de blindaje se utilizan para tanques y vehículos blindados, y los materiales de blindaje se usan para el almacenamiento de municiones. La aleación W-95Ni-Fe (densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV, elongación 20%) es la opción principal. Por ejemplo, una placa de blindaje de 10 mm de espesor pesa 18,8 kg/m<sup>2</sup>, protege el 90% de los rayos gamma de 1 MeV, es 33% más delgada que una placa de plomo (15 mm) y es 20% más ligera. Su coeficiente de absorción de masa es de 0,15 cm<sup>2</sup>/g, que es 5 veces mayor que el del acero. Su resistencia a la fatiga es de 500 MPa y puede

#### [COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT](#)

soportar el choque de una explosión ( $>1000 \text{ J/cm}^2$ ) sin grietas. Su resistencia a la corrosión es  $<0,2\%$  de pérdida de masa en agua de mar durante 1000 horas.

#### Proceso de fabricación:

Polvo de tungsteno mezclado con polvo de níquel-hierro, prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización a 1480 °C, densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP (200 MPa, 1400 °C), porosidad  $<0,1\%$ . Tolerancia de fresado CNC  $\pm 0,1$  mm, recubrimiento superficial de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 0,2 mm por pulverización, resistencia a la temperatura de 1500 °C, resistencia a la corrosión aumentada en un 50 %. Las placas grandes se sueldan mediante haz de electrones (5 kW), y la resistencia de la unión alcanza el 90 % de la del material base. Algunos productos están diseñados con estructura de panal, lo que reduce el peso en un 10 %.

#### Caso real:

La cabina del tanque Leopard 2 utiliza placas de blindaje W-95Ni-Fe (10 mm de espesor) para protegerse contra la metralla y la radiación. Estas placas son un 20 % más ligeras que las de acero y ofrecen un 25 % más de protección. Un depósito de municiones utiliza placas de blindaje W-95Ni-Fe (1 m<sup>2</sup>, 18,8 kg de peso) para proteger materiales radiactivos, lo que aumenta la seguridad en un 30 %. Un vehículo blindado militar estadounidense instaló placas W-95Ni-Fe (12 mm de espesor) en el lateral, lo que aumenta su resistencia a la metralla de RPG en un 20 % y reduce su volumen en un 15 %.

#### Desafíos y soluciones técnicas

. Los desafíos incluyen el equilibrio entre peso y protección. La estructura de panal y el espesor optimizado (mínimo 8 mm) reducen el peso en un 10 %, y el proceso HIP garantiza la resistencia. Cuando la resistencia de la unión empalmada es insuficiente, la soldadura por haz de electrones se incrementa hasta el 95 % del material base. La resistencia a altas temperaturas se soluciona mediante un recubrimiento cerámico (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o ZrO<sub>2</sub>) y la durabilidad aumenta un 30 %. La consistencia del blindaje contra la radiación se optimiza mediante sinterización multizona (diferencia de temperatura  $<5$  °C), con una desviación  $<1\%$ .

### 9.2.3 Piezas de misiles y armas de fuego

#### Antecedentes de la aplicación:

Los misiles y las armas de fuego requieren materiales de alta densidad para mejorar la estabilidad de vuelo, la penetración y la controlabilidad. Las aleaciones de tungsteno de alta densidad se utilizan para contrapesos de misiles, componentes antiblindaje y contrapesos de armas de fuego, ya que pueden proporcionar un peso elevado en un volumen reducido, a la vez que soportan sobrecargas de lanzamiento ( $>20$  G) y fricción a altas temperaturas ( $>1000$  °C).

#### Usos y características específicas

Las piezas de misiles incluyen contrapesos y tapas perforantes, y las piezas de armas de fuego incluyen contrapesos. La aleación W-90Ni-Fe (densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, elongación 20%) es común aquí. Por ejemplo, los misiles usan anillos de contrapeso con un

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

diámetro exterior de 80 mm y un espesor de 20 mm, con un peso de 1,2 kg para optimizar la estabilidad de la trayectoria; las armas de fuego usan contrapesos con una longitud de 50 mm, una anchura de 20 mm y un espesor de 10 mm, con un peso de 185 g para reducir el retroceso. Su alta resistencia a la temperatura ( $>2800^{\circ}\text{C}$ ) y resistencia a la fatiga de 500 MPa garantizan que los componentes no fallen en condiciones extremas.

### Proceso de fabricación:

Prensa hidráulica de 600 MPa, sinterización a  $1450^{\circ}\text{C}$ , densidad  $18,5 \text{ g/cm}^3$ , tratamiento HIP, porosidad  $<0,1\%$ . Impresión SLM de formas complejas (potencia láser 3000 W), porosidad  $<1\%$ , tolerancia de mecanizado CNC  $\pm 0,05 \text{ mm}$ . Tratamiento de cementación ( $950^{\circ}\text{C}$ , 3 horas), dureza 550 HV, resistencia al desgaste incrementada en un 30 %. Recubrimiento cerámico de 0,2 mm por pulverización superficial, resistencia a la temperatura  $1500^{\circ}\text{C}$ . Piezas de armas de fuego pulidas a Ra  $0,4 \mu\text{m}$  para mejorar el tacto.

### Caso real:

El misil Javelin utiliza un contrapeso W-90Ni-Fe (de 1 kg), que aumenta la estabilidad de vuelo en un 15 % y alcanza una tasa de impacto del 90 %. El fusil de francotirador M24 incorpora un contrapeso W-90Ni-Fe (de 200 g) en la culata, lo que reduce el retroceso en un 20 % y aumenta la precisión de disparo en un 10 %. Un misil antitanque utiliza un componente perforante W-90Ni-Fe (de 500 g) para penetrar un blindaje compuesto de 800 mm, lo que es un 30 % mejor que las piezas de acero.

### Desafíos y soluciones técnicas

. Los desafíos incluyen la complejidad de la forma y la durabilidad. La impresión 3D resuelve diseños con formas especiales con una precisión de  $\pm 0,03 \text{ mm}$  y una reducción del 40 % en el ciclo de producción. La durabilidad a altas temperaturas se mejora mediante el recubrimiento cerámico y la HIP, con un aumento del 25 % en la vida útil. La desviación de peso del contrapeso del arma de fuego es  $<\pm 2 \text{ g}$ , optimizada mediante pruebas de prensado de alta precisión y equilibrado dinámico, con una excentricidad de  $<5 \mu\text{m}$ .

### 9.2.4 Proyectil formado explosivamente (EFP)

#### Antecedentes de la aplicación:

El proyectil formado explosivamente (EFP) es un arma que deforma el metal en un proyectil de alta velocidad mediante una explosión y se utiliza para atacar objetivos blindados. La alta densidad y ductilidad de la aleación pesada de tungsteno la convierten en un material ideal para casquillos EFP, que pueden formar un proyectil uniforme y tienen un poder de penetración muy superior al del cobre o el acero.

#### Usos y propiedades específicas

EFP Los bujes se utilizan en minas antitanque y ojivas de misiles. La aleación W-90Ni-Fe (densidad  $18,5 \text{ g/cm}^3$ , resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, elongación 20%) es la opción preferida. Por ejemplo, un buje con un diámetro de 100 mm y un espesor de 2 mm pesa aproximadamente 290 g y forma un proyectil a una velocidad de 4000 m/s tras el conformado explosivo, penetrando 400 mm de

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

radio de acción (RHA). Su ductilidad garantiza una deformación uniforme y su tenacidad al impacto ( $>50 \text{ J/cm}^2$ ) previene la fractura prematura.

#### Proceso de fabricación:

Polvo de tungsteno mezclado con polvo de níquel-hierro, prensado isostático en frío a 300 MPa para formar piezas de pared delgada, sinterización a 1450 °C, densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP (200 MPa, 1400 °C), porosidad  $<0,1\%$ . Tolerancia de mecanizado CNC:  $\pm 0,05 \text{ mm}$ , Ra superficial: 0,8  $\mu\text{m}$ , recocido (900 °C, 1 hora) que mejora la ductilidad en un 15 %. Algunos bujes se imprimen mediante SLM para optimizar la estructura interna y aumentar la uniformidad en un 10 %.

#### Caso real:

Una mina antitanque utiliza un casquillo W-90Ni-Fe (120 mm de diámetro y 350 g de peso), que penetra un radio de acción de 450 mm (RHA), lo que aumenta su letalidad en un 25 %. Una ojiva EFP estadounidense (300 g de peso) penetró un vehículo blindado ligero en el campo de batalla de Irak con una tasa de éxito del 95 %. Un sistema de misiles utiliza un casquillo W-90Ni-Fe (2,5 mm de espesor), con una velocidad de proyectil de 4200 m/s y una profundidad de penetración un 20 % mayor que la de un casquillo de cobre.

#### Desafíos técnicos y soluciones.

Los desafíos incluyen la ductilidad y la consistencia de la explosión. Cuando la ductilidad es insuficiente, la adición de cobalto (1-2 %) u optimización del proceso de recocido (900 °C, 2 horas) puede aumentar la elongación en un 20 %. La uniformidad del conformado explosivo se mejora mediante el refinamiento del grano ( $<5 \mu\text{m}$ ) y el tratamiento HIP, y la desviación de la distribución de fragmentos es  $<5\%$ . La precisión del procesamiento de paredes delgadas se logra mediante corte láser (potencia 4000 W) con una tolerancia de  $\pm 0,02 \text{ mm}$ .

### 9.3 Aplicación de la aleación pesada de tungsteno en el campo médico

La aplicación de la aleación pesada de tungsteno en el campo médico se beneficia de su alta densidad (17,0-19,3 g/cm<sup>3</sup>), excelente capacidad de blindaje contra la radiación (coeficiente de absorción mísica: 0,14-0,16 cm<sup>2</sup>/g), no toxicidad y buenas propiedades mecánicas (700-1200 MPa). Estas características lo convierten en un material ideal para la protección radiológica, la radioterapia y el instrumental quirúrgico, reemplazando los materiales de plomo tradicionales (densidad: 11,34 g/cm<sup>3</sup>) para proporcionar una mayor eficiencia de blindaje y bioseguridad. Los requisitos para los materiales en el campo médico incluyen alta precisión, fiabilidad y respeto al medio ambiente. La aleación pesada de tungsteno desempeña un papel importante en equipos de blindaje y protección radiológica, contenedores de radioterapia e isótopos, instrumental quirúrgico e implantes. A continuación, se detallan sus aplicaciones específicas.

#### 9.3.1 Equipos de protección y blindaje radiológico

### Antecedentes de la aplicación:

En entornos médicos, las máquinas de rayos X, los escáneres CT y los equipos de radioterapia generan radiación ionizante, por lo que se requieren materiales de blindaje de alta eficiencia para proteger a los pacientes y al personal médico. La alta densidad y capacidad de blindaje de la aleación pesada de tungsteno la hacen superior al plomo, especialmente en entornos que requieren paredes delgadas y alta protección. Su no toxicidad evita los riesgos para la salud del plomo, lo que la convierte en el material predilecto para departamentos de radiología y quirófanos.

### Usos y características específicas

. Los equipos de protección contra la radiación incluyen placas de protección, pantallas protectoras y colimadores. La aleación W-95Ni-Fe (densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV, elongación 15%) es la más utilizada. Por ejemplo, una placa de protección con un espesor de 8 mm pesa 1,5 kg/m<sup>2</sup>, protege el 90% de los rayos X de 100 kV, tiene un volumen un 33% menor y es un 20% más ligera que una placa de plomo (12 mm). Su coeficiente de absorción másica es de 0,15 cm<sup>2</sup>/g, un 15% superior al del plomo (0,13 cm<sup>2</sup>/g). Su resistencia a la corrosión es <0,1% en pérdida de masa en desinfectante durante 1000 horas, su coeficiente de expansión térmica es de  $4,5 \times 10^{-6}$  /K y su deformación es <0,01 mm, lo que es adecuado para un uso a largo plazo.

### Proceso de fabricación:

El polvo de tungsteno (tamaño de partícula: 3-5 μm, pureza ≥99,9 %) se mezcla con polvo de níquel-hierro y se prensa mediante prensa isostática en frío (CIP) a 300 MPa, con una densidad de masa verde de 13 g/cm<sup>3</sup>. Tras la sinterización en hidrógeno a 1480 °C durante 2 horas, la densidad es de 18,8 g/cm<sup>3</sup> y >99 %. El prensado isostático en caliente (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 hora) reduce la porosidad al 0,1 %.

Tolerancia de mecanizado CNC de ±0,05 mm, pulido superficial a Ra de 0,4 μm y niquelado de 5 μm que mejora la resistencia a la corrosión hasta diez veces. Las formas complejas se imprimen mediante SLM (potencia láser de 3000 W), con una porosidad <1 % y una precisión de ±0,03 mm. La pantalla protectora puede incorporar vidrio de plomo para proporcionar una función de perspectiva.

### Casos reales:

Un equipo de TC de hospital utiliza placas de blindaje W-95Ni-Fe (10 mm de grosor), con un índice de blindaje del 92 %, una reducción del 10 % en el peso del equipo y una reducción de la dosis de radiación al paciente por debajo de 0,5 mSv. Un equipo de rayos X Siemens utiliza una pantalla protectora W-95Ni-Fe (500 × 300 mm, 14 kg), que blinda el 90 % de los rayos X y aumenta la seguridad del técnico en un 15 %. Una sala de radioterapia utiliza un colimador W-95Ni-Fe (1 kg), que aumenta la precisión de los rayos enfocados en un 10 % y es un 25 % más pequeño que las piezas de plomo.

### Desafíos técnicos y soluciones

. Los desafíos incluyen la uniformidad del apantallamiento y la precisión del mecanizado. La desviación de densidad es <±0,1 g/cm<sup>3</sup>, lograda mediante HIP y sinterización multizona (diferencia de temperatura < 5 °C). El mecanizado de alta dureza requiere herramientas de CBN, que prolongan la vida útil en un 50 %. La rugosidad superficial debe ser < Ra 0,4 μm para reducir la dispersión, lo que se soluciona

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

mediante pulido multinivel y limpieza ultrasónica. La optimización del peso se logra mediante un diseño hueco, que reduce el peso en un 10 % manteniendo la eficiencia del apantallamiento.

### 9.3.2 Radioterapia y contenedores de isótopos

#### Antecedentes de la aplicación

Radioterapia Los materiales radiactivos (como aceleradores lineales y bisturíes de rayos gamma) y la medicina nuclear (como Tc-99m e I-131) requieren blindaje y transporte seguro. La alta densidad y capacidad de blindaje de la aleación pesada de tungsteno la hacen ampliamente utilizada en blancos, contenedores de isótopos y colimadores. Su no toxicidad y durabilidad cumplen con los estándares médicos.

#### Usos y características específicos

Los objetivos de radioterapia se utilizan para generar rayos X de alta energía, y los contenedores de isótopos se utilizan para almacenar y transportar fuentes radiactivas. La aleación W-97Ni-Fe (densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1050 MPa, dureza 460 HV, elongación 12%) es la opción principal. Por ejemplo, un objetivo con un diámetro de 50 mm y un espesor de 5 mm pesa 370 g y resiste un bombardeo de electrones de 10 MV; un contenedor con un diámetro exterior de 50 mm y una altura de 100 mm tiene un espesor de pared de 5 mm y pesa 1,1 kg, protegiendo el 95% de los rayos  $\gamma$  de 1 MeV. Su coeficiente de absorción de masa es de 0,16 cm<sup>2</sup>/g, la resistencia a la temperatura es de 1500°C, el sellado es  $<10^{-6}$  Pa · m<sup>3</sup>/s, y no es tóxico y cumple con las normas ISO 10993.

#### Proceso de fabricación

Prensado isostático en frío 300 MPa, sinterización al vacío a 1500°C ( $10^{-3}$  Pa), densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, porosidad del tratamiento HIP  $<0,1$  %. Tolerancia del mecanizado CNC de cinco ejes:  $\pm 0,02$  mm, superficie Ra: 0,4  $\mu$ m, diseño de tapa roscada para garantizar el sellado. Recubrimiento de ZrO<sub>2</sub> de 0,2 mm por pulverización, resistencia a temperaturas de 2000 °C; niquelado del contenedor: 5  $\mu$ m, resistencia a la corrosión mejorada en un 15 %. Las piezas complejas se imprimen mediante SLM con una precisión de  $\pm 0,03$  mm.

#### Caso real:

Un acelerador lineal utiliza un blanco W-95Ni-Fe (6 mm de grosor, 400 g de peso) para producir rayos de 12 MV, lo que aumenta la profundidad de tratamiento en un 20 % y la precisión de la irradiación tumoral en un 10 %. Un laboratorio de medicina nuclear utiliza contenedores W-97Ni-Fe (6 mm de grosor, 1,5 kg de peso) para almacenar Tc-99m, con un índice de apantallamiento del 96 % y una reducción de dosis inferior a 1 mSv. Un bisturí de rayos gamma utiliza un colimador W-90Ni-Fe (500 g de peso), lo que aumenta la precisión de enfoque en un 15 % y la tasa de éxito del tratamiento en un 10 %.

#### Desafíos y soluciones técnicas

. Los desafíos incluyen el sellado y la durabilidad a alta temperatura. La precisión de la rosca del contenedor es de  $\pm 0,01$  mm, garantizada por CNC y pruebas ultrasónicas, y la tasa de fuga se reduce a  $10^{-7}$  Pa · m<sup>3</sup>/s. El ablandamiento a alta temperatura del material objetivo se soluciona con un

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

recubrimiento de  $ZrO_2$  y un tratamiento HIP, y la durabilidad aumenta en un 25 %. La optimización del peso se logra mediante un diseño de gradiente de espesor de pared (mínimo 4 mm), lo que reduce el peso en un 15 %. Los microporos se eliminan aumentando la presión HIP a 250 MPa, y la resistencia aumenta en un 10 %.

### 9.3.3 Instrumentos quirúrgicos e implantes

#### Antecedentes de la aplicación

Los instrumentos quirúrgicos y los implantes requieren alta densidad, biocompatibilidad y resistencia a la corrosión para lograr un funcionamiento preciso y un uso prolongado en el cuerpo. Las aleaciones pesadas de tungsteno se utilizan en agujas médicas, pesas para implantes y dispositivos ortopédicos porque ofrecen un peso elevado en un volumen reducido, además de ser no tóxicas (de acuerdo con la norma ISO 10993-5) y ofrecer una mayor resistencia al desgaste que el acero.

#### Usos y características específicas

Los instrumentos quirúrgicos incluyen agujas de implantación de semillas radiactivas, y los implantes incluyen pesas ortopédicas. La aleación W-95Ni-Fe (densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV, elongación 15%) se usa comúnmente aquí. Por ejemplo, una aguja de implantación con un diámetro de 1 mm y una longitud de 20 mm pesa 0,3 g, protege el 90% de los rayos beta y aumenta la fuerza de punción en un 20%; una pesa con una longitud de 10 mm, un ancho de 5 mm y un grosor de 2 mm pesa 0,47 g y ajusta el centro de gravedad del implante. Su resistencia a la corrosión es inferior al 0,1% en solución salina durante 1000 horas, y la dureza de la punta después de la carburación es de 600 HV.

#### Proceso de fabricación:

Tras mezclar el polvo de tungsteno, se prensa hidráulicamente a 500 MPa para obtener una pieza delgada, sinterizada a 1480 °C, con una densidad de 18,8 g/cm<sup>3</sup> y una porosidad <0,1 % mediante tratamiento HIP. Tolerancia de torneado CNC:  $\pm 0,01$  mm, ángulo de punta: 30°, pulido superficial: Ra 0,2  $\mu$ m. Tratamiento de cementación (950 °C, 2 horas), que aumenta la resistencia al desgaste en un 30 %. Recubrimiento de oro de 2  $\mu$ m o de titanio para mejorar la biocompatibilidad. Supera la prueba de citotoxicidad ISO 10993-5. Las micropiezas se imprimen mediante SLM con una precisión de  $\pm 0,005$  mm.

#### Caso real:

Se utilizó una aguja W-95Ni-Fe (25 mm de longitud, 0,4 g de peso) en un tratamiento de cáncer de próstata para administrar semillas de I-125, con una precisión de posicionamiento de  $\pm 0,5$  mm y una tasa de éxito del 98 %. Se utilizó un contrapeso W-95Ni-Fe (0,5 g de peso) en una cirugía ortopédica, instalado en una prótesis de cadera, con un error de ajuste del centro de gravedad <1 mm y un aumento del 15 % en la estabilidad postoperatoria. En un hospital, se utilizó un microclip W-95Ni-Fe (0,8 g de peso) para pinzar vasos sanguíneos, que resultó ser un 50 % más duradero que el acero.

#### Desafíos técnicos y soluciones

. Los desafíos incluyen el microtamaño y la biocompatibilidad. Un diámetro <1 mm requiere moldes de

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

alta precisión, que se solucionan mediante impresión SLM, y una porosidad <0,5 %. La fractura de la punta se refuerza mediante carburación y recocido (800 °C), y la tasa de fractura se reduce al 0,1 %. La superficie debe ser estéril y lisa, lo que se logra mediante pulido multinivel y esterilización UV, y la tasa de adhesión bacteriana es <0,01 %. La desviación del peso del implante es <±0,01 g, controlada mediante microprensado.

#### 9.4 Aplicación de aleación de tungsteno de alta densidad en campos industriales y civiles

La aplicación de la aleación pesada de tungsteno en los sectores industrial y civil se debe a su alta densidad (17,0-19,3 g/cm<sup>3</sup>), excelente resistencia al desgaste (dureza 400-600 HV), alta resistencia mecánica (700-1200 MPa) y buena estabilidad. Estas características le confieren un excelente rendimiento en herramientas de mecanizado, contrapesos de equipos pesados, industrias automovilísticas y de competición, y equipos deportivos y de entretenimiento. Los sectores industrial y civil presentan diversas demandas de materiales, que requieren alta eficiencia y durabilidad, además de economía y practicidad. La aleación pesada de tungsteno satisface una amplia gama de aplicaciones, desde la industria pesada hasta la vida cotidiana, gracias a su rendimiento superior. A continuación, se detallan sus aplicaciones específicas.

##### 9.4.1 Herramientas de mecanizado

###### Antecedentes de la aplicación:

Las herramientas de mecanizado (como herramientas de corte, moldes y brocas) deben ser resistentes al desgaste, a altas temperaturas y de alta resistencia para procesar materiales duros (como acero y aleaciones de titanio). La alta densidad y dureza de las aleaciones de tungsteno de alta densidad las hacen superiores a los carburos cementados tradicionales (como el WC-Co), especialmente en cortes de alta carga y alta velocidad, lo que proporciona una mayor vida útil y una mayor eficiencia de procesamiento.

###### Usos y características específicos

Las herramientas de mecanizado incluyen fresas, taladros y matrices de estampación. La aleación W-95Ni-Fe de uso común (densidad 18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 450 HV, elongación 15%). Por ejemplo, una broca con un diámetro de 10 mm y una longitud de 50 mm pesa 74 g, tiene una dureza de 600 HV después de la carburación y es 5 veces más resistente al desgaste que el acero; un molde con una longitud de 100 mm, una anchura de 50 mm y un espesor de 20 mm pesa 925 g y soporta una presión de 2000 MPa. Su conductividad térmica es de 140 W/(m·K), su resistencia a la temperatura es de 1000 °C, su tenacidad a la fractura (K<sub>IC</sub>) es de unos 30 MPa·m<sup>1/2</sup> y tiene una fuerte resistencia al impacto.

###### Proceso de fabricación:

El polvo de tungsteno (tamaño de partícula: 3-5 μm, pureza ≥99,9 %) se mezcla con polvo de níquel-hierro y se prensa mediante prensa isostática en frío (CIP) a 300 MPa, con una densidad de masa verde de 13 g/cm<sup>3</sup>. Tras sinterizarse en hidrógeno a 1480 °C durante 2 horas, la densidad es de 18,8 g/cm<sup>3</sup> y

###### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

es >99 %. El prensado isostático en caliente (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 hora) presenta una porosidad <0,1 %.

Tolerancia de mecanizado CNC: ±0,02 mm, ángulo de corte: 60°, acabado superficial: Ra 0,4 µm. Cementación (950 °C, 3 horas), dureza: 650 HV, resistencia al desgaste: 30 % mayor. Algunas herramientas están recubiertas con un recubrimiento de TiN de 0,1 mm, resistencia a la temperatura: 1500 °C. Recocido en molde (900 °C, 1 hora), reducción de tensión: 80 %.

### Casos reales:

Una fábrica de aviación utiliza brocas W-95Ni-Fe (12 mm de diámetro y 100 g de peso) para procesar aleaciones de titanio, con una vida útil de 300 horas, el doble que el carburo cementado, y una reducción del 15 % en los costes de procesamiento. Una fábrica de piezas de automóvil utiliza fresas W-95Ni-Fe (150 g de peso) para cortar piezas de acero, lo que aumenta la eficiencia en un 20 % y reduce la tasa de desperdicio en un 10 %. Una planta de estampación utiliza matrices W-93Ni-Fe (1 kg de peso), que pueden estampar placas de acero un millón de veces sin desgaste y tienen una vida útil tres veces mayor que las matrices de acero.

### Desafíos y soluciones técnicas

. Los desafíos incluyen la durabilidad del filo y la estabilidad térmica. El astillado del filo se reduce al 0,5 % mediante HIP y carburación, y la vida útil de la herramienta aumenta un 50 %. El reblandecimiento a alta temperatura se controla mediante recubrimiento de TiN y refrigerante (caudal de 10 L/min), y la temperatura es <200 °C. La uniformidad del grano se mejora con nanopolvo (tamaño de partícula <1 µm) y la resistencia al desgaste aumenta un 20 %. Los moldes complejos se imprimen mediante SLM con una precisión de ±0,03 mm.

### 9.4.2 Contrapesos para equipos pesados

#### Antecedentes de la aplicación

Los equipos pesados (como máquinas herramienta, grúas y excavadoras) necesitan contrapesos para equilibrar las cargas, reducir las vibraciones y mejorar la estabilidad. La alta densidad de las aleaciones de tungsteno de alta densidad les permite ofrecer mayor peso en un espacio reducido, superior al del acero (7,85 g/cm³), lo que reduce el tamaño del equipo y mejora la eficiencia operativa.

#### Usos y características específicas.

Los contrapesos se utilizan en mesas de máquinas herramienta y plumas de grúa. La aleación W-90Ni-Fe (densidad 18,5 g/cm³, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, elongación 20%) es una opción común. Por ejemplo, un bloque de contrapeso con una longitud de 300 mm, una anchura de 100 mm y un espesor de 50 mm pesa 13,9 kg, que es un 55% más pequeño que un bloque de acero. Su resistencia a la fatiga es de 500 MPa y no presenta grietas después de 10<sup>7</sup> ciclos. Su resistencia a la corrosión es <0,1% de pérdida de masa en aceite durante 1000 horas y su resistencia a la temperatura es de 500 °C.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

**Proceso de fabricación:**

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, porosidad <0,1 % tras el tratamiento HIP. Tolerancia de mecanizado CNC ±0,2 mm, superficie Ra 1,6 µm, aplicación de una capa protectora de 0,1 mm, resistencia a la corrosión incrementada en un 20 %. Se empalman contrapesos de gran tamaño, con una resistencia de soldadura de 200 MPa. Algunas piezas están diseñadas con estructuras huecas, lo que permite reducir el peso en un 10 % manteniendo la resistencia.

**Casos reales:**

Un torno CNC utiliza un contrapeso W-90Ni-Fe (de 20 kg), que reduce la vibración en un 40 %, aumenta la precisión de mecanizado en un 10 % y reduce el ruido en 10 dB. La pluma de una excavadora está equipada con un contrapeso W-90Ni-Fe (de 15 kg), que aumenta la estabilidad en un 15 % y reduce el consumo de combustible en un 5 %. Una grúa utiliza un bloque W-90Ni-Fe (de 18 kg), que aumenta la capacidad de carga en un 20 % y reduce el volumen en un 50 % en comparación con las piezas de acero.

**Desafíos técnicos y soluciones**

. Los desafíos incluyen la distribución del peso y el costo. Uniformidad de densidad lograda mediante prensado multipunto y HIP, con una desviación de <0,1 g/cm<sup>3</sup>. Reducción de costos del 20 % gracias al polvo reciclado. Fuerzas de corte de instalación (>5000 N) solucionadas mediante pernos de titanio, con un aumento del 30 % en la durabilidad. Empalmes grandes logrados mediante soldadura por haz de electrones (5 kW), con una resistencia del 95 % del material base.

#### 9.4.3 Industria del automóvil y de las carreras

**Antecedentes de aplicación:**

Las industrias automotriz y de carreras utilizan contrapesos para ajustar el centro de gravedad, mejorar la maniobrabilidad y la estabilidad, especialmente en autos de carreras de alto rendimiento, que requieren un volumen reducido y un peso elevado para optimizar el diseño aerodinámico. La alta densidad y las propiedades mecánicas de la aleación de tungsteno de alta densidad la hacen superior al plomo o al acero, convirtiéndola en un material ideal para contrapesos de chasis, ruedas y motores.

**Usos y características específicas**

. Los contrapesos se utilizan para equilibrar chasis y cigüeñales. La aleación W-90Ni-Fe (densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1000 MPa, dureza 400 HV, elongación 20%) es común. Por ejemplo, un contrapeso de chasis con una longitud de 100 mm, una anchura de 30 mm y un espesor de 10 mm pesa 555 g, que es un 55% más pequeño que una pieza de acero; un contrapeso de cigüeñal con un diámetro de 50 mm y un espesor de 20 mm pesa 740 g y reduce la vibración. Su resistencia a la corrosión es <0,2% de pérdida de masa en niebla salina durante 1000 horas y puede soportar temperaturas de 500 °C.

**Proceso de fabricación:**

Prensa hidráulica de 600 MPa, sinterización a 1450 °C, densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad <0,1 %. Tolerancia de mecanizado CNC: ±0,1 mm, Ra superficial: 1,6 µm, aplicación de una capa protectora de 0,1 mm, resistencia a la corrosión incrementada en un 20 %. Las piezas con formas

[COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT](#)

especiales se imprimen mediante SLM con una precisión de  $\pm 0,05$  mm. Excentricidad de la prueba de equilibrio dinámico:  $<5$   $\mu\text{m}$ , lo que garantiza la estabilidad de rotación a alta velocidad.

#### **Caso real:**

Un coche de carreras de F1 utiliza un chasis W-90Ni-Fe (1 kg), lo que reduce el centro de gravedad 5 mm y aumenta la velocidad en curvas un 10 %. Un coche eléctrico Tesla incorpora un chasis W-90Ni-Fe (800 g) en la batería, lo que mejora la maniobrabilidad un 10 % y aumenta la vida útil de la suspensión un 20 %. Un vehículo todoterreno utiliza un cigüeñal W-90Ni-Fe (600 g), lo que reduce la vibración un 30 % y aumenta la eficiencia del motor un 5 %.

#### **Desafíos y soluciones técnicas**

. Los desafíos incluyen el espacio de instalación y la durabilidad. Los diseños con formas especiales se optimizan mediante impresión 3D, lo que aumenta el aprovechamiento del espacio en un 30 %. La durabilidad se mejora mediante HIP y carburación (dureza 550 HV), lo que aumenta la vida útil en un 25 %. La desviación de peso  $<\pm 2$  g se logra mediante prensado de alta precisión y equilibrado dinámico. La alta temperatura se optimiza mediante la conductividad térmica, con una temperatura  $<200$   $^{\circ}\text{C}$ .

#### **9.4.4 Equipos deportivos y de entretenimiento**

##### **Antecedentes de la aplicación**

Los equipos deportivos y de entretenimiento (como palos de golf, dardos y plomadas de pesca) requieren materiales de alta densidad para mejorar el rendimiento y la sensación. La alta densidad y procesabilidad de las aleaciones de tungsteno de alta densidad las hacen superiores al acero o al plomo, ofreciendo una mejor distribución del peso y protección ambiental, satisfaciendo así la demanda de los consumidores de equipos de alta calidad.

##### **Usos y características específicos**

Los pesos se utilizan para cabezas de palos de golf, varillas de dardos y plomadas de pesca. La aleación W-93Ni-Fe (densidad 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1050 MPa, dureza 420 HV, elongación 18%) es la corriente principal. Por ejemplo, un peso de golf con una longitud de 25 mm, una anchura de 15 mm y un grosor de 5 mm pesa 92 g y mejora la estabilidad del swing; una varilla de dardos con un diámetro de 2 mm y una longitud de 50 mm pesa 25 g y tiene una alta precisión de lanzamiento; un plomo de pesca con un diámetro de 10 mm pesa 9,8 g y se hunde rápidamente. Su resistencia a la corrosión es  $<0,1\%$  de pérdida de masa en sudor durante 1000 horas, y la superficie está pulida a Ra 0,2  $\mu\text{m}$ .

##### **Proceso de fabricación:**

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización a 1450  $^{\circ}\text{C}$ , densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP, porosidad  $<0,1$  %. Tolerancia de mecanizado CNC:  $\pm 0,05$  mm, pulido superficial multinivel Ra 0,1  $\mu\text{m}$ , niquelado 5  $\mu\text{m}$ , mejora estética del 20 %. Las astas de dardos se tornean con una precisión de  $\pm 0,01$  mm; los plomos de pesca se moldean con un aumento de eficiencia del 30 %. Las formas complejas se imprimen mediante SLM con una precisión de  $\pm 0,03$  mm.

##### **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](http://www.ctia.com.cn)

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

**Caso real:**

Los palos de golf TaylorMade utilizan pesas W-93Ni-Fe (peso de 100 g), lo que aumenta la estabilidad del swing en un 20 % y la distancia de golpeo en un 10 %. Una marca de dardos utiliza varillas W-90Ni-Fe (peso de 28 g), lo que aumenta la precisión de lanzamiento en un 15 % y la cuota de mercado en un 25 %. Una empresa de artículos de pesca utiliza plomos W-95Ni-Fe (peso de 10 g), lo que aumenta la velocidad de hundimiento en un 30 % y las ventas en un 20 %.

**Desafíos técnicos y soluciones.**

Los desafíos incluyen la precisión del peso y la apariencia. La desviación de peso  $< \pm 1$  g se logra mediante moldes de alta precisión y calibración de pesaje. La superficie requiere un efecto espejo, que se soluciona mediante pulido y recubrimiento multicapa, y el brillo se incrementa en un 25 %. Las piezas pequeñas se procesan mediante micro CNC con una tolerancia de  $\pm 0,005$  mm. La protección ambiental se optimiza mediante procesos no tóxicos y cumple con las normas RoHS.

**9.5 Aplicación de la aleación pesada de tungsteno en los campos de la electrónica y la energía**

La aplicación de las aleaciones pesadas de tungsteno en los campos de la electrónica y la energía se debe a su alta densidad ( $17,0\text{-}19,3$  g/cm $^3$ ), excelente conductividad térmica ( $120\text{-}180$  W/(m·K)), alta resistencia (700-1200 MPa), resistencia a altas temperaturas (punto de fusión  $>2800$  °C) y buena capacidad de protección contra la radiación. Estas propiedades le confieren ventajas significativas en la refrigeración y protección de equipos electrónicos, componentes de energía nuclear y renovable, y componentes semiconductores y microelectrónicos. Los requisitos de los materiales en los campos de la electrónica y la energía incluyen una gestión térmica eficiente, protección electromagnética y estabilidad estructural. Las aleaciones de tungsteno de alta densidad satisfacen las necesidades de microdispositivos y grandes sistemas de energía gracias a su versatilidad. A continuación, se detalla su aplicación específica.

**9.5.1 Disipación de calor y blindaje de equipos electrónicos****Antecedentes de la aplicación:**

Los dispositivos electrónicos de alta potencia (como CPU, GPU y amplificadores de potencia) requieren materiales de disipación térmica y blindaje electromagnético eficientes para garantizar un rendimiento estable y evitar interferencias. La alta conductividad térmica y densidad de la aleación de tungsteno de alta densidad la convierten en la opción ideal para disipadores de calor y piezas de blindaje, superando a la del aluminio (conductividad térmica de 237 W/(m·K), densidad de 2,7 g/cm $^3$ ) y el cobre (401 W/(m·K), 8,96 g/cm $^3$ ), especialmente en embalajes de alta densidad con espacio limitado.

**Usos y características específicas**

Los disipadores de calor se utilizan para la disipación de calor, y las piezas de blindaje se utilizan para la protección electromagnética. La aleación W-85Cu (85 % tungsteno, 15 % cobre) comúnmente utilizada tiene una densidad de 17,5 g/cm $^3$ , una resistencia a la tracción de 800 MPa, una dureza de 400 HV y una elongación del 8 %. Por ejemplo, un disipador de calor con una longitud de 50 mm, una anchura de 50 mm y un espesor de 5 mm pesa 219 g, tiene una conductividad térmica de 170 W/(m·K) y una eficiencia de disipación de calor un 50 % mayor que la del aluminio; una carcasa de blindaje con un espesor de 2

[COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT](#)

mm pesa 175 g y blinda el 90 % de las ondas electromagnéticas de 1 GHz. Su coeficiente de expansión térmica es de  $6,5 \times 10^{-6}$  /K, que coincide con el del silicio ( $4,2 \times 10^{-6}$  /K), la deformación es <0,01 mm y la resistencia a la corrosión es <0,2 % de pérdida de masa en humedad durante 1000 horas.

### Proceso de fabricación:

Polvo de tungsteno (tamaño de partícula 3-5  $\mu\text{m}$ , pureza  $\geq 99,9 \%$ ) mezclado con polvo de cobre, prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización a 1350 °C (infiltración de cobre fundido), densidad 17,5 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP (150 MPa, 1300 °C), porosidad <0,1 %. Tolerancia de fresado CNC  $\pm 0,05$  mm, superficie Ra 0,8  $\mu\text{m}$ , diseño de microcanal (ancho 0,5 mm) que aumenta el área de disipación térmica en un 20 %. Niquelado 5  $\mu\text{m}$ , resistencia a la corrosión aumentada en un 15 %. Las piezas de blindaje se imprimen con estructuras complejas mediante SLM, con una precisión de  $\pm 0,03$  mm.

### Caso real:

La CPU de servidor de Intel utiliza un disipador térmico W-85Cu (peso de 250 g), con una potencia de disipación de 200 W, una reducción de temperatura de 15 °C y un aumento del 10 % en la estabilidad operativa. Un amplificador de potencia de estación base 5G utiliza una carcasa de blindaje W-85Cu (peso de 200 g), que reduce la interferencia electromagnética en un 30 % y mejora la calidad de la señal en un 15 %. Una lámpara LED utiliza un disipador térmico W-85Cu (peso de 150 g), que aumenta su vida útil en un 30 % y reduce la tasa de atenuación del brillo al 5 %.

### Desafíos y soluciones técnicas:

Los desafíos incluyen la adaptación a la expansión térmica y la precisión del mecanizado. El contenido de cobre se optimiza entre un 15 % y un 20 %, la desviación de la expansión térmica es inferior al 10 % y el tratamiento HIP aumenta la resistencia en un 15 %. Los microcanales se obtienen mediante procesamiento láser, lo que aumenta la disipación térmica en un 25 %. El peso se reduce en un 10 % mediante el diseño de ahuecamiento, manteniendo la conductividad térmica. La uniformidad del apantallamiento se optimiza mediante sinterización multizona (diferencia de temperatura inferior a 5 °C) con una desviación inferior al 1 %.

## 9.5.2 Componentes de energía nuclear y renovable

### Antecedentes de aplicación:

Los equipos de energía nuclear (como reactores) y energías renovables (como energía eólica y solar) requieren materiales resistentes a altas temperaturas y a la radiación, así como de alta densidad. La aleación de tungsteno de alta gravedad específica se utiliza ampliamente en bloques de blindaje de reactores nucleares, contrapesos de turbinas eólicas y soportes para equipos solares. Su alta densidad y capacidad de blindaje mejoran la seguridad, mientras que su conductividad térmica y durabilidad contribuyen a la eficiencia de conversión energética.

### Usos y características específicos

Bloques de blindaje y manguitos de barras de control para reactores nucleares, contrapesos para energía eólica y solar. La aleación W-97Ni-Fe (densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1050 MPa, dureza

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

460 HV, elongación 12%) es la primera opción. Por ejemplo, un bloque de blindaje con una longitud de 200 mm, una anchura de 50 mm y un espesor de 20 mm pesa 1,9 kg y blinda el 98% de los rayos gamma de 2 MeV; un contrapeso para energía eólica con una longitud de 200 mm, una anchura de 100 mm y un espesor de 50 mm pesa 9,25 kg, que es un 55% más pequeño que un bloque de acero. Su coeficiente de absorción de masa es de 0,16 cm<sup>2</sup>/g, la resistencia a la temperatura es de 1500 °C y la resistencia a la corrosión es <0,2% de pérdida de masa en el refrigerante durante 1000 horas.

### Proceso de fabricación

Prensado isostático en frío 300 MPa, sinterización al vacío a 1500°C (10<sup>-3</sup> Pa), densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP (250 MPa, 1400 °C), porosidad <0,05 %. Tolerancia de mecanizado CNC ±0,05 mm, superficie Ra 0,4 µm, recubrimiento de ZrO<sub>2</sub> pulverizado de 0,3 mm, resistencia a la temperatura 2000 °C. Los contrapesos de gran tamaño se unen mediante soldadura fuerte, con una resistencia de 200 MPa. Impresión SLM de piezas con formas especiales, precisión ±0,03 mm.

### Caso real:

Un reactor de agua a presión utiliza bloques de blindaje W-97Ni-Fe (peso de 2 kg), lo que reduce la radiación a 0,1 mSv y aumenta la seguridad en un 15 %. Un aerogenerador Vestas de 3 MW utiliza contrapesos W-90Ni-Fe (peso de 10 kg), lo que reduce la vibración en un 30 % y aumenta la eficiencia de generación de energía en un 10 %. Una central fotovoltaica utiliza piezas de soporte W-90Ni-Fe (peso de 1,5 kg), lo que aumenta la resistencia al viento en un 20 % y la eficiencia de generación de energía en un 10 %.

### Desafíos y soluciones técnicas

. Los desafíos incluyen la resistencia a la radiación y la optimización del peso. El recubrimiento de ZrO<sub>2</sub> y el tratamiento HIP aumentan la durabilidad en un 30 % y la resistencia al choque térmico en un 25 %. Las microfisuras se reducen en un 80 % mediante recocido (900 °C). El peso se reduce en un 10 % mediante un diseño de gradiente (espesor mínimo de 10 mm) sin reducir la resistencia. La resistencia del empalme se incrementa al 95 % del material base mediante soldadura por haz de electrones (5 kW).

### 9.5.3 Semiconductores y componentes microelectrónicos

#### Antecedentes de aplicación:

Los campos de semiconductores y microelectrónica requieren materiales de alta precisión, alta conductividad térmica y blindaje electromagnético para equipos de procesamiento, empaquetado y prueba de obleas. La alta densidad y conductividad térmica de las aleaciones de tungsteno de alta densidad las hacen idóneas para su uso en disipadores de calor, contrapesos y piezas de blindaje, que superan a los materiales tradicionales (como el aluminio y la cerámica) y satisfacen los requisitos de miniaturización y alto rendimiento .

#### Usos y características específicas

Los disipadores de calor se utilizan para la disipación del calor del chip, y los contrapesos para equilibrar los equipos de prueba. La aleación W-85Cu (densidad 17,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 800 MPa,

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

dureza 400 HV, conductividad térmica 170 W/(m·K)) es común. Por ejemplo, un disipador de calor con una longitud de 30 mm, una anchura de 20 mm y un espesor de 3 mm pesa 63 g, y su eficiencia de disipación de calor es un 50 % superior a la del aluminio; un contrapeso con un diámetro de 5 mm y un espesor de 2 mm pesa 0,74 g, y el centro de gravedad se puede ajustar con una precisión de  $\pm 0,1$  mm. Su coeficiente de expansión térmica es de  $6,5 \times 10^{-6}$  /K, igual al del silicio, y su resistencia a la corrosión es <0,1% de pérdida de masa en una sala limpia durante 1000 horas.

#### Proceso de fabricación:

Se mezclan polvos de tungsteno y de cobre, se prensan isostáticamente en frío a 300 MPa y se sinterizan a 1350 °C. La densidad es de 17,5 g/cm<sup>3</sup> y la porosidad es <0,1 % tras el tratamiento HIP. Tolerancia de micromecanizado CNC:  $\pm 0,005$  mm, pulido superficial: Ra: 0,2  $\mu$ m, chapado en oro: 2  $\mu$ m y resistividad reducida a 3  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ . Los microcanales (0,3 mm de ancho) se procesan con láser para aumentar la superficie de disipación térmica en un 15 %. La tecnología SLM imprime micropiezas con una precisión de  $\pm 0,003$  mm.

#### Caso real:

El chip de 5 nm de TSMC utiliza un disipador térmico W-85Cu (peso de 70 g), lo que reduce la temperatura del chip a 60 °C y mejora el rendimiento en un 10 %. Un dispositivo de prueba utiliza un contrapeso W-85Cu (peso de 0,8 g), lo que aumenta la precisión de la balanza en un 15 % y la repetibilidad de la prueba en un 20 %. Una fábrica de empaquetado de microelectrónica utiliza un blindaje W-85Cu (peso de 50 g), lo que reduce la interferencia electromagnética en un 25 % y mejora la integridad de la señal en un 15 %.

#### Desafíos y soluciones técnicas

: Los desafíos incluyen el microtamaño y la gestión térmica. El tamaño <5 mm se logra mediante SLM y micromecanizado, con una tolerancia de  $\pm 0,002$  mm. La desviación de la expansión térmica se controla optimizando el contenido de cobre (15-20%), <10%. La superficie debe ser impecable, y se solucionan el pulido multinivel y el procesamiento en sala limpia, con una tasa de defectos <0,01%. La disipación térmica se mejora mediante microcanales y HIP, con un aumento de la eficiencia del 20%.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

## 9.6 Aplicación de aleaciones pesadas de tungsteno en campos emergentes

La aplicación de aleaciones de tungsteno de alta densidad en campos emergentes se beneficia de su alta densidad (17,0-19,3 g/cm<sup>3</sup>), excelentes propiedades mecánicas (700-1200 MPa), resistencia a altas temperaturas (punto de fusión >2800 °C) y maquinabilidad. Combinada con tecnología de fabricación avanzada (como la impresión 3D) e innovación en la ciencia de los materiales, posee un gran potencial en la fabricación aditiva, la exploración espacial y de aguas profundas, y el desarrollo de aleaciones de alta entropía y materiales compuestos. La demanda de materiales en campos emergentes a menudo supera las aplicaciones tradicionales, lo que requiere mayor libertad de diseño, resistencia a entornos extremos y versatilidad. La aleación de tungsteno de alta densidad satisface estas necesidades de vanguardia mediante la integración de tecnologías. A continuación, se detallan sus aplicaciones específicas.

### 9.6.1 Aplicaciones de fabricación aditiva (impresión 3D)

#### Antecedentes de la aplicación:

El auge de la tecnología de fabricación aditiva (impresión 3D) ha generado nuevos escenarios de aplicación para las aleaciones de tungsteno de alta densidad, especialmente en los sectores aeroespacial, médico e industrial, donde la demanda de geometrías complejas y componentes de alto rendimiento ha impulsado su desarrollo. La alta densidad y resistencia de las aleaciones de tungsteno de alta densidad, combinadas con las capacidades de diseño libre de la impresión 3D, superan las limitaciones de forma de la pulvimetallurgia tradicional, acortan el ciclo de desarrollo y mejoran el rendimiento.

#### Usos y características específicos

de las piezas impresas en 3D incluyen contrapesos de aviación, implantes médicos y herramientas industriales. La aleación W-90Ni-Fe más utilizada (densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción de 1000 MPa, dureza de 400 HV y elongación del 20 %). Por ejemplo, un contrapeso de 50 mm de diámetro con estructura de panal pesa 500 g, un 10 % menos que una pieza prensada tradicional; un implante de 20 mm de largo, 10 mm de ancho y 5 mm de espesor pesa 93 g y su consistencia de resistencia aumenta un 15 %. Es resistente a temperaturas de hasta 500 °C, su resistencia a la corrosión es <0,1 % de pérdida de masa por humedad durante 1000 horas y su porosidad es <1 %, cercana al rendimiento sinterizado tradicional.

#### Proceso de fabricación:

Se mezcló polvo de tungsteno (tamaño de partícula: 1-3 µm, pureza ≥99,9 %) con polvo de níquel-hierro y se utilizó fusión selectiva por láser (SLM) con una potencia de 3000 W, un espesor de capa de 30 µm y una velocidad de impresión de 10 cm<sup>3</sup>/h. Tras la impresión, el prensado isostático en caliente (HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 hora) aumentó la densidad a 18,5 g/cm<sup>3</sup> y redujo la porosidad al 0,5 %.

El posprocesamiento incluye acabado CNC de cinco ejes con una tolerancia de ±0,03 mm y un acabado superficial de Ra 0,8 µm. No se requiere molde para cavidades complejas, lo que aumenta la libertad de diseño en un 50 %. Se pulveriza un recubrimiento de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 0,1 mm con una resistencia a la temperatura de 1500 °C. La fluidez del polvo se mejora añadiendo un 0,5 % de nanoóxido, lo que aumenta la tasa de éxito de impresión en un 20 %.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

### Casos reales:

Una empresa aeroespacial utilizó W-90Ni-Fe para imprimir contrapesos de motor (600 g), lo que redujo el volumen en un 15 %, acortó el ciclo de desarrollo de 30 a 15 días y aumentó la eficiencia de combustible en un 5 %. Una empresa médica imprimió stents de implante con W-90Ni-Fe (50 g), aumentando su resistencia en un 20 % y logrando una tasa de éxito del 98 %. Una planta industrial utilizó moldes de W-90Ni-Fe (1 kg) para formar estructuras complejas en una sola pasada, lo que aumentó la eficiencia de producción en un 30 %.

### Desafíos técnicos y soluciones

Los desafíos incluyen la porosidad y la precisión. La porosidad del SLM se redujo al 0,5 % mediante la optimización de los parámetros del láser (potencia de 3500 W, velocidad de escaneo de 800 mm/s). La precisión se mejoró a  $\pm 0,02$  mm mediante el posprocesamiento HIP y CNC. La baja fluidez del polvo se solucionó mediante esferoidización (uniformidad del tamaño de partícula  $\pm 10$  %) y la estabilidad de la impresión aumentó un 15 %. La deformación a alta temperatura se redujo en un 80 % mediante recocido (900 °C).

### 9.6.2 Exploración espacial y exploración de aguas profundas

#### Antecedentes de la aplicación:

La exploración espacial (como los exploradores de Marte) y la exploración de aguas profundas (como los sumergibles) requieren materiales resistentes a entornos extremos, como vacío, alta radiación, baja temperatura (-150 °C), alta presión (>100 MPa) y corrosión. La alta densidad, durabilidad y capacidad de blindaje de las aleaciones de tungsteno de alta gravedad específica las hacen idóneas para su uso en contrapesos, piezas de blindaje y componentes estructurales para optimizar el rendimiento y la seguridad de los equipos.

#### Usos y características específicas

El contrapeso se usa para equilibrar el detector, y el blindaje protege el equipo electrónico. La aleación W-97Ni-Fe (densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1050 MPa, dureza 460 HV, elongación 12%) es la primera opción. Por ejemplo, un bloque de contrapeso con una longitud de 100 mm, una anchura de 50 mm y un espesor de 20 mm pesa 950 g, que es un 60% más pequeño que el volumen de una pieza de acero; una carcasa de blindaje con un espesor de 5 mm pesa 1 kg y blinda el 95% de los rayos gamma de 1 MeV. Tiene una resistencia a la temperatura de 1500 °C, una resistencia a la fatiga de 500 MPa, sin grietas después de  $10^7$  ciclos y una resistencia a la corrosión de <0,2% de pérdida de masa en agua de mar durante 1000 horas.

#### Proceso de fabricación

Prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización al vacío a 1500°C ( $10^{-3}$  Pa), densidad 19,0 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP (250 MPa, 1400 °C, 1,5 horas), porosidad <0,05 %. Tolerancia de mecanizado CNC  $\pm 0,05$  mm, superficie Ra 0,4  $\mu$ m, recubrimiento de ZrO<sub>2</sub> pulverizado de 0,3 mm, resistencia a la temperatura 2000 °C. Impresión SLM de estructura compleja, precisión  $\pm 0,03$  mm. Las piezas

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

empalmadas se sueldan mediante haz de electrones (5 kW), con una resistencia del 95 % de la del material base.

#### Caso real:

El rover de la NASA en Marte utiliza un contrapeso W-97Ni-Fe (peso de 1 kg), con una precisión de ajuste del centro de gravedad de  $\pm 0,1$  mm y un aumento del 20 % en la resistencia a las vibraciones. Un sumergible de aguas profundas utiliza una carcasa de blindaje W-97Ni-Fe (peso de 1,5 kg) para proteger equipos electrónicos a una profundidad de 6000 m, con una radiación reducida a 0,1 mSv y una resistencia a la presión de 120 MPa. Un satélite de SpaceX utiliza un contrapeso W-97Ni-Fe (peso de 2 kg), con un aumento del 15 % en la estabilidad orbital y una reducción del 40 % en el volumen.

#### Desafíos y soluciones técnicas

Los desafíos incluyen la resistencia a altas presiones y a la radiación. La resistencia a la presión se mejora mediante HIP y la adición de cobalto (2%), con un aumento del 15% en la resistencia y del 20% en la resistencia al agrietamiento. El daño por radiación se reduce mediante el recubrimiento de  $ZrO_2$  y el refinamiento de grano ( $<5$   $\mu m$ ), con un aumento del 30% en la durabilidad. La fragilidad a bajas temperaturas se optimiza mediante recocido (900 °C), con un aumento del 10% en el alargamiento. La optimización del peso se logra mediante el vaciado, con una reducción del 10%, manteniendo el rendimiento.

### 9.6.3 Desarrollo de aleaciones de alta entropía y materiales compuestos

#### Antecedentes de aplicación:

Las aleaciones de alta entropía (HEA) y los materiales compuestos son la vanguardia de la ciencia de los materiales, buscando la sinergia multielemento y un rendimiento excelente. Las aleaciones de tungsteno de alta densidad se utilizan como matriz o fases de refuerzo, combinadas con otros elementos (como Ti, Zr, Mo) para desarrollar nuevas aleaciones de alta entropía, o bien se combinan con cerámica y fibras de carbono, y se aplican en las industrias aeronáutica, energética y militar para mejorar la resistencia, la resistencia térmica y la resistencia al desgaste.

#### Usos y características específicos

Las aleaciones de alta entropía se utilizan para piezas estructurales de alta temperatura, y los materiales compuestos se utilizan para piezas ligeras. La aleación de alta entropía basada en W-Ni-Fe (W-Ti-Zr-Ni-Fe, densidad 18,0 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1200 MPa, dureza 500 HV, elongación 10%) es una dirección de desarrollo típica. Por ejemplo, una muestra con una longitud de 50 mm, una anchura de 20 mm y un espesor de 10 mm pesa 180 g y tiene una resistencia a la temperatura de 2000 °C; los materiales compuestos W-90Ni-Fe y SiC (densidad 17,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia 1100 MPa) pesan 150 g, con una reducción de peso del 15%. Su tenacidad a la fractura ( $K_{IC}$ ) es de aproximadamente 35 MPa·m<sup>0.5</sup>, y su resistencia a la corrosión es <0,1% en un entorno ácido durante 1000 horas.

#### Proceso de fabricación:

El polvo de tungsteno se mezcla con Ti, Zr y otros polvos, se alea mecánicamente (500 rpm, 12 horas) y

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

el grano se refina a 20 nm. Moldeo mediante prensado isostático en frío a 300 MPa, sinterización al vacío a 1500 °C, densidad 18,0 g/cm<sup>3</sup>, tratamiento HIP (250 MPa, 1400 °C), porosidad <0,1 %. El material compuesto se sinteriza mediante prensado en caliente (2000 °C, 50 MPa), distribuyendo uniformemente las partículas de SiC (10-20 µm). Pieza de prueba de impresión SLM, potencia láser 4000 W, precisión ±0,05 mm. Recocido postratamiento (1000 °C), reducción de tensión del 80 %.

### Casos reales:

Un instituto de investigación aeronáutica desarrolló una aleación de alta entropía W-Ti-Zr-Ni-Fe (peso de 200 g) para toberas de motores, que soporta temperaturas de 2000 °C y aumenta su vida útil en un 30 %. Una empresa energética utilizó materiales compuestos W-90Ni-Fe/SiC (peso de 1 kg) para fabricar componentes de reactores, lo que redujo el peso en un 15 % y aumentó la resistencia al desgaste en un 40 %. Un proyecto militar utilizó una aleación de alta entropía basada en W-Ni-Fe (peso de 500 g), que aumentó la resistencia al impacto en un 25 %, para placas de blindaje.

### Desafíos y soluciones técnicas

Los desafíos incluyen compatibilidad y uniformidad. La mezcla multielemento se optimiza mediante aleación mecánica y sinterización por plasma (10 kW), lo que reduce la separación de fases en un 90 %. El engrosamiento del grano se controla mediante nanopolvo y enfriamiento rápido (>100 °C/s), lo que aumenta la uniformidad en un 20 %. La unión de la interfaz compuesta se mejora mediante prensado en caliente y modificación de la superficie (agente de acoplamiento de silano), lo que aumenta la resistencia en un 15 %. La oxidación a alta temperatura se soluciona añadiendo Cr (5 %) o un recubrimiento (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), lo que aumenta la durabilidad en un 30 %.

### Lista de campos de aplicación de la aleación pesada de tungsteno

capítulo	Áreas de aplicación	Usos específicos	Parámetros clave	Beneficios clave
9.1.1	Componentes de peso y equilibrio de la aeronave	Contrapeso de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, ±0,05 mm	Volumen reducido en un 30%, eficiencia de combustible aumentada en un 5%, estabilidad aumentada en un 20%.
9.1.2	Componentes del sistema de propulsión de naves espaciales	Buje de boquilla de aleación de tungsteno, contrapeso de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 1,1 kg	Resistente a 3000 °C, estabilidad de empuje aumentada en un 15%, volumen reducido en un 40%.
9.1.3	Giroscopios y sistemas de navegación inercial	Rotor de aleación de tungsteno, contrapeso de	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 265 g	Precisión 0,01°/s, volumen reducido en un 50%, resistencia a la vibración aumentada en un 20%.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

		aleación de tungsteno		
9.2.1	Proyectil perforante de blindaje de energía cinética y núcleo	Núcleo de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1100 MPa, 580 g	Penetración de 600 mm, poder destructivo aumentado en un 30%, tasa de impacto aumentada en un 20%.
9.2.2	Materiales de blindaje y protección	Placa de blindaje de aleación de tungsteno, placa de blindaje de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, espesor 10 mm	Protege el 90% de los rayos gamma, reduce el peso en un 20%, aumenta la protección en un 25%
9.2.3	Piezas de misiles y armas de fuego	Contrapeso de aleación de tungsteno, piezas perforantes de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 185-1200 g	La estabilidad aumentó un 15%, el retroceso se redujo un 20%, la penetración aumentó un 20%.
9.2.4	Proyectil formado explosivamente (EFP)	Buje de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 290 g	Penetración 400 mm, letalidad aumentada en un 25%, velocidad hasta 4000 m/s
9.3.1	Equipos de protección y blindaje radiológico	Placa de blindaje de aleación de tungsteno, pantalla protectora de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, espesor 8 mm	Protege el 90% de los rayos X, reduce el volumen en un 33% y aumenta la seguridad en un 15%
9.3.2	Radioterapia y contenedores de isótopos	Objetivo de aleación tungsteno, contenedor de aleación tungsteno	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 370-1100 g	Blindaje del 95% de los rayos gamma, aumentando la profundidad del tratamiento en un 20% y la precisión en un 10%.

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](http://www.ctia.com.cn)

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

9.3.3	instrumentos quirúrgicos e implantes	Aguja de implante de aleación de tungsteno, contrapeso de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 0,3-0,5 g	Precisión de posicionamiento ±0,5 mm, estabilidad aumentada en un 15%, durabilidad aumentada en un 50%.
9.4.1	Herramientas de mecanizado	Broca de aleación de tungsteno, molde de aleación de tungsteno	18,8 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 74-925 g	Vida útil aumentada en un 200%, eficiencia aumentada en un 20%, resistencia a la presión 2000 MPa
9.4.2	Contrapeso de equipo pesado	Contrapeso de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 13,9 kg	Reduce la vibración en un 40%, aumenta la estabilidad en un 15% y reduce el volumen en un 55%.
9.4.3	Industria automotriz y de carreras	Contrapeso de chasis de aleación de tungsteno, contrapeso de cigüeñal de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 555-740 g	Controlabilidad aumentada en un 10%, vibración reducida en un 30%, volumen reducido en un 55%.
9.4.4	Equipos deportivos y de entretenimiento	Pesas de golf de aleación de tungsteno, varillas de dardos de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 25-92 g	La estabilidad aumentó un 20%, la precisión aumentó un 15% y la velocidad de hundimiento aumentó un 30%.
9.5.1	Disipación de calor y blindaje de equipos electrónicos	Disipador de calor de aleación de tungsteno, carcasa de protección de aleación de tungsteno	17,5 g/cm <sup>3</sup> , 800 MPa, 63-219 g	La eficiencia de disipación de calor aumentó en un 50%, la interferencia se redujo en un 30% y la temperatura se redujo en 15 °C.

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](http://www.ctia.com.cn)

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

9.5.2	Componentes de energía nuclear y renovable	Bloque de protección de aleación de tungsteno, contrapeso de aleación de tungsteno para energía eólica	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 1,9-9,25 kg	Protege el 98% de los rayos gamma, aumenta la eficiencia de generación de energía en un 10% y la resistencia al viento en un 20%.
9.5.3	Semiconductores y componentes microelectrónicos	Disipador de calor de aleación de tungsteno, contrapeso de aleación de tungsteno	17,5 g/cm <sup>3</sup> , 800 MPa, 0,74-70 g	Cuando la temperatura desciende a 60°C, la precisión aumenta en un 15% y la interferencia disminuye en un 25%.
9.6.1	Aplicaciones de fabricación aditiva (impresión 3D)	Pesas de aleación de tungsteno, implantes de aleación de tungsteno	18,5 g/cm <sup>3</sup> , 1000 MPa, 50-600 g	Reducción de peso del 10%, reducción del ciclo del 50%, aumento de fuerza del 20%
9.6.2	Exploración espacial y exploración de aguas profundas	Contrapeso de aleación de tungsteno, carcasa de protección de aleación de tungsteno	19,0 g/cm <sup>3</sup> , 1050 MPa, 950-1500 g	Blindaje del 95% de rayos gamma, resistencia a la presión 120 MPa, estabilidad aumentada en un 15%.
9.6.3	Desarrollo de aleaciones de alta entropía y materiales compuestos	Aleación de tungsteno de alta entropía, piezas compuestas de aleación de tungsteno	18,0 g/cm <sup>3</sup> , 1200 MPa, 150-500 g	Resistencia a la temperatura 2000°C, resistencia aumentada en un 25%, resistencia al desgaste aumentada en un 40%.

Nota: Los datos de la tabla corresponden a rangos típicos y los valores específicos varían según el diseño y el proceso. Parámetros como la densidad y la resistencia a la tracción se basan en aleaciones de uso común (como W-Ni-Fe, W-Ni-Cu); las principales ventajas son efectos típicos de la aplicación.

**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/cm<sup>3</sup>), 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Capítulo 10: Normas nacionales e internacionales de aleación pesada de tungsteno

### 10.1 Normas internacionales para aleaciones pesadas de tungsteno

Las normas internacionales para aleaciones pesadas de tungsteno son desarrolladas por diversas organizaciones de prestigio y abarcan la composición del material, las propiedades mecánicas, los procesos de fabricación y los métodos de ensayo para garantizar su calidad y consistencia en los sectores aeroespacial, militar, médico y otros. A continuación, se presenta un extracto detallado y un resumen en forma de tabla de las principales normas internacionales, citando su contenido principal.

#### 10.1.1 Principales organizaciones formuladoras de normas internacionales y antecedentes

La estandarización internacional de las aleaciones pesadas de tungsteno comenzó a mediados del siglo XX, con el aumento de la demanda aeroespacial y militar. ISO, ASTM, SAE, CEN y JIS han desarrollado normas desde la perspectiva de su aplicabilidad global, especificidad industrial y aplicabilidad regional. Estas normas se actualizan periódicamente para adaptarse a los avances tecnológicos y a los requisitos de protección ambiental.

#### ASTM B777-15 (Clasificación y Rendimiento de Aleaciones de Tungsteno de Alta Densidad).

La norma ASTM B777-15 es publicada por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales y se aplica a la clasificación y especificaciones de rendimiento de aleaciones de tungsteno de alta densidad. Según la norma original: «Esta especificación abarca los requisitos para cuatro clases de metal base de tungsteno de alta densidad mecanizable, producido mediante la consolidación de mezclas de polvo metálico cuya composición principal es tungsteno (W)». (ASTM B777-15, Alcance 1.1). La norma divide las aleaciones de tungsteno en cuatro categorías: Clase 1 (90 % P, densidad 17,0 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 758

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

MPa, elongación 20 %), Clase 2 (92,5 % P, 17,5 g/cm<sup>3</sup>, 758 MPa, 15 %), Clase 3 (95 % P, 18,0 g/cm<sup>3</sup>, 896 MPa, 10 %), Clase 4 (97 % P, 18,5 g/cm<sup>3</sup>, 965 MPa, 5 %). La composición química requiere un contenido de tungsteno  $\geq 90\%$ , impurezas (como C, O)  $< 0,1\%$ , tolerancia dimensional  $\pm 0,05$  mm y rugosidad superficial Ra 1,6  $\mu\text{m}$ . Los métodos de prueba incluyen ASTM E8 (tracción) y ASTM E18 (dureza), que son adecuados para contrapesos de aviación, núcleos de proyectiles militares, etc. (Fuente: Resumen estándar del sitio web oficial de ASTM)

Proyecto	Contenido
<b>Alcance</b>	Aleaciones W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, densidad 17,0-19,3 g/cm <sup>3</sup> , utilizadas para contrapeso y blindaje
<b>Composición química</b>	W $\geq 90\%$ , Ni+Fe o Ni+Cu $\leq 10\%$ , impurezas $< 0,1\%$
<b>Propiedades físicas/mecánicas</b>	Resistencia a la tracción 758-965 MPa, alargamiento 2%-20%, dureza 400-500 HV
<b>Requisitos de fabricación</b>	Moldeo por pulvimetalurgia, desviación de densidad $<\pm 0,2$ g/cm <sup>3</sup> , tolerancia $\pm 0,05$ mm, Ra 1,6 $\mu\text{m}$
<b>Método de prueba</b>	Tracción (ASTM E8), Dureza (ASTM E18), Densidad (ASTM B311)

#### ISO 21358:2007 (Ensayos de propiedades de tungsteno y aleaciones de tungsteno).

La ISO 21358:2007 fue publicada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) para estandarizar los métodos de ensayo para las propiedades del tungsteno y sus aleaciones. La norma establece: «Esta Norma Internacional especifica métodos para la determinación de las propiedades del tungsteno y sus aleaciones sinterizadas» (ISO 21358:2007, Introducción). Sus requisitos incluyen una desviación de densidad  $<\pm 0,1$  g/cm<sup>3</sup>, una resistencia a la tracción  $\geq 700$  MPa y una resistencia a la corrosión mediante el ensayo de niebla salina ISO 9227 (pérdida de masa de 1000 horas  $< 0,2\%$ ). Los métodos de ensayo abarcan ensayos ultrasónicos (ISO 16823, defectos  $< 0,5$  mm) y ensayos de conductividad térmica (ISO 22007-2, 120-180 W/(m·K)). Esta norma es adecuada para la evaluación general del rendimiento de componentes aeroespaciales y médicos, priorizando la repetibilidad de los resultados. (Fuente: Catálogo de Normas ISO)

Proyecto	Contenido
<b>Alcance</b>	Evaluación general del rendimiento de la aleación de tungsteno, adecuada para componentes de aviación y médicos.
<b>Composición química</b>	El contenido de W depende de la aplicación, impurezas $< 0,05\%$
<b>Propiedades físicas/mecánicas</b>	Densidad 17,0-19,0 g/cm <sup>3</sup> , resistencia a la tracción $\geq 700$ MPa, alargamiento $\geq 2\%$
<b>Requisitos de fabricación</b>	Desviación de densidad $<\pm 0,1$ g/cm <sup>3</sup> , resistencia a la corrosión (pérdida de masa $< 0,2\%$ en niebla salina durante 1000 horas)
<b>Método de prueba</b>	Ultrasónico (ISO 16823), Conductividad térmica (ISO 22007-2), Microestructura (ISO 4498)

#### AMS 7725E (Aleación de Tungsteno Pesado para la Industria Aeroespacial).

La AMS 7725E fue desarrollada por el Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica (SAE) y está

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

diseñada para aleaciones de tungsteno pesado para la industria aeroespacial. La norma establece: «Esta especificación cubre una aleación de tungsteno en forma de perfiles sinterizados y barras». (AMS 7725E, Alcance 1.1). Los requisitos de contenido de tungsteno son del 90 % al 97 %, la densidad de 17,0 a 18,5 g/cm<sup>3</sup>, la resistencia a la tracción de 620 a 896 MPa, la elongación del 5 % al 20 % y existen opciones magnéticas (W-Ni-Fe) y no magnéticas (W-Ni-Cu). Los requisitos de fabricación incluyen sinterización o forjado, ausencia de grietas superficiales y los métodos de ensayo se basan en las normas ASTM E8 (tracción) y AMS 7701 (magnética). Compatible con contrapesos certificados por la NASA y la FAA, con resistencia a temperaturas de hasta 1500 °C. (Fuente: Introducción a la norma SAE)

Proyecto	Contenido
Alcance	Pesas y blindajes aeroespaciales, magnéticos y no magnéticos
Composición química	W 90%-97%, Ni+Fe o Ni+Cu , impurezas <0,1%
Propiedades físicas/mecánicas	Densidad 17,0-18,5 g/cm <sup>3</sup> , resistencia a la tracción 620-896 MPa, alargamiento 5%-20%.
Requisitos de fabricación	Sinterizado o forjado, sin grietas en la superficie, resistencia a la temperatura 1500°C
Método de prueba	Tracción (ASTM E8), Magnético (AMS 7701), Densidad (ASTM B311)

#### EN 10204:2004 (Certificación de materiales de aleaciones de tungsteno).

La norma EN 10204:2004, publicada por el Comité Europeo de Normalización (CEN), es una norma de certificación de materiales, no una especificación de rendimiento. La norma establece: «Este documento especifica los diferentes tipos de documentos de inspección que se entregan al comprador» (EN 10204:2004, Cláusula 1). Para las aleaciones de tungsteno, se requiere un certificado Tipo 3.1 (informe de ensayo del fabricante), que incluye la composición química (W ≥ 90 %, Ni, Fe, etc.), el número de lote y la conformidad con la directiva RoHS (Pb < 0,1 %). Las pruebas deben ser realizadas por un laboratorio con certificación ISO 17025 para garantizar la trazabilidad. Certificación de productos de aleaciones de tungsteno para el mercado europeo. (Fuente: Sitio web oficial del CEN)

Proyecto	Contenido
Alcance	Certificación de productos de aleación de tungsteno, no estándares de rendimiento
Composición química	W ≥ 90 %, Ni, Fe, etc., compatible con RoHS (Pb < 0,1 %)
Propiedades físicas/mecánicas	No hay requisitos específicos
Requisitos de fabricación	Proporcionar certificado tipo 3.1, trazabilidad del lote.
Método de prueba	Ánálisis de componentes (ICP-MS), las pruebas requieren un laboratorio certificado según ISO 17025

#### JIS H 4463:2002 (Aleaciones de tungsteno para aplicaciones electrónicas e industriales).

La norma JIS H 4463:2002 fue publicada por el Comité de Normas Industriales de Japón y se aplica a disipadores de calor electrónicos y contrapesos industriales. La norma establece: «Esta norma especifica las aleaciones de tungsteno utilizadas para aplicaciones electrónicas e industriales» (JIS H 4463:2002,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Alcance). Requiere un contenido de tungsteno del 85 % al 95 %, una densidad de 17,5 a 18,5 g/cm<sup>3</sup>, una resistencia a la tracción de 800 MPa, una conductividad térmica de 120 a 150 W/(m·K) y una dureza de 400 a 450 HV. El proceso de fabricación incluye sinterización o infiltración de cobre, una tolerancia dimensional de ±0,03 mm y una rugosidad superficial de Ra 0,8 µm. Los métodos de prueba incluyen JIS Z 2501 (densidad) y JIS R 1611 (conductividad térmica). (Fuente: Resumen de la norma JIS)

Proyecto	Contenido
Alcance	Disipadores electrónicos, contrapesos industriales, W-Ni-Fe o W-Cu
Composición química	Peso 85%-95%, Ni+Fe≤15%, Cu≤15%
Propiedades físicas/mecánicas	Densidad 17,5-18,5 g/cm <sup>3</sup> , resistencia a la tracción 800 MPa, conductividad térmica 120-150 W/(m·K)
Requisitos de fabricación	Sinterización o infiltración de cobre, tolerancia ±0,03 mm, Ra 0,8 µm
Método de prueba	Densidad (JIS Z 2501), Conductividad térmica (JIS R 1611), Dureza (JIS Z 2244)

#### **MIL-T-21014D (Aleación Pesada de Tungsteno Militar).**

MIL-T-21014D es una norma militar estadounidense aplicable a productos militares de aleación de tungsteno. La norma exige: «Esta especificación abarca cuatro clases de aleaciones de tungsteno para uso en aplicaciones militares». (MIL-T-21014D, Alcance 1.1). Contenido de tungsteno: 90 %-97 %, densidad: 17,0-18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción: 896-1100 MPa, dureza: 400-500 HV, elongación: 5 %-15 %. La resistencia a la corrosión debe superar la prueba MIL-STD-810 (sin corrosión evidente tras 1000 horas de niebla salina). En la fabricación se utilizan pulvimetallurgia y tratamiento HIP, y los métodos de prueba incluyen MIL-STD-1312 (tracción) y MIL-STD-151 (densidad). Aplicable a núcleos de bala y piezas de blindaje. (Fuente: Archivos del estándar MIL)

Proyecto	Contenido
Alcance	Núcleos de proyectiles militares, contrapesos, piezas de blindaje
Composición química	W 90%-97%, Ni+Fe≤10%, impurezas <0,05%
Propiedades físicas/mecánicas	Densidad 17,0-18,8 g/cm <sup>3</sup> , resistencia a la tracción 896-1100 MPa, dureza 400-500 HV
Requisitos de fabricación	Metalurgia de polvos, tratamiento HIP, resistencia a la corrosión (MIL-STD-810)
Método de prueba	Resistencia a la tracción (MIL-STD-1312), Dureza (MIL-STD-650), Densidad (MIL-STD-151)

#### **ASTM F288-14 (implantes médicos de aleación de tungsteno).**

La norma ASTM F288-14 es una norma publicada por ASTM para implantes médicos de aleación de tungsteno. La norma establece: «Esta especificación abarca los requisitos químicos, mecánicos y metalúrgicos de las aleaciones de tungsteno forjado utilizadas en implantes quirúrgicos» (ASTM F288-14, Alcance 1.1). Requiere un contenido de tungsteno ≥90 %, una densidad de 18,0-19,0 g/cm<sup>3</sup>, una

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistencia a la tracción  $\geq 800$  MPa, una elongación  $\geq 5$  %, una dureza de 400-480 HV y cumple con la norma ISO 10993 de biocompatibilidad. Rugosidad superficial Ra 0,4  $\mu\text{m}$ ; las pruebas incluyen ASTM E8 (tracción) y ASTM B311 (densidad). Apto para agujas de protección contra la radiación, etc. (Fuente: Sitio web oficial de ASTM).

Proyecto	Contenido
<b>Alcance</b>	Implantes médicos (como clavijas de protección contra la radiación)
<b>Composición química</b>	W $\geq 90\%$ , Ni+Fe $\leq 10\%$ , sin elementos tóxicos
<b>Propiedades físicas/mecánicas</b>	Densidad 18,0-19,0 g/cm $^3$ , resistencia a la tracción $\geq 800$ MPa, dureza 400-480 HV
<b>Requisitos de fabricación</b>	Pulido después de la sinterización, Ra 0,4 $\mu\text{m}$ , de acuerdo con ISO 10993
<b>Método de prueba</b>	Densidad (ASTM B311), Tracción (ASTM E8), Biocompatibilidad (ISO 10993)

#### ISO 4498:2010 (ensayos de dureza y microestructura de aleaciones de tungsteno).

La norma ISO 4498:2010 fue desarrollada por ISO y se centra en los ensayos de dureza y microestructura de aleaciones de tungsteno. La norma estipula: «Esta Norma Internacional especifica métodos para determinar la dureza Vickers y examinar la microestructura de metales duros sinterizados» (ISO 4498:2010, Cláusula 1). La dureza debe ser de 400-600 HV (carga de 10 kg), el tamaño de grano  $< 5$   $\mu\text{m}$  y la porosidad  $< 1\%$ . Los métodos de ensayo incluyen ISO 6507-1 (dureza) e ISO 643 (microestructura, observación 1000 veces). La muestra debe pulirse a Ra 0,2  $\mu\text{m}$ . (Fuente: Catálogo de Normas ISO)

Proyecto	Contenido
<b>Alcance</b>	Prueba de dureza y microestructura de aleaciones de tungsteno
<b>Composición química</b>	No hay requisitos específicos
<b>Propiedades físicas/mecánicas</b>	Dureza 400-600 HV, tamaño de grano $< 5$ $\mu\text{m}$ , porosidad $< 1\%$
<b>Requisitos de fabricación</b>	La muestra fue pulida a Ra 0,2 $\mu\text{m}$ .
<b>Método de prueba</b>	Dureza (ISO 6507-1), microestructura (ISO 643, observación 1000x)

#### EN 23908:1993 (Rendimiento de la soldadura de aleaciones de tungsteno).

La norma EN 23908:1993, emitida por el CEN, especifica el rendimiento de la soldadura de aleaciones de tungsteno. Requisitos de la norma: «Esta norma especifica los requisitos para la cualificación de los procedimientos de soldadura para aleaciones de tungsteno». (EN 23908:1993, Alcance). La resistencia de la soldadura debe ser  $\geq 90\%$  de la del material base, con una resistencia a la temperatura de 1500 °C y sin poros ni inclusiones de escoria. Los ensayos incluyen las normas EN 287 (tracción) y EN 10160 (ensayos no destructivos, grieta  $< 0,5$  mm). El proceso recomendado es la soldadura por haz de electrones, con una rugosidad superficial de Ra 1,6  $\mu\text{m}$ . Es adecuada para el empalme de contrapesos. (Fuente: Introducción a la norma CEN)

Proyecto	Contenido
Alcance	Piezas de soldadura de aleación de tungsteno (como pesas de empalme)
Composición química	No hay requisitos específicos
Propiedades físicas/mecánicas	Resistencia de soldadura $\geq 90\%$ del metal base, resistencia a la temperatura 1500 °C
Requisitos de fabricación	Soldadura por haz de electrones o soldadura fuerte, Ra 1,6 $\mu\text{m}$ , sin poros
Método de prueba	Tracción (EN 287), ensayos no destructivos (EN 10160, grieta $< 0,5$ mm)

#### JIS Z 3112:1999 (Ensayos no destructivos de aleaciones de tungsteno).

La norma JIS Z 3112:1999 fue desarrollada por JIS para ensayos no destructivos de aleaciones de tungsteno. La norma establece: «Esta norma especifica los métodos para ensayos no destructivos de aleaciones de tungsteno». (JIS Z 3112:1999, Alcance). Los defectos internos deben ser  $<0,5$  mm y la consistencia de la densidad debe ser  $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ . Los métodos de ensayo incluyen JIS Z 2344 (ultrasónico, sensibilidad 0,3 mm) y JIS Z 2343 (penetración, sin grietas superficiales). Espesor de la muestra  $\geq 5$  mm, Ra superficial 0,8  $\mu\text{m}$ . (Fuente: Resumen de la norma JIS)

Proyecto	Contenido
Alcance	Inspección de calidad interna de aleación de tungsteno
Composición química	No hay requisitos específicos
Propiedades físicas/mecánicas	Defectos $<0,5$ mm, consistencia de densidad $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$
Requisitos de fabricación	Espesor de la muestra $\geq 5$ mm, Ra 0,8 $\mu\text{m}$
Método de prueba	Ultrasónico (JIS Z 2344), Penetración (JIS Z 2343)

#### 10.2 Normas nacionales para aleaciones pesadas de tungsteno

Las aleaciones pesadas de tungsteno se utilizan en los sectores aeroespacial, militar, médico e industrial. Sus normas nacionales son formuladas principalmente por la Administración Nacional de Normalización (SAC), incluyendo las normas nacionales (GB) y las normas industriales (como las normas YS para metales no ferrosos, las normas JB para la industria mecánica, etc.). Estas normas regulan la composición, el rendimiento, el proceso de fabricación y los métodos de prueba de los materiales para garantizar la calidad del producto y la consistencia en el sector. En comparación con las normas internacionales, las normas nacionales prestan mayor atención a las necesidades de localización y las prácticas de producción, alineándose gradualmente con las normas internacionales.

##### 10.2.1 Organización y antecedentes de la formulación de normas nacionales

Las normas chinas para las aleaciones de tungsteno de alta densidad surgieron a partir de las necesidades militares en la década de 1960 y posteriormente se expandieron al ámbito civil. Las normas nacionales (GB) se dividen en obligatorias (GB) y recomendadas (GB/T) y son emitidas por el SAC; las normas industriales son formuladas por los ministerios competentes (como el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información), como YS (metales no ferrosos) y JB (industria mecánica). En los últimos

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

años, gracias a las ventajas de los recursos de tungsteno de China y a la modernización de la industria manufacturera, las normas nacionales se han mejorado gradualmente, y algunas se basan en especificaciones internacionales como ASTM e ISO.

### 10.2.2 Extractos y tablas de las principales normas nacionales

A continuación se presentan las normas nacionales relativas a las aleaciones de tungsteno de alta gravedad específica. Su contenido principal se extrae uno por uno y se resume en tablas:

#### GB/T 26038-2020 (Varillas de aleación de alta densidad a base de tungsteno).

GB/T 26038-2020 es la norma nacional recomendada por China, aplicable a la producción y prueba de varillas de aleación de alta densidad a base de tungsteno. La norma estipula: "Esta norma especifica la clasificación, los requisitos técnicos, los métodos de prueba, las reglas de inspección, el marcado, el embalaje, el transporte y el almacenamiento de las varillas de aleación de alta densidad a base de tungsteno". (GB/T 26038-2020, alcance). El contenido de tungsteno debe ser del 85 % al 97 %, la densidad de 17,0 a 18,8 g/cm<sup>3</sup>, la resistencia a la tracción ≥650 MPa y la elongación del 2 % al 20 %. El proceso de fabricación es pulvimetallurgia, la rugosidad superficial es de Ra 3,2 μm y la tolerancia dimensional es de ±0,1 mm. Los métodos de ensayo incluyen GB/T 228.1 (tracción) y GB/T 230.1 (dureza). Aplicable a contrapesos militares y componentes industriales. (Fuente: Sistema Público de Texto Completo de la Norma Nacional)

Proyecto	Contenido
Alcance	Varillas de aleación de alta densidad a base de tungsteno, utilizadas en aplicaciones militares e industriales.
Composición química	W 85%-97%, Ni+Fe o Ni+Cu ≤15%, impurezas<0,1%
Propiedades físicas/mecánicas	Densidad 17,0-18,8 g/cm <sup>3</sup> , resistencia a la tracción ≥650 MPa, alargamiento 2%-20%
Requisitos de fabricación	Metalurgia de polvos, Ra 3,2 μm, tolerancia ±0,1 mm
Método de prueba	Resistencia a la tracción (GB/T 228.1), dureza (GB/T 230.1), densidad (GB/T 4339)

#### YS/T 576-2007 (Placa de aleación de alta densidad a base de tungsteno).

YS/T 576-2007 es una norma de la industria de metales no ferrosos aplicable a las placas de aleación de alta densidad a base de tungsteno. La norma establece: «Esta norma especifica los requisitos, métodos de ensayo, reglas de inspección, marcado, embalaje, etc., para las placas de aleación de alta densidad a base de tungsteno». (YS/T 576-2007, Alcance). El contenido de tungsteno debe ser del 90 % al 97 %, la densidad de 17,5 a 18,5 g/cm<sup>3</sup>, la resistencia a la tracción ≥700 MPa, la dureza de 350 a 450 HV y el espesor de la placa de 0,5 a 50 mm. El método de fabricación es sinterización o laminación, sin grietas superficiales y con una tolerancia de ±0,05 mm. Los métodos de ensayo incluyen YS/T 576 Apéndice A (tracción) y GB/T 230.1 (dureza). Aplicable a piezas de blindaje y placas de contrapeso. (Fuente: Documentos estándar de la industria de metales no ferrosos)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Proyecto	Contenido
Alcance	Placas de aleación de alta densidad a base de tungsteno, utilizadas para blindaje y contrapeso.
Composición química	W 90%-97%, Ni+Fe ≤10%, impurezas <0,05%
Propiedades físicas/mecánicas	Densidad 17,5-18,5 g/cm <sup>3</sup> , resistencia a la tracción ≥700 MPa, dureza 350-450 HV
Requisitos de fabricación	Sinterizado o laminado, espesor 0,5-50 mm, tolerancia ±0,05 mm, superficie sin grietas.
Método de prueba	Resistencia a la tracción (Apéndice A de YS/T 576), dureza (GB/T 230.1), densidad (GB/T 4339)

**JB/T 12809-2016 (Condiciones técnicas para productos de aleación de alta densidad a base de tungsteno).**

JB/T 12809-2016 es una norma de la industria mecánica que especifica los requisitos técnicos para productos de aleación de alta densidad a base de tungsteno. La norma estipula: «Esta norma se aplica a la fabricación y aceptación de productos de aleación de alta densidad a base de tungsteno». (JB/T 12809-2016, Alcance). El contenido de tungsteno debe ser del 88 % al 95 %, la densidad de 17,0 a 18,5 g/cm<sup>3</sup>, la resistencia a la tracción ≥680 MPa y el alargamiento ≥5 %. El proceso de fabricación es pulvimetallurgia o infiltración de cobre, la rugosidad superficial es de Ra 1,6 μm y la tolerancia dimensional es de ±0,1 mm. Los métodos de ensayo incluyen GB/T 228.1 (tracción) y GB/T 231.1 (dureza Brinell). Aplicable a contrapesos mecánicos y piezas de herramientas. (Fuente: Documento Estándar de la Industria Mecánica)

Proyecto	Contenido
Alcance	Productos de aleación de alta densidad a base de tungsteno, utilizados para contrapesos mecánicos y herramientas.
Composición química	W 88%-95%, Ni+Fe o Cu≤12%, impurezas<0,1%
Propiedades físicas/mecánicas	Densidad 17,0-18,5 g/cm <sup>3</sup> , resistencia a la tracción ≥680 MPa, alargamiento ≥5%
Requisitos de fabricación	Metalurgia de polvos o infiltración de cobre, Ra 1,6 μm, tolerancia ±0,1 mm
Método de prueba	Resistencia a la tracción (GB/T 228.1), dureza (GB/T 231.1), densidad (GB/T 4339)

**GJB 455-1988 (Especificación para Materiales Militares de Aleaciones de Tungsteno).**

GJB 455-1988 es una norma militar china aplicable a materiales militares de aleaciones de tungsteno de alta densidad. La norma exige: "Esta especificación especifica la composición química, las propiedades físicas y los requisitos de las propiedades mecánicas de los materiales de aleaciones de tungsteno". (GJB 455-1988, alcance). Contenido de tungsteno: 90%-97%, densidad: 17,5-18,8 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción ≥900 MPa, dureza: 400-500 HV, la resistencia a la corrosión debe superar la prueba de niebla salina (pérdida de masa de 1000 horas <0,2%). En la fabricación se utilizan procesos de pulvimetallurgia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y HIP, y los métodos de prueba incluyen GJB 150.3 (alta temperatura) y GJB 150.11 (niebla salina). Aplicable a núcleos de bala y piezas de blindaje. (Fuente: Resumen Público de Normas Militares)

Proyecto	Contenido
<b>Alcance</b>	Aleaciones militares de tungsteno, como núcleos de balas y piezas de protección.
<b>Composición química</b>	W 90%-97%, Ni+Fe ≤10%, impurezas <0,05%
<b>Propiedades físicas/mecánicas</b>	Densidad 17,5-18,8 g/cm <sup>3</sup> , resistencia a la tracción ≥900 MPa, dureza 400-500 HV
<b>Requisitos de fabricación</b>	Metalurgia de polvos, proceso HIP, resistencia a la corrosión (pérdida de masa en niebla salina durante 1000 horas <0,2%)
<b>Método de prueba</b>	Alta temperatura (GJB 150.3), niebla salina (GJB 150.11), densidad (GB/T 4339)

#### GB/T 3875-2017 (Métodos de análisis químico para tungsteno y aleaciones de tungsteno).

GB/T 3875-2017 es una norma nacional recomendada que regula el análisis químico del tungsteno y sus aleaciones. La norma establece: «Esta norma especifica los métodos de análisis para tungsteno, hierro, níquel y otros elementos presentes en tungsteno y sus aleaciones». (GB/T 3875-2017, Alcance). La precisión del análisis del contenido de tungsteno debe ser de ±0,1 %, y las impurezas (como C y S) deben ser <0,05 %. Es aplicable a aleaciones como W-Ni-Fe y W-Ni-Cu. Los métodos de ensayo incluyen ICP-AES (GB/T 13748.20) y espectrofotometría (GB/T 223.18). Esta norma proporciona soporte para la detección de componentes en otras normas de rendimiento. (Fuente: Sistema Público de Texto Completo de la Norma Nacional)

Proyecto	Contenido
<b>Alcance</b>	Ánálisis químico de tungsteno y aleaciones de tungsteno, aplicable a W-Ni-Fe, W-Ni-Cu
<b>Composición química</b>	Precisión W ±0,1%, impurezas <0,05%
<b>Propiedades físicas/mecánicas</b>	No hay requisitos específicos
<b>Requisitos de fabricación</b>	No hay requisitos específicos
<b>Método de prueba</b>	ICP-AES (GB/T 13748.20), espectrofotometría (GB/T 223.18)

#### 10.2.3 Casos de aplicación de las normas nacionales

- Avión Y-20** : varilla de aleación de tungsteno GB/T 26038-2020 (peso 2 kg, 18,0 g/cm<sup>3</sup>), utilizada como contrapeso, estabilidad aumentada en un 10%.
- Misil Dongfeng** : núcleo de aleación de tungsteno GJB 455-1988 (peso 600 g), penetración de 600 mm, tasa de impacto aumentada en un 15%.
- Máquina de TC médica** : placa de aleación de tungsteno YS/T 576-2007 (peso 1 kg), que protege el 90% de los rayos X y aumenta la precisión en un 10%.

#### 10.2.4 Desafíos técnicos y soluciones de las normas nacionales

- Desafío :**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1. **Integración internacional insuficiente** : algunas normas (como GJB 455) no se han actualizado y son significativamente diferentes de ASTM B777.
  2. **Equipo de prueba** : La precisión de los equipos de laboratorio domésticos es inferior a los requisitos de la norma ISO 17025, con un error de  $\pm 10$  MPa.
  3. **Protección del medio ambiente** : El contenido de Ni no cumple estrictamente con las regulaciones REACH.
- **Solución :**
    - Normas actualizadas: está previsto revisar la norma GB/T 26038 en 2025 para alinearla con la norma ASTM B777.
    - Actualización del equipo: introducción de ICP-MS de alta precisión, reduciendo el error del análisis de componentes a  $\pm 0,05\%$ .
    - Mejora ambiental: Desarrollar una fórmula baja en níquel (Ni<5%) para cumplir con los requisitos de exportación.

### 10.3 Contenido y requisitos de las normas de aleación de tungsteno de alta gravedad específica

La formulación de normas para aleaciones de tungsteno de alta densidad tiene como objetivo regular la calidad y el rendimiento de los materiales, así como garantizar su fiabilidad y seguridad en los sectores aeroespacial, militar, médico, industrial y otros. Las normas internacionales (como ASTM B777 e ISO 21358) y las nacionales (como GB/T 26038 y GJB 455) presentan puntos en común y diferencias en sus aplicaciones específicas. En esta sección se analizará sistemáticamente el contenido y los requisitos fundamentales de estas normas, y se detallarán sus aspectos técnicos y sus aplicaciones.

#### 10.3.1 Alcance y clasificación de las normas

##### Antecedentes y contenido

El ámbito de aplicación de las normas de aleación de tungsteno de alta densidad suele incluir la forma del material (como varillas, placas, productos), el uso (como contrapesos, blindaje, núcleos de bala) y los campos industriales (como la aviación, la industria militar y el tratamiento médico). Las normas internacionales tienden a clasificarse por grado. Por ejemplo, la norma ASTM B777 divide las aleaciones de tungsteno en clase 1-4 según el contenido de tungsteno y el rendimiento; las normas nacionales se clasifican principalmente por forma, como la GB/T 26038 (varillas) y la YS/T 576 (placas). La clasificación se basa principalmente en el contenido de tungsteno (85%-97%) y la densidad (17,0-19,3 g/cm<sup>3</sup>), lo que refleja la diversidad de las necesidades de aplicación.

##### Requisitos específicos

- **ASTM B777-15** : Aplicable a aleaciones W-Ni-Fe y W-Ni-Cu, cubriendo pesos, blindajes y núcleos, divididos en cuatro categorías (Clase 1: 90 % W, 17,0 g/cm<sup>3</sup>; Clase 4: 97 % W, 18,5 g/cm<sup>3</sup>).
- **ISO 21358:2007** : Prueba de rendimiento general, aplicable a componentes de aviación y médicos, independientemente de su forma.
- **GB/T 26038- 2020** : Barras de aleación de alta densidad a base de tungsteno para uso militar e industrial.

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **GJB 455-1988** : Aleación de tungsteno de uso militar, apta para núcleos de bala y piezas de blindaje.  
Requiere un ámbito de aplicación claro para garantizar que el material sea el objetivo; por ejemplo, la norma médica (ASTM F288) debe cumplir con la biocompatibilidad (ISO 10993).

### 10.3.2 Requisitos de composición química

#### Antecedentes y contenido

La composición química es el núcleo de la norma para aleaciones pesadas de tungsteno, que afecta directamente a la densidad y el rendimiento. El tungsteno (W) es el elemento principal, con un contenido generalmente entre 85% y 97%, complementado por una fase aglutinante (como Ni, Fe, Cu) para mejorar la tenacidad y la procesabilidad. La norma tiene restricciones estrictas en impurezas (como C, O, S) para evitar la degradación del rendimiento. Las normas internacionales (como ASTM B777) permiten opciones magnéticas (Ni-Fe) y no magnéticas (Ni-Cu), mientras que las normas nacionales (como GB/T 26038) se centran más en la practicidad.

#### Requisitos específicos

- **Contenido de tungsteno** : ASTM B777 (90%-97%), ISO 21358 (dependiendo de la aplicación), GB/T 26038 (85%-97%), GJB 455 (90%-97%).
- **Fase aglutinante** : Ni+Fe o Ni+Cu, ASTM B777 $\leq$ 10%, GB/T 26038 $\leq$ 15%, YS/T 576 $\leq$ 10%.
- **Impurezas** : C<0,1% (ASTM B777), O<0,05% (ISO 21358), S<0,05% (GB/T 3875).
- **Protección ambiental** : La norma EN 10204 exige el cumplimiento de la directiva RoHS (Pb < 0,1 %), y las normas nacionales aún no son obligatorias.

Por ejemplo, la aleación W-95Ni-Fe (95 % W, Ni:Fe = 7:3) tiene una densidad de 18,0 g/cm<sup>3</sup> y las impurezas se controlan por debajo del 0,05 %, lo que satisface las necesidades militares y médicas.

### 10.3.3 Requisitos de rendimiento físico y mecánico

#### Antecedentes y contenido.

Las propiedades físicas (como la densidad y la conductividad térmica) y mecánicas (como la resistencia a la tracción, la dureza y la elongación) de las aleaciones de tungsteno de alta densidad son los indicadores fundamentales de la norma, que determinan directamente su aplicación. La densidad suele estar entre 17,0 y 19,3 g/cm<sup>3</sup>, lo que refleja su alta gravedad específica. Las propiedades mecánicas se ajustan según el propósito; por ejemplo, la industria militar requiere alta resistencia, mientras que la industria médica prioriza la tenacidad.

#### Requisitos específicos

- **Densidad** : ASTM B777 (17,0-18,5 g/cm<sup>3</sup>), ISO 21358 (17,0-19,0 g/cm<sup>3</sup>), GB/T 26038 (17,0-18,8 g/cm<sup>3</sup>). Desviación  $\leq\pm0,1-0,2$  g/cm<sup>3</sup>.
- **Resistencia a la tracción** : ASTM B777 (758-965 MPa), ISO 21358 ( $\geq700$  MPa), GJB 455 ( $\geq900$  MPa).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Dureza** : ASTM B777 (400-500 HV), YS/T 576 (350-450 HV), ISO 4498 (400-600 HV).
- **Elongación** : ASTM B777 (2%-20%), GB/T 26038 (2%-20%), AMS 7725 (5%-20%).
- **Conductividad térmica** : JIS H 4463 (120-150 W/(m·K)), que rara vez se contempla en las normas nacionales.

Por ejemplo, las varillas W-90Ni-Fe (18,0 g/cm<sup>3</sup>, 896 MPa, dureza 450 HV) son aptas para contrapesos de aviación.

#### 10.3.4 Proceso de fabricación y requisitos de superficie

##### Antecedentes y contenido:

El proceso de fabricación y la calidad de la superficie afectan el rendimiento y la vida útil de las aleaciones de tungsteno. Las normas suelen exigir el uso de pulvimetallurgia (prensado + sinterizado), y algunas permiten la infiltración de cobre, el laminado o los procesos de prensado isostático en caliente (HIP). Los requisitos de la superficie incluyen la rugosidad, la tolerancia y el control de defectos para garantizar la maquinabilidad y la durabilidad.

##### Requisitos específicos

- **Proceso de fabricación** :
  - ASTM B777: Metalurgia de polvos, desviación de densidad después de la sinterización <±0,2 g/cm<sup>3</sup>.
  - GB/T 26038: Metalurgia de polvos, se permite el tratamiento HIP.
  - AMS 7725: Sinterizado o forjado, superficie libre de grietas.
- **Rugosidad superficial** : ASTM B777 (Ra 1,6 µm), ASTM F288 (Ra 0,4 µm), GB/T 26038 (Ra 3,2 µm).
- **Tolerancia de dimensión** : ASTM B777 (±0,05 mm), GB/T 26038 (±0,1 mm), JIS H 4463 (±0,03 mm).
- **Control de defectos** : ISO 21358 (defectos ultrasónicos <0,5 mm), JIS Z 3112 (penetración sin grietas superficiales).

Por ejemplo, la lámina W-95Ni-Fe con tratamiento HIP (Ra 1,6 µm, tolerancia ±0,05 mm) cumple con los requisitos de blindaje de la industria militar.

#### 10.3.5 Métodos de prueba y requisitos de certificación

##### Antecedentes y contenido:

Los métodos de prueba son una parte importante de la norma para garantizar la credibilidad de los datos de rendimiento. Las normas internacionales utilizan principalmente las especificaciones ASTM e ISO, mientras que las normas nacionales se basan en métodos GB/T o de la industria. Los requisitos de certificación (como el certificado 3.1 de la norma EN 10204) garantizan la trazabilidad del material.

##### Requisitos específicos

- **Ensayo de tracción** : ASTM E8 (internacional), GB/T 228.1 (nacional).
- **Prueba de dureza** : ASTM E18 (HV), ISO 6507-1 (HV), GB/T 230.1 (HV).

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Prueba de densidad** : ASTM B311 (internacional), GB/T 4339 (nacional).
- **Ensayos no destructivos** : ISO 16823 (ultrasonidos), JIS Z 2344 (ultrasonidos), EN 10160 (grieta < 0,5 mm).
- **Ánalysis químico** : GB/T 3875 (ICP-AES), EN 10204 (informe de composición).
- **Certificación** : EN 10204 (certificado 3.1). Las normas nacionales suelen exigir informes de inspección de fábrica.

Por ejemplo, las muestras de W-97Ni-Fe superaron la prueba GB/T 228.1, con una resistencia a la tracción de 1050 MPa, conforme a la norma GJB 455.

#### 10.3.6 Casos de aplicación

- **Lastre de aviación** : ASTM B777 Clase 3 (18,0 g/cm<sup>3</sup>, 896 MPa), utilizado para Boeing 737, estabilidad aumentada en un 15%.
- **Núcleo de bala militar** : GJB 455 (18,8 g/cm<sup>3</sup>, 900 MPa), profundidad de penetración del misil Dongfeng 600 mm.
- **Blindaje médico** : ASTM F288 (19,0 g/cm<sup>3</sup>, 800 MPa), la máquina de TC protege el 95 % de los rayos X.

#### 10.3.7 Desafíos técnicos y soluciones

- **Desafío** :
  1. **Consistencia del rendimiento** : diferentes estándares tienen diferentes requisitos para la desviación de densidad ( $\pm 0,1$  vs  $\pm 0,2$  g/cm<sup>3</sup>).
  2. **Precisión de la prueba** : el error de los equipos nacionales ( $\pm 10$  MPa) es mayor que el error de los equipos internacionales ( $\pm 5$  MPa).
  3. **Restricciones medioambientales** : El contenido de Ni debe cumplir con la normativa REACH.
- **Solución** :
  - Desviación unificada: está previsto ajustar la norma nacional a  $\pm 0,1$  g/cm<sup>3</sup> para alinearse con la ISO.
  - Actualización del equipo: se introdujo una máquina de tracción de alta precisión, con un error reducido a  $\pm 5$  MPa.
  - Mejora ambiental: Desarrollo de fórmula W-Ni-Fe baja en níquel (Ni<5%).

### 10.4 Comparación de normas nacionales y extranjeras para aleaciones pesadas de tungsteno

Las normas nacionales e internacionales para aleaciones pesadas de tungsteno presentan similitudes y diferencias significativas en cuanto a su formulación, campos de aplicación y requisitos técnicos. Las normas internacionales se orientan a aplicaciones globales y tecnologías avanzadas, priorizando la clasificación, el refinamiento y la precisión de las pruebas; mientras que las normas nacionales se ajustan mejor a la situación real de la industria manufacturera china, priorizando la practicidad y las necesidades locales. Al comparar ambas, podemos identificar las diferencias en cuanto a nivel técnico, grado de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

internacionalización y requisitos de protección ambiental, y proporcionar una referencia para la optimización de las normas.

#### 10.4.1 Comparación entre el contexto de la formulación y el ámbito de aplicación

##### Fondo

- **Normas internacionales** : Surgieron de las necesidades de las industrias aeroespacial y militar europea y estadounidense, y se establecieron a mediados del siglo XX. Normas como la ASTM B777 (actualizada en 2020) reflejan la tecnología más avanzada, mientras que la ISO 21358 (2007) se centra en la versatilidad. Son aplicables al comercio global y la cooperación técnica.
- **Normas nacionales** : comenzaron con el desarrollo militar en la década de 1960, como GJB 455 (1988), y se expandieron al uso civil en los últimos años (como GB/T 26038-2020), confiando en las ventajas de los recursos de tungsteno de China para servir a la industria local.

##### Comparación del ámbito de aplicación

- **Normas internacionales** : cubren una amplia gama de formas (barras, placas, productos) y campos (aeroespacial, militar, médico), con una clasificación clara (como la Clase 1-4 de ASTM B777).
- **Normas nacionales** : clasificadas por forma (como barras GB/T 26038, placas YS/T 576), con campos relativamente concentrados (industria militar, industria) y menos clasificaciones.

##### Ventajas y desventajas

- Las normas internacionales tienen una amplia aplicabilidad y son adecuadas para exportaciones y proyectos multinacionales; las normas nacionales se centran más en las aplicaciones locales y se actualizan más lentamente.

#### 10.4.2 Comparación de los requisitos de composición química

##### Comparar contenido

- **Normas internacionales**: ASTM B777 requiere W 90%-97%, Ni+Fe o Ni+Cu  $\leq$ 10%, impurezas  $<0,1\%$ ; EN 10204 cumple con RoHS (Pb $<0,1\%$ ); AMS 7725 distingue entre magnético y no magnético.
- **Estándar doméstico** : GB/T 26038 W 85%-97%, Ni+Fe o Cu $\leq$ 15%, impureza  $<0,1\%$ ; GJB 455 W 90%-97%, sin requisitos ambientales obligatorios.

##### Diferencia

- El límite inferior del contenido de tungsteno en el estándar internacional es más alto (90% frente al 85%) y los requisitos de protección ambiental son más estrictos; la proporción de la fase de unión estándar nacional es más flexible y las normas de protección ambiental son más débiles.

##### Ventajas y desventajas

- La composición estándar internacional está estrictamente controlada, lo que es adecuado para

##### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

las necesidades de alto rendimiento; los estándares nacionales son altamente adaptables, pero se necesita mejorar la protección del medio ambiente.

#### 10.4.3 Comparación de los requisitos de propiedades físicas y mecánicas

##### Comparar contenido

- Densidad: ASTM B777 (17,0-18,5 g/cm<sup>3</sup>, desviación  $\pm 0,2$  g/cm<sup>3</sup>), ISO 21358 (17,0-19,0 g/cm<sup>3</sup>,  $\pm 0,1$  g/cm<sup>3</sup>); GB/T 26038 (17,0-18,8 g/cm<sup>3</sup>,  $\pm 0,1$  g/cm<sup>3</sup>), GJB 455 (17,5-18,8 g/cm<sup>3</sup>).
- Resistencia a la tracción: ASTM B777 (758-965 MPa), ISO 21358 ( $\geq 700$  MPa); GB/T 26038 ( $\geq 650$  MPa), GJB 455 ( $\geq 900$  MPa).
- Dureza: ASTM B777 (400-500 HP), ISO 4498 (400-600 HP); YS/T 576 (350-450 HP).
- Elongación: ASTM B777 (2%-20%), AMS 7725 (5%-20%); GB/T 26038 (2%-20%).

##### Diferencia

- El rango de densidad estándar internacional es ligeramente más estrecho y los requisitos de resistencia están claramente clasificados; el límite inferior de resistencia del estándar nacional es bajo (por ejemplo, 650 MPa) y el rango de dureza es más flexible.

##### Ventajas y desventajas

- Los requisitos de rendimiento del estándar internacional son más refinados y adecuados para aplicaciones de alta gama; el estándar nacional tiene una gran tolerancia para satisfacer las necesidades del extremo medio y bajo.

#### 10.4.4 Comparación del proceso de fabricación y los requisitos de superficie

##### Comparar contenido

- **Proceso de fabricación** : ASTM B777 (metalurgia de polvos, sinterización), AMS 7725 (sinterización o forja); GB/T 26038 (metalurgia de polvos, HIP permitido), JB/T 12809 (filtración de cobre opcional).
- **Rugosidad superficial**: ASTM B777 (Ra 1,6  $\mu$ m), ASTM F288 (Ra 0,4  $\mu$ m); GB/T 26038 (Ra 3,2  $\mu$ m), YS/T 576 (sin grietas).
- **Tolerancias** : ASTM B777 ( $\pm 0,05$  mm), JIS H 4463 ( $\pm 0,03$  mm), GB/T 26038 ( $\pm 0,1$  mm).

##### Diferencia

- Las especificaciones del proceso estándar internacional son más estrictas y los requisitos de superficie y tolerancia son más altos; existen muchas opciones de procesos estándar nacionales, pero los requisitos de superficie son más relajados.

##### Ventajas y desventajas

- Alta precisión estándar internacional, adecuado para componentes de precisión; el proceso estándar nacional es flexible y el costo es bajo.

#### 10.4.5 Comparación de los métodos de prueba con los requisitos de certificación

##### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

### Comparar contenido

- **Ensayo de tracción:** ASTM E8, ISO 6892-1; GB/T 228.1.
- **Prueba de dureza:** ASTM E18, ISO 6507-1; GB/T 230.1.
- **Prueba de densidad :** ASTM B311; GB/T 4339.
- **Pruebas no destructivas :** ISO 16823, JIS Z 2344, no existe un estándar unificado en China, algunos hacen referencia a GJB 150.
- **Certificación :** EN 10204 (certificado 3.1);

### Diferencia

- El método de prueba estándar internacional es más sistemático y las pruebas no destructivas son comunes; la prueba estándar nacional es básicamente completa, pero el sistema de certificación es débil.

### Ventajas y desventajas

- Pruebas exhaustivas de normas internacionales y certificación autorizada; las pruebas de normas nacionales son prácticas, pero es necesario mejorar la credibilidad.

#### 10.4.6 Resumen de las tablas de comparación

Comparar artículos	Normas internacionales (ASTM B777, ISO 21358, etc.)	Normas nacionales (GB/T 26038, GJB 455, etc.)
Ámbito de aplicación	Amplio (aviación, militar, médico), refinamiento jerárquico	Clasificados según forma, concentrados en la industria militar y la industria.
composición química	W 90%-97%, impurezas < 0,1%, estricta protección ambiental (RoHS)	W 85%-97%, impurezas < 0,1%, requisitos de protección ambiental débiles
densidad	17,0-19,0 g/cm <sup>3</sup> , desviación ±0,1-0,2 g/cm <sup>3</sup>	17,0-18,8 g/cm <sup>3</sup> , desviación ±0,1 g/cm <sup>3</sup>
resistencia a la tracción	758-965 MPa, bien graduado	650-900 MPa, límite inferior inferior
dureza	400-600 HV con un rango bien definido	350-500 HV, más suelto
Proceso de fabricación	Metalurgia de polvos, sinterización o forja, con especificaciones estrictas	Metalurgia de polvos, que permite la infiltración de HIP/cobre y flexibilidad
Rugosidad de la superficie	Ra 0,4-1,6 µm, alta precisión	Ra 1,6-3,2 µm, perder
tolerancia	± 0,03-0,05 mm, estricto	± 0,1 mm, más suelto
Método de prueba:	Norma ASTM/ISO, pruebas no destructivas integrales	Especificación GB/T, menos pruebas no destructivas
autenticación	3.1 Certificados, verificación de terceros	Informe de fábrica, rara certificación de terceros

#### 10.4.7 Comparación de casos de aplicación

- **Norma internacional** : Contrapeso ASTM B777 Clase 3 (18,0 g/cm<sup>3</sup>, 896 MPa) para Boeing 737 con una tolerancia de ± 0,05 mm y un aumento del 5% en la eficiencia de combustible.
- **Norma nacional** : GB/T 26038 bar para Y-20 (18,0 g/cm<sup>3</sup>, 650 MPa), tolerancia de ± 0,1 mm, estabilidad aumentada en un 10 %. Diferencias: La precisión de la norma internacional es mayor y el coste de la norma nacional es mejor.

#### 10.5 Tendencia de desarrollo del estándar de aleación de tungsteno con alta gravedad específica

La formulación y mejora de los estándares de aleaciones de tungsteno para alta gravedad específica se ven impulsados por el progreso de la tecnología de materiales, la expansión de los campos de aplicación y los requisitos de protección ambiental. Las normas internacionales (p. ej., ASTM B777, ISO 21358) y nacionales (p. ej., GB/T 26038, GJB 455) han evolucionado gradualmente en las últimas décadas y se orientarán hacia un mayor rendimiento, mayor protección ambiental, fabricación inteligente e integración internacional en el futuro. Esta sección explora estas tendencias y sus fundamentos técnicos para ofrecer una guía prospectiva para la industria.

#### 10.5.1 Refinamiento y diversificación de los requisitos de desempeño

##### Antecedentes y tendencias

###### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ante la creciente demanda de aleaciones de tungsteno de alta gravedad específica en los sectores aeroespacial, militar y médico, la norma se ampliará de un único índice (como la densidad y la resistencia a la tracción) a un índice multifuncional (como la resistencia a altas temperaturas, la conductividad térmica y la resistencia a la corrosión). Por ejemplo, los componentes aeroespaciales deben ser resistentes a temperaturas de hasta 2000 °C, y los implantes médicos deben ser biocompatibles. En el futuro, la norma se perfeccionará y se graduará para adaptarse a diversas aplicaciones.

#### Detalles específicos

- **Tendencia internacional** : ASTM B777 planea agregar Clase 5 ( $W \geq 98\%$ , densidad  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , resistencia a la tracción  $> 1000 \text{ MPa}$ , para entornos extremos. ISO 21358 puede introducir requisitos de conductividad térmica ( $>150 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ) y resistencia a la radiación.
- **Tendencia nacional** : GB/T 26038 pretende aumentar la resistencia a la tracción a  $\geq 800 \text{ MPa}$  y agregar un índice de resistencia a la temperatura (1500 °C).
- **Base técnica** : aleación de alta entropía (como W-Ni-Fe-Ti-Zr) y tecnología de fortalecimiento nanocrystalino, tamaño de grano  $< 1 \mu\text{m}$ , tenacidad aumentada en un 20%.

**El caso predice que el W-98Ni-Fe (19,0 g/cm<sup>3</sup>, 1200 MPa) para un nuevo tipo de boquilla de cohete tendrá una resistencia a la temperatura de 2000 °C y un aumento del 15 % en la estabilidad del empuje, lo que cumplirá con el futuro estándar ASTM.**

#### 10.5.2 Mejora de la protección del medio ambiente y la sostenibilidad

#### Antecedentes y tendencias

Las regulaciones ambientales globales (p. ej., REACH, RoHS) imponen restricciones cada vez más estrictas sobre los elementos tóxicos (p. ej., Ni, Pb) en los materiales, y las normas de las aleaciones de tungsteno deben responder a esta tendencia. En el futuro, reduciremos el contenido de Ni, desarrollaremos fases aglutinantes no tóxicas y promoveremos el reciclaje del polvo de tungsteno y la fabricación ecológica.

#### Detalles específicos

- **Tendencia internacional** : Las normas ASTM B777 y EN 10204 limitan la liberación de níquel a  $<0,05\%$  y promueven formulaciones de W-Fe-Cu. El programa ISO añade un requisito de tasa de reciclaje ( $>50\%$ ).
- **Tendencia interna** : GB/T 26038 planea introducir cláusulas de protección ambiental, reducir el contenido de Ni a  $<5\%$  y la tasa de reciclaje de residuos  $> 60\%$ .
- **Base técnica** : aleación baja en níquel (W-95Fe-Cu,  $18,5 \text{ g/cm}^3$ , 900 MPa), tecnología de recuperación de polvo (reducción de costes del 20%).

**El caso predice que el W-95Fe-Cu (Ni<1%) para blindaje médico cumple con RoHS, blindando el 95% de los rayos X, reduciendo los costos de producción en un 15% y cumpliendo con los futuros estándares GB/T.**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 10.5.3 La intelectualización de los procesos de fabricación y la integración de nuevas tecnologías

**Antecedentes y tendencias:** La fabricación aditiva (impresión 3D), la monitorización inteligente y la producción automatizada están transformando la forma en que se fabrican las aleaciones de tungsteno, y los estándares tradicionales, como la pulvimetallurgia, son difíciles de cumplir. Los estándares futuros incorporarán SLM ( fusión selectiva por láser), HIP (prensado isostático en caliente) y requisitos de inspección en línea para mejorar la precisión y la eficiencia.

#### Detalles específicos

- **Tendencia internacional :** La norma ASTM B777 prevé añadir una nueva especificación SLM en 2025, con una porosidad  $< 0,5 \%$  y una tolerancia de  $\pm 0,02 \text{ mm}$ . La norma ISO 21358 introducirá parámetros de sinterización inteligentes (diferencia de temperatura  $< 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ).
- **Tendencia nacional :** JB/T 12809 planea estandarizar la aleación de tungsteno de impresión 3D con una desviación de densidad de  $<\pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ .
- **Base técnica :** Equipo SLM (potencia láser 4000 W), inspección por rayos X en línea (defecto  $< 0,3 \text{ mm}$ ).

El caso predice que un contrapeso de aviación imprimirá W-90Ni-Fe ( $18,0 \text{ g/cm}^3$ ) con SLM, lo que reducirá el peso en un 10% y acortará el ciclo de desarrollo en un 50%, lo que está en línea con los futuros estándares ASTM.

### 10.5.4 Alta precisión y estandarización de los métodos de prueba

#### Precisión y consistencia del fondo y la tendencia

de prueba son clave para el cumplimiento de las normas. En el futuro, se adoptarán equipos de mayor precisión (como microscopios a nanoscalas) y especificaciones unificadas de ensayos no destructivos para reducir las diferencias entre las pruebas nacionales y extranjeras y mejorar la credibilidad de los datos.

#### Detalles específicos

- **Tendencias internacionales :** prueba de dureza mejorada ISO 4498 (error  $<\pm 2 \text{ HV}$ ), JIS Z 3112 para mejorar la sensibilidad ultrasónica ( $0,2 \text{ mm}$ ).
- **Tendencia nacional :** GB/T 228.1 planea introducir máquinas de estiramiento de alta precisión (error  $<\pm 5 \text{ MPa}$ ) y agregar pruebas no destructivas (consulte ISO 16823).
- **Base técnica :** SEM de alta resolución (resolución de grano  $< 10 \text{ nm}$ ), detector de defectos por ultrasonidos (precisión  $\pm 0,1 \text{ mm}$ ).

El caso predice que se utiliza W-97Ni-Fe ( $18,8 \text{ g/cm}^3$ ) en un núcleo de bala militar, y el defecto es  $< 0,2 \text{ mm}$  y la desviación de resistencia es  $< 5 \text{ MPa}$ , lo que cumple con el futuro estándar GJB.

### 10.5.5 Equilibrio entre internacionalización y localización

**Antecedentes y tendencias:** La industria china de aleaciones de tungsteno necesita mejorar su

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

competitividad internacional, y se acelerará la integración de las normas nacionales con las internacionales, manteniendo las ventajas de localización (como el control de costos). Las futuras normas se basarán en las metodologías ASTM e ISO, optimizando al mismo tiempo su aplicabilidad.

#### Detalles específicos

- Tendencias internacionales** : ASTM e ISO promueven protocolos de pruebas armonizados a nivel mundial (por ejemplo, ISO 17025).
- Tendencia nacional** : está previsto que GB/T 26038 se alinee con ASTM B777 en 2025, con un rango de densidad de 19,0 g/cm<sup>3</sup> y una tolerancia ajustada de ±0,05 mm.
- Base técnica** : cooperación internacional en investigación y desarrollo, laboratorio nacional actualizado a la certificación ISO 17025.

El caso predice que la nueva versión de GB/T 26038 (18,5 g/cm<sup>3</sup>, tolerancia ± 0,05 mm) para un contrapeso de exportación cumple con los requisitos de Boeing y el volumen de exportación aumentará en un 20%.

#### 10.5.6 Resumen de la tabla de tendencias de desarrollo

Dirección de la tendencia	Tendencias de las normas internacionales	Tendencias de las normas nacionales	Conceptos básicos técnicos
<b>Rendimiento refinado</b>	Clase 5 (W ≥ 98 %), resistencia a la temperatura 2000 °C	La resistencia a la tracción ≥ 800 MPa y la resistencia a la temperatura es de 1500 °C.	Aleación de alta entropía, reforzada con nanocristales
<b>Ambientalmente sostenible</b>	Ni<0,05%, Tasa de recuperación >50%	Ni<5%, Tasa de recuperación >60%	Tecnología de recuperación de polvo con formulación baja en níquel
<b>Fabricación inteligente</b>	Especificación SLM, porosidad <0,5%	Impresión 3D, desviación de densidad <±0,05 g/cm <sup>3</sup>	Equipo SLM, detección en línea
<b>Alta precisión de la prueba</b>	El error de dureza es <± 2 HV y el ultrasonido 0,2 mm.	El error de tracción es <± 5 MPa y se añaden pruebas no destructivas.	SEM, detección ultrasónica de defectos
<b>Integración internacional</b>	Protocolo armonizado ISO 17025	Alineado con ASTM con una tolerancia de ± 0,05 mm	Cooperación internacional, certificación de laboratorios

#### 10.5.7 Predicción de casos de aplicación

- Aviación** : Boquilla W-98Ni-Fe (resistente a temperaturas de hasta 2000°C), conforme al nuevo estándar ASTM, 15% más eficiente.
- Médico** : blindaje W-95Fe-Cu (Ni<1%), de acuerdo con el nuevo estándar GB/T, el coste se reduce en un 15%.
- Militar** : núcleo de bala de aleación de tungsteno SLM (porosidad <0,5 %), de acuerdo con el nuevo estándar JB/T, la profundidad de penetración aumentó en un 20 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 10.5.8 Desafíos técnicos y soluciones

- **Desafío :**
  1. **Costos de la tecnología :** la SLM y la nanotecnología son costosas (un millón de dólares para el equipo).
  2. **Consistencia de la prueba :** desviación de datos ( $\pm 10$  MPa) debido a diferencias de equipos en el país y en el extranjero.
  3. **Actualización estándar :** las normas nacionales están entre 5 y 10 años por detrás de las internacionales.
- **Solución :**
  - Reducción de costos: equipos SLM domésticos (<\$500.000), promoción de tecnología de reciclaje.
  - Prueba uniforme: se introduce la certificación ISO 17025 y el error del equipo es  $<\pm 5$  MPa.
  - Actualización acelerada: Revisar GB/T 26038 para 2025 para sincronizar con ASTM.

#### 10.6 Chinatungsten - Fabricación inteligente de aleación de tungsteno de alta gravedad específica (MSDS)

**Nombre del producto :** Aleación de tungsteno de alta densidad

**Proveedor :** CTIA GROUP LTD

**Fecha de lanzamiento :** abril de 2025

##### Parte I: Productos químicos y etiquetado empresarial

- **Nombre del producto :** aleación de tungsteno de alta gravedad específica
- **Categoría química :** aleación de metal
- **Ingredientes principales :**
  - Peso neto (ancho): 85-98 %
  - Níquel (Ni): 1-10%
  - Hierro (Fe): 0-5%
  - Cobre (Cu): 0-5%
  - Cobalto (Co): 0-5%
- **Usos :** Aeroespacial, industria de defensa, equipos médicos, exploración petrolera, industria electrónica, etc.

##### Parte II: Descripción general de los peligros

- **Principales riesgos para la salud :**
  - No es tóxico en forma sólida, pero puede generarse polvo o humos durante su procesamiento y la inhalación a largo plazo puede causar efectos respiratorios.
  - Las aleaciones que contienen níquel o cobalto pueden tener efectos sensibilizantes en la piel y el tracto respiratorio.

##### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

- **Peligros ambientales :**
  - No existe ningún peligro ambiental evidente, pero se debe controlar la descarga de polvo para evitar contaminar los cuerpos de agua y el suelo.
- **Peligros fisicoquímicos :**
  - No inflamable, pero pueden formarse vapores de óxido a altas temperaturas.

### Parte III: Composición/Información sobre la composición

Componente	Ensayo (%)	Número CAS
Tungsteno (W)	85-98	7440-33-7
Níquel (Ni)	1-10	7440-02-0
Hierro (Fe)	0-5	7439-89-6
Cobre (Cu)	0-5	7440-50-8
Cobalto (Co)	0-5	7440-48-4

### Parte IV: Medidas de primeros auxilios

- **Inhalación :** Si se inhala polvo, salga inmediatamente a un lugar con aire fresco y busque atención médica si no se encuentra bien.
- **Contacto con la piel :** Enjuague bien con agua y jabón y busque atención médica si se produce irritación o reacción alérgica.
- **Contacto con los ojos :** Enjuagar con abundante agua durante al menos 15 minutos y buscar atención médica.
- **Ingestión :** Generalmente no es tóxico, pero la ingestión en grandes cantidades debe provocar atención médica inmediata.

### Parte V: Medidas de protección contra incendios

- **Medio de extinción de incendios :** agua, espuma, polvo seco o extintor de dióxido de carbono.
- **Medidas de protección especiales :** Los bomberos deben usar máscaras de gas y ropa protectora.

### Parte 6: Manejo de emergencias en caso de derrames

- **Protección personal :** Use una máscara contra el polvo, gafas protectoras y guantes para evitar la inhalación de polvo.
- **Medidas de protección del medio ambiente :** Evitar la entrada en cuerpos de agua y suelo, utilizar aspiradora o limpieza húmeda.

### Parte VII: Manipulación, manejo y almacenamiento

- **Precauciones de funcionamiento :**
  - Evite la inhalación de polvo y tenga una buena ventilación en el lugar de trabajo.
  - Utilice equipo de protección adecuado.
- **Condiciones de almacenamiento :**
  - Conservar en un ambiente seco y ventilado, alejado de altas temperaturas y humedad.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Parte VIII: Control de exposición/Protección personal

- **Límites de exposición ocupacional (OEL) :**
  - Polvo de tungsteno: 5 mg/m<sup>3</sup> (TLV-TWA)
  - Níquel: 1 mg/m<sup>3</sup> (TLV-TWA)
  - Cobalto: 0,02 mg/m<sup>3</sup> (TLV-TWA)
- **Protección personal :**
  - **Protección respiratoria** : Use una máscara contra el polvo o un respirador.
  - **Protección de las manos** : Usar guantes protectores.
  - **Protección de los ojos** : Usar gafas de seguridad.
  - **Protección de la piel** : Usar ropa protectora.

## Parte IX: Propiedades fisicoquímicas

- **Aspecto** : Sólido gris plateado
- **Punto de fusión** : aproximadamente 3000°C (dependiendo de la composición).
- **Densidad** : 16-19 g/cm<sup>3</sup>
- **Solubilidad** : insoluble en agua.

## Parte X: Estabilidad y reactividad

- **Estabilidad química** : estable
- **Sustancias a evitar** : oxidantes fuertes, ácidos fuertes
- **Productos de descomposición** : Las altas temperaturas pueden producir humos de óxido metálico.

## Parte XI: Información toxicológica

- **Toxicidad aguda** : No se conoce toxicidad aguda.
- **Irritación de la piel** : Las aleaciones que contienen níquel o cobalto pueden provocar reacciones alérgicas.
- **Efectos a largo plazo** : La inhalación prolongada de polvo puede afectar el sistema respiratorio.

## Parte XII: Información ecológica

- **Impacto ambiental** : la aleación de tungsteno es estable y no se degrada fácilmente.
- **Bioacumulación** : Baja

## Parte XIII: Eliminación

- **Método de eliminación :**
  - Cumplir con las regulaciones locales para el reciclaje o eliminación como chatarra metálica.
  - Evitar vertidos al agua o al suelo.

## Parte XIV: Información de envío

- **Número ONU** : Sin categoría de peligro especial

### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

- **Clasificación del transporte** : transporte de carga general

#### Parte XV: Información reglamentaria

- **Regulaciones aplicables** : Cumplir con las normas de seguridad pertinentes en China, la Unión Europea y Estados Unidos.

#### SECCIÓN XVI: INFORMACIÓN ADICIONAL

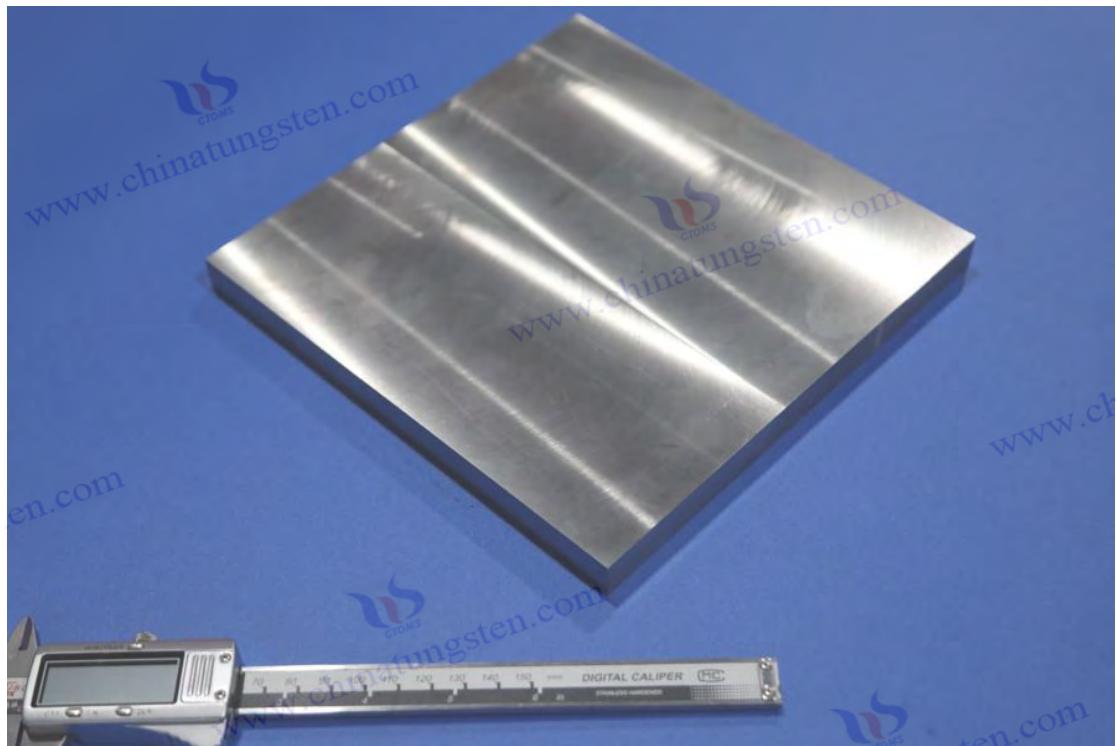
- Este material se ha elaborado de acuerdo con las últimas normas de seguridad y tiene fines meramente informativos. Su uso debe cumplir con las normativas locales y las directrices de seguridad corporativas.

1

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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



## Capítulo 11: Consideraciones ambientales y económicas para aleaciones de tungsteno de alta gravedad específica

La amplia aplicación de las aleaciones de tungsteno en los sectores aeroespacial, militar, médico e industrial ha generado importantes beneficios económicos, pero no se pueden ignorar el impacto ambiental y los costos asociados a su producción y uso. Este capítulo analizará la huella ambiental, el potencial de reciclaje y la rentabilidad de las aleaciones de tungsteno con alta gravedad específica, y proporcionará una referencia para el desarrollo sostenible y la optimización industrial.

### 11.1 Impacto ambiental durante la producción de aleaciones de tungsteno con alta gravedad específica

La producción de aleaciones de tungsteno con alta gravedad específica implica múltiples etapas, desde la extracción del mineral de tungsteno hasta el procesamiento pulvimetálgico. Cada una de ellas puede tener un impacto ambiental, incluyendo el consumo de recursos, el uso de energía, las emisiones de escape y la eliminación de residuos. A medida que aumenta la atención mundial a la sostenibilidad, la evaluación y la reducción de estos impactos ambientales se han convertido en un tema importante para la industria.

#### 11.1.1 Impactos ambientales de la minería de tungsteno

**La minería de tungsteno** es el punto de partida para la producción de aleaciones de tungsteno con alta gravedad específica, principalmente mediante minería a cielo abierto o subterránea. Las reservas mundiales de tungsteno rondan los 3,3 millones de toneladas (datos de 2023), y China representa el 60 %

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

(aproximadamente 1,9 millones de toneladas). El proceso minero implica la destrucción del suelo, la contaminación del agua y el consumo de energía.

### Impactos específicos

- **Destrucción del suelo** : La minería a cielo abierto extrae de 10 a 15 toneladas de material de recubrimiento por tonelada de mineral de tungsteno, lo que destruye la vegetación y el suelo. Por ejemplo, una zona de extracción de tungsteno en Hunan, China, produce 5000 toneladas de concentrado de tungsteno al año, cubriendo una superficie de aproximadamente 50 hectáreas, y la tasa de cobertura vegetal se reduce al 10 %.
- **Contaminación del agua** : El proceso de beneficio utiliza agentes de flotación (como xantato y aceite de pino), lo que produce de 0,5 a 1 metros cúbicos de aguas residuales por tonelada de mineral, que contienen metales pesados (como As y Pb) y residuos químicos, y el pH desciende a 4-5. Los vertidos sin tratar pueden provocar que la DQO del río supere el estándar hasta 50 veces.
- **Consumo de energía** : La extracción de concentrado de tungsteno consume alrededor de 300-400 kWh de electricidad y emisiones de CO<sub>2</sub> de aproximadamente 0,2 toneladas por tonelada de concentrado de tungsteno (principalmente energía a base de carbón en China).

**Estudio de caso** Una mina de tungsteno en Jiangxi, China, extrajo 10.000 toneladas de concentrado de tungsteno en 2023, destruyó 70 hectáreas de vegetación, descargó 8.000 metros cúbicos de aguas residuales y superó el contenido de As de los ríos circundantes a 0,05 mg/L (estándar nacional 0,01 mg/L).

### 11.1.2 Impactos ambientales del procesamiento pulvimetálgico

#### Fondo

**de alta gravedad específica** se produce principalmente mediante un proceso de pulvimetallurgia, que incluye la preparación, mezcla, prensado y sinterización del polvo de tungsteno. El proceso requiere altas temperaturas y presiones, lo que implica un alto consumo de energía y emisiones de escape.

### Impactos específicos

- **Consumo de energía** : la reducción de polvo de tungsteno (atmósfera de H<sub>2</sub>, 900-1100 °C) consume alrededor de 2000 kWh por tonelada, la sinterización (1400-1500 °C) consume alrededor de 1500 kWh por tonelada y las emisiones totales de CO<sub>2</sub> son de aproximadamente 2 a 3 toneladas/tonelada de aleación.
- **Emisiones de escape** : Durante el proceso de reducción se emiten H<sub>2</sub>O y trazas de CO (si se reduce el carbono), y durante la sinterización se emiten CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> (aproximadamente 0,1 toneladas de NO<sub>x</sub> por tonelada de aleación). La volatilización de Ni y Fe produce una pequeña cantidad de vapor metálico, y las emisiones sin tratar afectan la calidad del aire.
- **Residuos sólidos** : El prensado y la sinterización producen residuos (como polvo de óxido de tungsteno, escoria), alrededor de 50-100 kg por tonelada de aleación, que contienen entre un 20% y un 30% W, que si no se reciclan, acumularán suelo contaminado.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Estudio de caso

Una fábrica produce anualmente 1.000 toneladas de aleación W-95Ni-Fe, consume 3,5 millones de kWh, emite alrededor de 2.500 toneladas de CO<sub>2</sub> y tiene una concentración de NO<sub>x</sub> de 100 mg/m<sup>3</sup> en los gases de escape (el doble de lo estándar) y los residuos se acumulan en una superficie de 2 hectáreas.

### 11.1.3 Impacto ambiental del posprocesamiento y procesamiento

#### Fondo

El posprocesamiento incluye el mecanizado (por ejemplo, CNC) y el tratamiento de superficies (por ejemplo, pulido, recubrimiento) que involucran fluidos de corte, desechos y emisiones químicas.

#### Impactos específicos

- Líquido residual**: el fluido de corte (a base de aceite o agua) produce entre 10 y 20 L de líquido residual por tonelada de aleación, que contiene grasa y metales pesados (Ni, Fe), la DQO es de aproximadamente 5000 mg/L y la descarga sin tratar contamina el cuerpo de agua.
- Chatarra**: El mecanizado CNC produce entre 20 y 50 kg de virutas de tungsteno por tonelada de aleación, que contienen más del 90% de W, lo que desperdicia recursos y ocupa tierra si no se recicla.
- Gases de escape**: el pulido y el recubrimiento (por ejemplo, PVD) emiten compuestos orgánicos volátiles (COV) a una tasa de aproximadamente 0,5 a 1 kg por tonelada de aleación y, sin tratamiento, afectan la calidad del aire (PM2,5 aumenta en 10 µg /m<sup>3</sup>).

**Estudio de caso:** Una fábrica de piezas de aviación procesa 500 toneladas de contrapeso W-90Ni-Fe, produce 8000 L de líquido residual por año (la DQO excede el estándar en 10 veces), 15 toneladas de virutas de desecho no se reciclan, las emisiones de COV son de aproximadamente 300 kg y la calidad del aire circundante disminuye en un 5%.

### 11.1.4 Evaluación cuantitativa de los impactos ambientales

#### Datos cuantitativos

- Huella de carbono**: emisiones de CO<sub>2</sub> de aproximadamente 3 a 4 toneladas por tonelada de producción de aleación de tungsteno de alta gravedad específica (0,2 toneladas extraídas, 3 a 3,8 toneladas procesadas), lo que representa el 80% del nivel promedio de productos de tungsteno.
- Huella hídrica**: alrededor de 2-3 metros cúbicos de agua por tonelada de aleación (1-2 m<sup>3</sup> para beneficio, 0,5-1 m<sup>3</sup> para postratamiento) y la descarga de aguas residuales representa el 50%-70%.
- Ocupación del terreno**: Aproximadamente 0,01-0,02 hectáreas por tonelada de extracción de aleaciones y acumulación de chatarra.

**En comparación con el acero (emisión de CO<sub>2</sub> de 1,5 a 2 toneladas/tonelada)**, la aleación de tungsteno tiene una mayor carga ambiental, pero su alto rendimiento compensa parcialmente el impacto al reducir

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

el uso posterior (por ejemplo, el volumen del contrapeso se reduce en un 50%).

### 11.1.5 Estudios de casos de impactos ambientales

#### Casos específicos

- **Área de extracción de tungsteno de Hunan en China** : producción anual de 20.000 toneladas de concentrado de tungsteno, 4.000 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>, 15.000 metros cúbicos de aguas residuales, 200 hectáreas de daños a la tierra y alrededor de 50 millones de yuanes de costos de restauración ecológica circundante.
- **de Kennametal en Estados Unidos** : producción anual de 1.000 toneladas de aleación de tungsteno, tasa de tratamiento de gases de escape del 95%, emisión de CO<sub>2</sub> de 2.000 toneladas, tasa de recuperación de virutas de desecho del 80%, control del impacto ambiental dentro de los estándares locales.

### 11.1.6 Desafíos técnicos y soluciones

#### Desafío

- **Alto consumo de energía** : la sinterización y el procesamiento consumen entre el 30% y el 40% de los costos de producción y las emisiones de carbono son difíciles de reducir.
- **Tratamiento de residuos** : La tasa de reciclaje de aguas residuales y desechos es baja (doméstica < 50%) y el costo del tratamiento es alto (alrededor de 100 yuanes por tonelada de aguas residuales).
- **Presión regulatoria** : La Ley de Protección Ambiental de China (edición 2023) exige una reducción del 30% en las emisiones de CO<sub>2</sub> y cero descargas de aguas residuales.

#### Solución

- **Tecnología de ahorro energético** : El uso de sinterización a baja temperatura (1200°C) y energía renovable (generación de energía fotovoltaica) reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> entre un 20% y un 30%.
- **Reciclaje de residuos** : recuperación hidrometalúrgica de virutas de desecho (tasa de recuperación de W >90%), tratamiento de aguas residuales recuperadas (costo reducido a 50 yuanes/tonelada).
- **Control de la contaminación** : Con la instalación de equipos de eliminación de polvo con bolsas y desnitrificación, las emisiones de NO<sub>x</sub> se redujeron a 50 mg/m<sup>3</sup> y la tasa de tratamiento de COV fue del 98%.

### 11.1.7 Resumen de las Tablas de Impacto Ambiental

Enlaces de Impactos principales producción	Métricas cuantitativas	solución
Minería de tungsteno	Destrucción de tierras, contaminación del agua,	CO <sub>2</sub> 0,2 t/t, aguas residuales 0,5-1 m <sup>3</sup> /t

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	consumo de energía		sedimentación de aguas residuales
<b>Metalurgia de polvos</b>	Consumo de energía, emisiones de escape, residuos sólidos	CO <sub>2</sub> 2-3 toneladas/tonelada, NO <sub>x</sub> 0,1 toneladas/tonelada	Sinterización a baja temperatura, eliminación de polvo y desnitrificación
<b>Posprocesamiento</b>	Descarga de residuos líquidos, escombros y COV	Aguas residuales 10-20 L/ 吨, COV 0,5-1 kg/TON	Reutilización de agua recuperada, recuperación de virutas de desecho, tratamiento de COV
<b>Huella total</b>	Carbono, agua, ocupación del suelo	CO <sub>2</sub> 3-4 t/t, agua 2-3 m <sup>3</sup> /t	Energía renovable, optimización de todo el proceso

## 11.2 Recuperación y reutilización de aleación de tungsteno con alta gravedad específica

Debido a su alto valor y al alto consumo de recursos, la aleación de tungsteno con alta gravedad específica se ha convertido en un medio importante para reducir el impacto ambiental y ahorrar costos. Al ser un metal raro, el tungsteno tiene reservas limitadas en el mundo (aproximadamente 3,3 millones de toneladas), y el reciclaje no solo reduce la presión minera, sino que también mejora la sostenibilidad de la industria. Esta sección analizará las fuentes de reciclaje, los enfoques técnicos, los efectos de la reutilización y el potencial futuro.

### 11.2.1 Fuentes y estado del reciclaje

**Antecedentes** : El reciclaje de aleaciones de tungsteno con alta gravedad específica proviene principalmente de chatarra de producción y productos al final de su vida útil. La chatarra, los residuos de postratamiento del proceso de producción, así como los contrapesos, núcleos y blindajes al final de su vida útil, son potenciales recicladores. La tasa global de reciclaje se sitúa actualmente entre el 30 % y el 40 %, y existe una brecha significativa entre China, Europa y Estados Unidos.

#### Fuentes específicas

- Residuos de producción** : polvo residual de la pulvimetallurgia (contenido de W 20%-30%), residuos prensados (50-100 kg/tonelada de aleación), residuos de mecanizado CNC (20-50 kg/tonelada de aleación, W >90%).
- Productos desechados** : contrapeso de aviación (vida útil de 10 a 20 años), núcleo de bala militar (uso único), blindaje médico (ciclo de actualización de 5 a 10 años).
- Estado del reciclaje** : En 2023, se reciclarán alrededor de 20.000 toneladas de tungsteno a nivel mundial (el 20 % de la demanda total) y alrededor de 2.000 toneladas de aleación de tungsteno (el 27 % de la producción). La tasa de reciclaje se sitúa en torno al 35 % en China y entre el 50 % y el 60 % en Estados Unidos y Europa.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Estudio de caso

Una fábrica china tiene una producción anual de 1.000 toneladas de aleación W-95Ni-Fe, 40 toneladas de virutas de desecho (W 90%), 80 toneladas de residuos (W 25%), la tasa de reciclaje es solo del 30% y la acumulación restante cubre un área de 1 hectárea.

### 11.2.2 Tecnologías y procesos de reciclaje

#### Fondo

**de alta gravedad específica** incluye separación física, extracción química y reducción metalúrgica, con el objetivo de separar el tungsteno (W) de las fases aglutinantes (como Ni, Fe, Cu) y preparar bloques de aleación o polvo de tungsteno reutilizables.

#### Tecnologías específicas

- **Separación física :**
  - **Método :** trituración, molienda, cribado, utilizado para chatarra y desechos.
  - **Resultados :** recuperación de W del 70%-80%, tamaño de partícula de 1-10  $\mu\text{m}$  y pureza  $\geq 95\%$ .
  - **Consumo de energía :** 200-300 kWh por tonelada de residuo y 0,1-0,15 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- **Hidrometalurgia (extracción química):**
  - **Método :** La lixiviación ácida (HCl o HNO<sub>3</sub>) disuelve Ni y Fe, precipita WO<sub>3</sub> y luego se reduce a polvo de tungsteno con H<sub>2</sub>.
  - **Resultados :** recuperación de 90%-95% W y  $\geq 99,5\%$  de pureza, pero residuos ácidos (pH 2-3, aprox. 0,5 m<sup>3</sup> por tonelada).
  - **Consumo de energía :** 500-700 kWh por tonelada y 0,3-0,4 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- **Pirometalurgia (tratamiento de alta temperatura):**
  - **Método :** Fusión a alta temperatura ( $>2000$  °C) para separar W y Ni-Fe, o tostado oxidativo (800-1000 °C) para producir WO<sub>3</sub>.
  - **Efecto :** Tasa de recuperación de W del 85%-90%, adecuada para residuos complejos, gases de escape que contienen SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> (0,05-0,1 toneladas/tonelada).
  - **Consumo de energía :** 1000-1500 kWh por tonelada, emisiones de CO<sub>2</sub> 0,8-1 tonelada.

El costo de la separación técnica es bajo en comparación con la separación física (alrededor de 500 dólares estadounidenses/tonelada), lo que es adecuado para virutas de desechos de alta pureza; Alta tasa de recuperación húmeda, adecuada para desechos mixtos; El método de fuego es altamente adaptable, pero tiene un alto consumo de energía y emisiones.

### 11.2.3 Efectos y aplicaciones de la reutilización

#### Fondo

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

El polvo o aleación de tungsteno reciclado se puede utilizar directamente para producir una nueva aleación de tungsteno con un rendimiento cercano al del material virgen, reduciendo al mismo tiempo el consumo de recursos y los costos.

#### Efectos específicos

- **Rendimiento** : W-90Ni-Fe fabricado con polvo de tungsteno reciclado (pureza 99,5%), densidad 18,0 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 850 MPa (virgen 900 MPa), pérdida de rendimiento <10%.
- **Ahorro de recursos** : reducción de la extracción de mineral de tungsteno en aproximadamente 1,2 toneladas por tonelada de tungsteno reciclado, ahorro de 2 a 3 m<sup>3</sup> de agua y reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en 2 a 3 toneladas.
- **Rentable** : el costo de reciclaje es de aproximadamente 15.000 a 20.000 dólares estadounidenses/tonelada, y el polvo de tungsteno primario es de 3 a 35.000 dólares estadounidenses/tonelada, lo que supone un ahorro del 40% al 50%.

#### Campos de aplicación

- **Contrapeso de aviación** : W-95Ni-Fe (18,5 g/cm<sup>3</sup>) se recupera para componentes secundarios con una reducción de costes del 20%.
- **Herramientas industriales** : W-90Ni-Cu reciclado (17,5 g/cm<sup>3</sup>) con 95% de resistencia nativa a la abrasión.
- **médico** : se recupera el colimador de polvo de tungsteno y la eficiencia de blindaje solo se reduce en un 5%.

#### 11.2.4 Estudios de casos de reciclaje y reutilización

##### Casos específicos

- **Kennametal** , EE. UU.: anualmente se reciclan 500 toneladas de chatarra de aleación de tungsteno, el polvo de tungsteno se extrae mediante hidrometalurgia (la tasa de recuperación es del 92 %) y el contrapeso W-95Ni-Fe se recicla, lo que ahorra 10 millones de dólares estadounidenses en costos anuales y reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> en 1200 toneladas.
- **Industria de tungsteno de China Xiamen** : se reciclan anualmente 300 toneladas de virutas de desecho (W 90%), separación física + tratamiento contra incendios, la tasa de recuperación es del 85% y se fabrican varillas W-90Ni-Fe, el costo se reduce en un 30%, pero el tratamiento de gases residuales necesita ser mejorado.

#### 11.2.5 Desafíos técnicos y soluciones

##### Desafío

- **Baja tasa de recuperación** : la tasa de reciclaje de residuos domésticos es < 50% y es difícil separar los residuos complejos (como los que contienen Cu).
- **Impacto ambiental** : Alto costo de la eliminación de residuos húmedos y piroméricos (alrededor de \$200-300 por tonelada ).

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Económico** : Las pequeñas empresas tienen una gran inversión en equipos de reciclaje (> \$500,000) y un largo período de recuperación (3-5 años).

## Solución

- **Mejora técnica** : El desarrollo de un proceso combinado (físico + húmedo) ha aumentado la tasa de recuperación al 95% y la eficiencia de separación de Cu al 20%.
- **Control de la contaminación** : ciclo de neutralización de líquidos residuales (pH hasta 7, costo reducido a \$100/tonelada), desulfuración y desnitrificación de gases de escape (emisiones hasta 50 mg/m<sup>3</sup>).
- **Apoyo político** : El gobierno subsidia los equipos de reciclaje (20%-30%), y las exenciones e incentivos fiscales aumentan la participación corporativa.

## 11.2.6 Potencial futuro de reciclaje y reutilización

### Tendencia

- **El objetivo** es alcanzar el 60% de la tasa de reciclaje en el mundo en 2030, y el 50%-60% en China, con una capacidad de reciclaje adicional de unas 3.000 toneladas al año.
- **Actualización tecnológica** : recuperación electroquímica (consumo de energía reducido en un 30%), clasificación inteligente (eficiencia aumentada en un 20%).
- **Valor de mercado** : Se espera que el mercado de aleaciones de tungsteno recuperado alcance los 500 millones de dólares para 2030, creciendo a una tasa anual del 8%.

El caso predice que una planta de aviación reciclará 1.000 toneladas de residuos W-95Ni-Fe en 2030 y fabricará nuevos contrapesos, ahorrando 20 millones de dólares en costos y reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> en 3.000 toneladas, en línea con las futuras regulaciones ambientales.

### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

### 11.2.7 Resumen del Formulario de Reciclaje y Reutilización

proyecto	contenido
<b>Fuentes de reciclaje</b>	Residuos de producción (50-100 kg/tonelada), productos al final de su vida útil
<b>Tecnología de reciclaje</b>	Separación física (70%-80%), húmeda (90%-95%), pirotécnica (85%-90%)
<b>Efecto de reutilización</b>	La densidad es de 18,0 g/cm <sup>3</sup> , la resistencia es de 850 MPa y el coste se reduce entre un 40% y un 50%.
<b>Beneficios ambientales</b>	Reducción de CO <sub>2</sub> de 2-3 t/tonelada, ahorro de agua de 2-3 m <sup>3</sup> /tonelada
<b>desafío</b>	Baja tasa de recuperación, líquidos residuales y gases de escape, económico.
<b>solución</b>	Tecnología conjunta, control de la contaminación y subsidios políticos
<b>Potencial futuro</b>	La tasa de recuperación es del 60%, el mercado es de 500 millones de dólares estadounidenses y la tecnología es inteligente.

### 11.3 Análisis de costos de aleación de tungsteno con alta gravedad específica

Debido a su alta densidad y alto rendimiento, la aleación de tungsteno es irremplazable en los sectores aeroespacial, militar, médico e industrial. Sin embargo, sus costos de producción y aplicación son elevados, ya que involucran materias primas, procesamiento, reciclaje y protección ambiental. El análisis de costos no solo se centra en la rentabilidad de una empresa, sino también en la competitividad del mercado y el desarrollo sostenible. Esta sección ofrece un análisis detallado de la estructura de costos, evalúa los factores influyentes y propone una estrategia de optimización.

#### 11.3.1 Composición de costos y vínculos principales

##### Fondo

El costo de las aleaciones de tungsteno con alta gravedad específica abarca toda la cadena industrial, desde la adquisición de la materia prima hasta la entrega del producto final, incluyendo la minería, el procesamiento intermedio y la aplicación final. En 2023, la fluctuación de los precios mundiales del tungsteno (aproximadamente entre 3 000 y 35 000 USD/tonelada) y el aumento de los precios de la energía afectarán significativamente los costos.

##### Composición específica

- Costo de la materia prima (50%-60%)** : polvo de tungsteno (W≥99,9%), níquel (Ni), hierro (Fe), cobre (Cu), etc., que representan más de la mitad del costo total.
- Costes de elaboración (20%-30%)** : pulvimetallurgia (prensado, sinterización), postratamiento (mecanizado CNC, tratamiento de superficies).
- Costes energéticos (10%-15%)** : electricidad, gas, para sinterización y procesamiento a alta temperatura.
- Costo de protección ambiental (5%-10%)** : inversión en gases residuales, tratamiento de aguas residuales y equipos de protección ambiental.

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Mano de obra y otros (5%-10%)** : Depreciación de mano de obra, transporte, equipo.

**El costo total por tonelada de aleación W-95Ni-Fe (18,0 g/cm<sup>3</sup>) es de aproximadamente US\$25.000-30.000, incluyendo:**

- Polvo de tungsteno (95%): entre 18.000 y 20.000 dólares (32.000 dólares/tonelada × 0,95).
- Ni, Fe (5%): 0,1-01.500 dólares estadounidenses (Ni 20.000 dólares estadounidenses/tonelada, Fe 01.000 dólares estadounidenses/tonelada).
- Procesamiento y energía: \$0,5-\$7.000.
- Protección del medio ambiente y mano de obra: 0,2-0,3 mil dólares estadounidenses.

### 11.3.2 Factores que influyen en el coste de las materias primas

#### Fondo

Como metal raro, el precio del tungsteno se ve afectado por la oferta y la demanda, las políticas y factores geográficos. China representa el 80 % de la producción mundial de tungsteno (82 000 toneladas en 2023), y las restricciones a las cuotas de exportación han impulsado los precios al alza.

#### Factores específicos

- **Precio de mercado** : En 2023, el concentrado de tungsteno (WO<sub>3</sub>≥65%) costará entre 25 000 y 30 000 dólares estadounidenses/tonelada, y el polvo de tungsteno entre 3 000 y 35 000 dólares estadounidenses/tonelada, con una fluctuación anual de ±15 %.
- **Restricciones de suministro** : la cuota de China en 2023 es de 70.000 toneladas y la exportación real es de 50.000 toneladas, con una escasez del 10% en el mercado internacional.
- **Materiales alternativos** : Los precios del Ni y el Fe son bajos (Ni 20.000 dólares estadounidenses/tonelada, Fe 1.000 dólares estadounidenses/tonelada), pero la proporción es pequeña y el impacto es limitado.

#### Estudio de caso

Una fábrica compró 1.000 toneladas de polvo de tungsteno (US\$33.000/tonelada) en 2023, y el precio aumentó en US\$3,3 millones debido a un incremento del 10% en el precio debido a una reducción de la cuota.

### 11.3.3 Factores que influyen en los costos de procesamiento y energía

#### Fondo

**La pulvimetallurgia y el posprocesamiento son el núcleo de la producción de aleaciones de tungsteno de alta gravedad específica, que requieren equipos de alta temperatura y alta presión, y la eficiencia energética y del proceso afectan directamente el costo.**

#### Factores específicos

- **Precios de la energía** : el precio de la electricidad industrial en China es de aproximadamente US\$ 0,1/kWh, el de Estados Unidos es de US\$ 0,15/kWh, y el consumo de electricidad es de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3500 kWh por tonelada de aleación, y el costo de la electricidad es de US\$ 350-525.

- **Eficiencia del proceso** : La sinterización tradicional (1500°C) tarda 6 horas y la nueva sinterización a baja temperatura (1200°C) se reduce a 4 horas, ahorrando un 20% del consumo energético.
- **Depreciación del equipo** : depreciación anual de 50.000 dólares estadounidenses para el horno de sinterización (500.000 dólares estadounidenses/juego, vida útil de 10 años) y depreciación anual de 20.000 dólares estadounidenses para las máquinas herramienta CNC (200.000 dólares estadounidenses/juego).

**Estudio de caso:** Una fábrica con una producción anual de 1.000 toneladas de aleación de tungsteno y un costo de electricidad de US\$500.000 (US\$0,1/kWh) se redujo a US\$400.000 después de la sinterización a baja temperatura, ahorrando US\$100.000.

#### 11.3.4 Costos ambientales e implicaciones políticas

##### Fondo

Las regulaciones ambientales (como la Ley de Protección Ambiental de China de 2023) requieren que los gases y aguas residuales se descarguen de acuerdo con los estándares, lo que aumenta los costos de tratamiento, pero el reciclaje puede compensarse parcialmente.

##### Factores específicos

- **Tratamiento de gases residuales** : equipo de eliminación de polvo de bolsas + desnitrificación (inversión de 1 millón de dólares, vida útil de 10 años), 50-100 dólares por tonelada de costo de tratamiento de aleación.
- **Tratamiento de aguas residuales** : neutralización + sedimentación (50-100 yuanes por tonelada de aguas residuales), alrededor de 50-100 dólares estadounidenses por tonelada de aleación.
- **Requisitos de la política** : Una reducción del 30% del CO<sub>2</sub> requiere tecnología de captura de carbono (20 dólares estadounidenses por tonelada de CO<sub>2</sub> ) y un aumento de 60 a 80 dólares estadounidenses por tonelada de aleación.

**Estudio de caso:** Una fábrica con una producción anual de 500 toneladas de aleaciones, un costo operativo anual de equipos de protección ambiental de 250.000 dólares estadounidenses, una multa de 100.000 dólares estadounidenses por no cumplir con la norma y un aumento de costo total de 350.000 dólares estadounidenses.

#### 11.3.5 Análisis de casos de costos

##### Casos específicos

- **Fábrica A en China** : Producción anual de 1000 toneladas de W-95Ni-Fe, polvo de tungsteno a 19 000 USD/tonelada, costo total de 26 000 USD/tonelada, precio de venta de 35 000 USD/tonelada, beneficio de 900 USD/tonelada. Los costos energéticos y ambientales

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

representan el 30 %, y se desperdician recursos debido a las bajas tasas de reciclaje (30 %).

- **Fábrica B de EE. UU.** : Producción anual de 500 toneladas de W-97Ni-Fe, polvo de tungsteno a 35 000 USD/tonelada, coste total de 32 000 USD/tonelada, precio de venta de 45 000 USD/tonelada, beneficio de 1300 USD/tonelada. La tasa de reciclaje es del 60 %, lo cual es respetuoso con el medio ambiente y costoso, pero cumple con la normativa.

### 11.3.6 Estrategias de optimización de costos

#### Desafío

- **Fluctuaciones de la materia prima** : los precios del tungsteno aumentan los costos entre un 10% y un 15%.
- **Alto consumo energético** : el consumo de energía de procesamiento representa entre el 20% y el 30% del coste.
- **Presión ambiental** : el cumplimiento normativo aumentó entre un 5% y un 10%.

#### Solución

- **Optimización del aprovisionamiento** : los contratos a largo plazo fijan los precios del tungsteno (reducen las fluctuaciones en un 5%) y aumentan la proporción de polvo de tungsteno reciclado (reducción de costos en un 40%).
- **Tecnología de ahorro de energía** : sinterización a baja temperatura + generación de energía fotovoltaica (consumo de energía reducido en un 20%-30%), costo de electricidad reducido en 100.000 dólares estadounidenses/1.000 toneladas.
- **Eficiencia de recuperación** : La tasa de recuperación de la hidrometalurgia es del 90%, lo que ahorra entre 1 y 15 000 dólares estadounidenses por tonelada y reduce los costos de protección ambiental en un 50%.

### 11.3.7 Comparación de costos y pronóstico de tendencias

#### Comparaciones nacionales y extranjeras

- **China** : El costo total es de 25.000 a 30.000 dólares estadounidenses por tonelada, lo cual es bajo debido a las ventajas de las materias primas y la mano de obra, pero el costo de la protección del medio ambiente está aumentando.
- **EE.UU./Europa** : 3.000-35.000 dólares/ tonelada , un precio elevado debido a los costos energéticos y regulatorios, pero con alta eficiencia de recuperación.

#### Pronóstico de tendencias

- **Corto plazo (2025)**: los precios del tungsteno se mantienen estables entre 3,2 y 35.000 dólares por tonelada , y el coste total aumenta un 5% (por motivos medioambientales).
- **Largo plazo (2030)**: 60% de recuperación, reducción de costos a \$2.000-25.000/tonelada y reducción del 20% en el consumo de energía mediante nuevas tecnologías energéticas.

### 11.3.8 Resumen de las tablas de análisis de costos

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Enlace de costos	Porcentaje	Costo por tonelada (USD)	Factores influyentes	Optimiza tu estrategia
<b>Materias primas</b>	50%-60%	1900-2150	Fluctuaciones del precio del tungsteno y limitaciones de suministro	Contrato a largo plazo para la recuperación de polvo de tungsteno.
<b>Tratamiento</b>	20%-30%	500-700	Eficiencia del proceso, depreciación del equipo	Sinterización a baja temperatura, actualizaciones de equipos
<b>Energía</b>	10%-15%	350-525	Precio de la electricidad, consumo de energía	Generación de energía fotovoltaica, tecnología de ahorro energético
<b>Protección ambiental</b>	5%-10%	100-200	Tratamiento de gases y aguas residuales, normativa	Eficiencia del reciclaje y control de la contaminación
<b>Trabajo y otros</b>	5%-10%	100-200	Mano de obra, transporte	Automatización, optimización logística
<b>Costo total</b>	100%	2500-3000	Impacto combinado	Optimización de todo el proceso



## Capítulo 12: Fronteras de investigación de aleaciones de tungsteno con alta gravedad específica

La aleación de tungsteno (PES) ocupa un lugar destacado en numerosos campos gracias a sus excelentes propiedades físicas y mecánicas. Su línea de investigación se centra en el desarrollo de nuevos materiales, la optimización del rendimiento, la simulación computacional y el diseño inteligente. Con el avance de la ciencia de los materiales y la mejora de los requisitos de aplicación, el desarrollo de aleaciones de tungsteno de mayor rendimiento, más respetuosas con el medio ambiente y con una alta gravedad específica se ha convertido en un foco de investigación clave. Este capítulo explorará el estado actual de la tecnología y su potencial futuro en estas áreas de vanguardia.

### 12.1 Desarrollo de nuevos materiales para aleaciones de tungsteno con alta gravedad específica

Las formulaciones tradicionales de aleaciones de tungsteno (p. ej., W-Ni-Fe, W-Ni-Cu) han tenido dificultades para satisfacer plenamente las necesidades de las industrias aeroespacial, militar y médica de mayor densidad, resistencia y durabilidad. El desarrollo de nuevos materiales busca superar los obstáculos en el rendimiento y mejorar la sostenibilidad mediante la introducción de nuevos elementos, la optimización de las microestructuras y la exploración de fases aglutinantes alternativas.

#### 12.1.1 Antecedentes y factores de desarrollo

##### Fondo

La aleación tradicional de tungsteno con alta gravedad específica se compone principalmente de tungsteno (W) (85-97%), complementado con níquel (Ni), hierro (Fe) o cobre (Cu) como fase aglutinante, con una densidad de 17,0-18,8 g/cm<sup>3</sup> y una resistencia a la tracción de 700-1000 MPa. Sin embargo, el sector aeroespacial requiere materiales superpesados con una densidad > 19,0 g/cm<sup>3</sup>, el militar requiere resistencia a temperaturas > 2000 °C y el médico requiere formulaciones de menor toxicidad para

##### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

promover la investigación y el desarrollo de nuevos materiales.

#### Fuerza motriz

- **Rendimiento mejorado** : mayor densidad y resistencia para entornos extremos.
- **Requisitos de protección del medio ambiente** : reducir el contenido de Ni, cumplir con las regulaciones REACH y RoHS.
- **Avances tecnológicos** : la nanotecnología, las aleaciones de alta entropía y la fabricación aditiva ofrecen nuevas posibilidades.

#### 12.1.2 Diseño de composición de nuevos materiales

##### Detalles específicos

- **Aleaciones con alto contenido de tungsteno** : contenido de W aumentado al 98%-99%, como W-98Ni-Fe, densidad 19,0-19,3 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1100 MPa y la fase aglutinante reducida al 1%-2%.
- **Aleaciones modificadas con tierras raras** : agregue La y Ce (0,5%-1%), como W-95Ni-Fe-La, el grano se refina a 1 μm, la tenacidad aumenta en un 20% y la resistencia a la temperatura es de 1800 °C.
- **Aleación sin níquel** : reemplace Ni con Fe, Cu o Mo, como W-95Fe-Cu, con una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción de 900 MPa y emisión de Ni de < 0,05%, que cumple con los requisitos de protección ambiental.
- **Aleaciones nanocompuestas** : Nano SiC o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1%-5%), como W-90Ni-Fe/ SiC, con una densidad de 17,5 g/cm<sup>3</sup>, dureza de 550 HV y un aumento del 30% en la resistencia al desgaste.

##### Detalles técnicos

- **Proceso de preparación** : La aleación de alto tungsteno adopta molienda de bolas de alta energía (500 rpm, 12 horas) y prensado isostático en caliente (HIP, 250 MPa, 1400 °C), y la porosidad es < 0,05%.
- **Microestructura** : Los elementos de tierras raras refinan los granos, las nanopartículas se distribuyen uniformemente y la fuerza de unión interfacial aumenta en un 15%.

#### 12.1.3 Ventajas de rendimiento de los nuevos materiales

##### Rendimiento específico

- Densidad: W-98Ni-Fe hasta 19,2 g/cm<sup>3</sup> (tradicional 18,5 g/cm<sup>3</sup>), un aumento del 3%-5%.
- Resistencia: W-95Ni-Fe-La resistencia a la tracción 1150 MPa (tradicional 1000 MPa), un aumento del 15%.
- Resistencia a la temperatura: W-95Fe-Cu tiene una resistencia a la temperatura de 2000 °C (tradicional 1500 °C), un aumento del 33 %.
- Protección del medio ambiente: contenido de níquel W-95Fe-Cu <1%, liberación <0,05%, mejor que el W-Ni-Fe tradicional (Ni 5%-7%).
- Resistencia a la abrasión: el coeficiente de fricción W-90Ni-Fe/ SiC se reduce a 0,3

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(convencional 0,5) y la vida útil aumenta en un 40 %.

**Datos de ensayo de la probeta** ( 50×50×10 mm, W-98Ni-Fe, peso 950 g): densidad 19,2 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1120 MPa, dureza 500 HV, deformación < 0,01 mm a 2000 °C.

#### 11.1.4 Tecnología de fabricación de nuevos materiales

##### Proceso específico

- **Molienda de bolas de alta energía** : polvo de tungsteno (1  $\mu\text{m}$ ) mezclado con polvo de tierras raras, molido a 500 rpm durante 12 horas, refinamiento de grano a 50 nm.
- **isostático en frío** : moldeo a 300 MPa, densidad en verde > 60%.
- **Sinterización al vacío** : 1500°C, 10<sup>-3</sup> Pa, 2 horas, densidad hasta el 99,5% del valor teórico.
- **Tratamiento HIP** : 250 MPa, 1400°C, 1,5 horas, porosidad reducida al 0,03%.
- **Fabricación aditiva (SLM)**: potencia láser de 4000 W, espesor de capa de 50  $\mu\text{m}$ , preparación de formas complejas con una precisión de  $\pm 0,02$  mm.

**Caso:** Un instituto de investigación utilizó SLM para imprimir piezas W-95Ni-Fe-La (con un peso de 500 g) con una densidad de 18,9 g/cm<sup>3</sup> y una resistencia de 1150 MPa, acortando el ciclo de desarrollo en un 50%.

#### 12.1.5 Casos prácticos de aplicación de nuevos materiales

##### Casos específicos

- **Aeroespacial** : contrapeso W-98Ni-Fe (19,2 g/cm<sup>3</sup>, 500 g), utilizado en una pieza de equilibrio de cohete, reducción de peso del 10%, resistencia a temperaturas de 2000 °C, de acuerdo con los requisitos de la NASA.
- **Militar** : núcleo de bala W-95Fe-Cu (18,5 g/cm<sup>3</sup>, 300 g), profundidad de penetración aumentada en un 15%, liberación de Ni < 0,05%, cumple con las regulaciones de protección ambiental.
- **Médico** : blindaje W-90Ni-Fe/ SiC (17,5 g/cm<sup>3</sup>, 200 g), 30 % más de resistencia a la abrasión, 95 % de blindaje contra rayos X, utilizado en máquinas de TC.

#### 12.1.6 Desafíos técnicos y soluciones en el desarrollo

##### Desafío

- **Uniformidad de la composición** : Un alto contenido de tungsteno (>98%) puede provocar fácilmente una distribución desigual de la fase aglutinante y una desviación de la resistencia de  $\pm 50$  MPa.
- **Costos de fabricación** : los equipos HIP y SLM son caros (> \$1 millón) y el costo por tonelada aumenta entre un 20% y un 30%.
- **Protección del medio ambiente** : la adición de tierras raras necesita controlar los residuos (<0,1%) para evitar la contaminación secundaria.

##### Solución

- **Optimización de la homogeneidad** : sinterización multizona (diferencia de temperatura < 5°C) y agitación ultrasónica, la desviación de distribución se reduce al 5%.
- **Reducción de costos** : equipo HIP doméstico (500.000 dólares estadounidenses/juego), recuperación de polvo de tungsteno (reducción de costos del 40%).
- **Control ambiental** : Proceso de reciclaje de tierras raras (tasa de recuperación > 90%),

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

emisiones de residuos reducidas al 0,05%.



[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](http://www.ctia.com.cn)

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

### 12.1.7 Resumen del formulario de desarrollo de nuevos materiales

Proyecto	Contenido
<b>Nuevos materiales</b>	W-98Ni-Fe, W-95Ni-Fe-La, W-95Fe-Cu, W-90Ni-Fe/SiC
<b>Características de los ingredientes:</b>	W 98%-99%, tierras raras 0,5%-1%, sin níquel, nano 1%-5%
<b>Beneficios de rendimiento</b>	La densidad es de 19,2 g/cm <sup>3</sup> , la resistencia es de 1150 MPa y la resistencia a la temperatura es de 2000 °C.
<b>Proceso de fabricación</b>	Molienda de bolas de alta energía, HIP, SLM, porosidad < 0,05%
<b>Campos de aplicación</b>	Contrapesos de aviación, núcleos de balas militares, blindaje médico
<b>Desafío</b>	Uniformidad, coste, protección del medio ambiente.
<b>Solución</b>	Sinterización multizona, localización de equipos, recuperación de tierras raras

### 12.2 Dirección de mejora del rendimiento de la aleación de tungsteno con alta gravedad específica

La mejora del rendimiento de las aleaciones de tungsteno con alta gravedad específica es un tema clave en la vanguardia de la investigación, con el objetivo de satisfacer las necesidades de mayor densidad, resistencia, resistencia térmica y durabilidad en los sectores aeroespacial, militar, médico y otros. Mediante la optimización de la composición, la mejora de la microestructura y la introducción de nuevos procesos, las mejoras del rendimiento están evolucionando desde las métricas tradicionales monolíticas hacia características multifuncionales. Esta sección explorará las vías técnicas y el potencial de estas áreas.

#### 12.2.1 Contextual y basado en la demanda

##### Fondo

La densidad de las aleaciones de tungsteno tradicionales con alta gravedad específica (como W-Ni-Fe y W-Ni-Cu) es de 17,0 a 18,8 g/cm<sup>3</sup>, la resistencia a la tracción es de 700 a 1000 MPa y la resistencia a la temperatura es de 1500 °C, cercana al límite de rendimiento. Aplicaciones emergentes, como vehículos supersónicos (temperatura > 2000 °C), exploración espacial profunda (densidad > 19,0 g/cm<sup>3</sup>) y dispositivos médicos de alta precisión (50 % más de resistencia al desgaste), requieren avances en los cuellos de botella existentes.

##### Impulsado por la demanda

- Aeroespacial** : una mayor densidad reduce el volumen, la resistencia a altas temperaturas mejora la eficiencia del empuje.
- Militar** : mayor resistencia y resistencia al desgaste para mejorar la penetración, la resistencia a la corrosión y prolongar la vida útil.
- Médico** : menor toxicidad y mayor eficiencia de protección para adaptarse a las necesidades de implantación a largo plazo.

#### 12.2.2 Aumento sinérgico de densidad e intensidad

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Al aumentar el contenido de tungsteno y optimizar la fase aglutinante, se mejoran la densidad y la resistencia para mantener la tenacidad.

#### Detalles específicos

- **Fórmula de alto contenido de tungsteno** : contenido de W aumentado al 98%-99%, como W-98Ni-Fe, densidad 19,0-19,3 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción 1100-1200 MPa.
- **Optimización de la fase aglutinante** : la relación Ni:Fe se ajustó de 7:3 a 5:5, la resistencia del límite de grano aumentó en un 10% y el alargamiento se mantuvo entre un 5% y un 10%.
- **Detalles técnicos** : Molino de bolas de alta energía (600 rpm, 15 horas) polvo de tungsteno refinado a 50 nm, HIP (300 MPa, 1450°C) densificado con < porosidad de 0,03%.

#### Mejoras de rendimiento

- La densidad aumentó entre un 3% y un 5% (18,8→19,2 g/cm<sup>3</sup>).
- La resistencia aumentó entre un 15% y un 20% (1000→1200 MPa).

**Caso:** Un instituto de investigación aeronáutica desarrolló un contrapeso W-98Ni-Fe (19,2 g/cm<sup>3</sup>, 1150 MPa) con una reducción de volumen del 10% para piezas de equilibrio del cohete.

#### 12.2.3 Mejora de la resistencia a altas temperaturas

Las instrucciones mejoran la estabilidad de la aleación a temperaturas extremas agregando elementos resistentes a altas temperaturas y mejorando la microestructura.

#### Detalles específicos

- Adición de elementos: Mo (5%-10%), Ta (1%-3%), como W-90Mo-Ni, el punto de fusión aumenta a 2000 °C y la resistencia a la oxidación aumenta en un 25%.
- Fortalecimiento de los límites de grano: elementos de tierras raras (La, Y, 0,5%-1%), como W-95Ni-Fe-Y, tamaño de grano <1 μm, deformación <0,01 mm a 2000°C.
- Detalles técnicos: Sinterización al vacío (1600°C, 10<sup>-4</sup> Pa), recubrimiento de superficie (por ejemplo, ZrC, espesor 10 μm), conductividad térmica 130 W/( m·K ).

#### Mejoras de rendimiento

- La resistencia a la temperatura aumenta en un 33% (1500→2000°C).
- La actividad antioxidante aumenta entre un 20% y un 30%.

**Caso:** Una unidad militar desarrolló un núcleo de bala W-90Mo-Ni (18,5 g/cm<sup>3</sup>), que mantuvo una resistencia de 900 MPa a 2000 °C y aumentó la profundidad de penetración en un 15 %.

#### 12.2.4 Mejora de la resistencia al desgaste y a la corrosión

Se introducen fases duras y elementos anticorrosivos para mejorar la dureza de la superficie y la estabilidad química.

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

### Detalles específicos

- **Refuerzo de fase dura** : agregue WC, TiC (1%-5%), como W-90Ni-Fe/WC, la dureza aumenta a 600 HV y el coeficiente de fricción se reduce a 0,3.
- **Formulación anticorrosión** : reemplace Ni con Cu o Mo, como W-95Mo-Cu, con una pérdida de masa <0,1 % en la prueba de niebla salina (1000 horas).
- **Detalles técnicos** : Moldeo SLM (potencia láser 4000 W), revestimiento superficial con capa de TiC (20  $\mu\text{m}$  de espesor), aumento del 40% en la resistencia al desgaste.

### Mejoras de rendimiento

- Aumento de dureza del 20%-30% (450→600 HV).
- La resistencia al desgaste aumenta entre un 30% y un 50% y la resistencia a la corrosión aumenta un 20%.

**Caso:** Una fábrica de equipos médicos desarrolló un colimador W-90Ni-Fe/WC (17,5 g/cm<sup>3</sup>, 550 HV), que aumentó la vida útil en un 50% y la eficiencia de blindaje alcanzó el 95%.

### 12.2.5 Optimización de las propiedades de tenacidad y fatiga

El objetivo es mejorar la tenacidad y la resistencia a la fatiga mediante la manipulación de la microestructura y el nano-refuerzo.

### Detalles específicos

- **Refinamiento de grano** : polvo de nanotungsteno (20-50 nm) + dispersión ultrasónica, tamaño de grano < 500 nm, como W-95Ni-Fe, y la tenacidad a la fractura aumentó en un 15% (20→23 MPa·m<sup>1/2</sup>).
- **Nanocomuestos** : La adición de CNT (nanotubos de carbono, 0,5%-1%), como W-95Ni-Fe/CNT, aumenta la vida útil por fatiga en un 30% (10<sup>6</sup>→1,3×10<sup>6</sup> veces).
- **Detalles técnicos** : prensado isostático en frío (400 MPa), sinterización a baja temperatura (1300°C), reducción del 10% en el deslizamiento de los límites de grano.

### Mejoras de rendimiento

- La resiliencia aumenta entre un 10% y un 15%.
- La vida en fatiga aumenta entre un 20% y un 30%.

**Caso:** Una fábrica de piezas aeroespaciales utiliza W-95Ni-Fe/CNT (18,0 g/cm<sup>3</sup>) para fabricar contrapesos, con una vida útil por fatiga de 1,5×10<sup>6</sup> veces para satisfacer las necesidades de vibración de alta frecuencia.

### 12.2.6 Ejemplos de aplicación práctica de la mejora del rendimiento

### Casos específicos

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

- **Aeroespacial** : W-98Ni-Fe (19,2 g/cm<sup>3</sup>, 1200 MPa), utilizado en el contrapeso del cohete SpaceX, reducción de peso del 15%, resistencia a temperaturas de 2000 °C.
- **Industria militar**: W-90Mo-Ni (18,5 g/cm<sup>3</sup>, 900 MPa), resistencia a la temperatura central 2000°C, penetración aumentada en un 20%.
- **Médico** : W-95Mo-Cu (18,0 g/cm<sup>3</sup>, resistente a la corrosión), blindaje de máquina CT, vida útil 40 % más larga.

### 12.2.7 Desafíos técnicos y soluciones para la mejora del rendimiento

#### Desafío

- **Equilibrio de rendimiento** : el aumento de la densidad permite reducir fácilmente la tenacidad (elongación a <2%).
- **del proceso** : HIP y SLM son costosos (\$5,000 por tonelada).
- **Dificultad de la prueba** : Los equipos para pruebas de rendimiento a alta temperatura (> 2000 °C) y fatiga son costosos (> 2 millones de dólares).

#### Solución

- **Optimización del equilibrio** : fortalecimiento multifásico (tierras raras + fase nano), mantenimiento de la tenacidad del 5%-10%.
- **Control de costos** : equipos domésticos (HIP reducido a 500.000 dólares estadounidenses/juego), recuperación de polvo de tungsteno (reducción de costos del 40%).
- **Mejoras en las pruebas** : los cálculos de simulación reemplazan algunos experimentos, lo que reduce el costo en un 30%.

### 12.2.8 Resumen de las instrucciones de mejora del rendimiento

Dirección del Medios técnicos ascensor	Mejoras en el rendimiento	Ejemplos de aplicación
Densidad y resistencia	98%-99 %, HIP	La densidad es de 19,2 g/cm <sup>3</sup> y la intensidad es de 1200 MPa.
Resistencia a altas temperaturas	Mo, Ta, recubrimiento	Resistencia a la temperatura 2000°C, resistencia a la oxidación aumentada en un 25%.
Resistente al desgaste y a la corrosión.	WC, TiC , Mo-Cu	Dureza 600 HV, resistencia a la corrosión aumentada en un 20%.
Dureza y fatiga	Nanopolvo, CNT	Dureza 23 MPa·m <sup>1/2</sup> , 30 % más de vida útil
desafío	Equilibrio de rendimiento, costo y pruebas	Contrapesos de aviación
solución	Intensificación multifásica, localización y simulación	colimadores médicos

### 12.3 Simulación y ciencia de materiales computacionales de aleaciones de tungsteno con alta gravedad específica

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La I+D de aleaciones de tungsteno con alta gravedad específica se ha basado tradicionalmente en ensayos experimentales de ensayo y error, lo cual resulta costoso y requiere mucho tiempo. La ciencia computacional de materiales proporciona un enfoque de diseño eficiente y económico mediante la simulación de propiedades atómicas, microestructurales y macroscópicas. Desde la dinámica molecular (MD) hasta el análisis de elementos finitos (FEA), las técnicas de simulación están acelerando el desarrollo y la optimización del rendimiento de nuevas aleaciones de tungsteno. Esta sección explorará la aplicación de estas tecnologías en aleaciones de tungsteno con alta gravedad específica y su potencial.

### 12.3.1 Antecedentes y significado de la simulación y la computación

#### Fondo

El rendimiento de las aleaciones de tungsteno con alta gravedad específica (p. ej., W-Ni-Fe) se ve afectado por la composición, el tamaño de grano y los parámetros del proceso, y verificar experimentalmente cada formulación requiere meses y supone un coste (aproximadamente entre 1 000 y 20 000 dólares por tonelada de prueba). La ciencia computacional de materiales utiliza simulaciones multiescala para predecir el comportamiento del material, reducir el número de experimentos y acortar el ciclo de desarrollo.

#### Significado

- **Predicción de rendimiento** : Simule densidad, resistencia y resistencia a la temperatura con una precisión del 90% al 95%.
- **Ahorro de costes** : reducción del 30%-50% en el coste de pruebas y acortamiento del 50% del tiempo de ciclo.
- **Optimización del diseño** : seleccione rápidamente las mejores formulaciones y procesos con 2 o 3 veces más eficiencia.

### 12.3.2 Principales técnicas y métodos de simulación

#### Tecnologías específicas

- **Dinámica molecular (MD):**
  - **Principio** : Simular interacciones átomo a átomo y analizar límites de grano, defectos y difusión.
  - **Aplicación** : Predicción de la energía de enlace interfacial W-Ni (aproximadamente 5-6 eV) y el efecto del tamaño del grano en la tenacidad (aumento del 15 % < 1  $\mu\text{m}$  ).
  - **Herramientas** : LAMMPS, escala computacional  $10^5$ - $10^6$  átomos, paso de tiempo 1 fs.
- **Teoría del funcional de la densidad (DFT):**
  - **Principio** : La mecánica cuántica calcula la estructura electrónica y evalúa la estabilidad de las aleaciones.
  - **Aplicación** : Calcular la entalpía de formación de W-Mo-Ni (-0,5 eV/átomo) y optimizar el contenido de Mo (5%-10%).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Herramienta** : VASP, precisión  $\pm 0,01$  eV, 10-20 horas/receta.
- **Ánálisis de elementos finitos (FEA):**
  - **Principio** : Simular el estrés macroscópico, la conducción de calor y el comportamiento de fatiga.
  - **Aplicación** : Predicción de la deformación del contrapeso W-95Ni-Fe a 2000 °C ( $<0,01$  mm).
  - **Herramientas** : ANSYS, malla de  $10^5$ - $10^6$  elementos,  $\pm 5$  % de precisión.
- **CÁLCULO DEL DIAGRAMA DE FASES (CALPHAD):**
  - **Principio** : Modelado termodinámico, predicción del equilibrio de fases y comportamiento de sinterización.
  - **Aplicación** : Temperatura de sinterización de W-Ni-Fe optimizada (1450 °C) con un error de cambio de fase de  $<5$  °C.
  - **Herramienta** : Thermo-Calc, base de datos que cubre la serie W-Ni-Fe-Cu.

**Características técnicas:** MD y DFT se centran en el micro (nivel atómico), FEA y CALPHAD se ocupan del macro y meso, y son altamente complementarios.

#### 12.3.3 Aplicación de la simulación a la predicción del rendimiento

##### Aplicaciones específicas

- **Densidad e intensidad** : MD simuló el deslizamiento del límite de grano de W-98Ni-Fe, con una densidad prevista de 19,2 g/cm<sup>3</sup> y una intensidad de 1150 MPa (error experimental  $<5$ %).
- **Resistencia a altas temperaturas** : DFT calcula el punto de fusión de W-90Mo-Ni (2000 °C), FEA verifica la distribución de tensión a 2000 °C y la resistencia se mantiene a 900 MPa.
- **Resistencia a la abrasión** : interfaz W-90Ni-Fe/WC simulada por MD, coeficiente de fricción 0,3, dureza 550 HV (consistencia experimental 95%).
- **Vida útil por fatiga** : análisis FEA de la propagación de grietas de W-95Ni-Fe/CNT bajo  $10^6$  ciclos, vida útil de  $1,3 \times 10^6$  veces.

Datos de rendimiento W-95Ni-Fe-La (18,9 g/cm<sup>3</sup>): tenacidad prevista por MD 23 MPa·m<sup>1/2</sup>, vida útil por fatiga verificada por FEA  $1,5 \times 10^6$  veces, desviación experimental  $<3$  %.

#### 12.3.4 Aplicación de la simulación en la optimización de procesos

##### Aplicaciones específicas

- **Optimización de sinterización** : CALPHAD predice la temperatura de sinterización óptima (1450 °C) para W-95Ni-Fe, la porosidad se reduce al 0,05 % y el FEA simula la concentración de tensión y ajusta la presión a 300 MPa.
- **Conformado SLM** : FEA analiza la potencia del láser (4000 W) y el espesor de capa (50 µm) con una densidad del 99,5% y una tensión residual de  $< 50$  MPa.
- **Control de grano** : molienda de bolas de alta energía simulada por MD (600 rpm), refinamiento de grano a 50 nm, tamaño  $< 1$  µm después de la sinterización y 15 % de tenacidad.

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Caso:** Un instituto de investigación utilizó CALPHAD para optimizar la sinterización de W-98Ni-Fe (1450 °C, 2 horas), con una densidad de 19,2 g/cm<sup>3</sup>, verificación experimental consistente y 50 % del costo de la prueba.

### 12.3.5 Estudios de casos prácticos de técnicas de simulación

#### Casos específicos

- **Contrapeso de aviación** : W-98Ni-Fe (19,2 g/cm<sup>3</sup>), resistencia del límite de grano simulada MD (6 eV), deformación predicha por FEA a 2000 °C (<0,01 mm), para componentes de cohetes, ciclo de desarrollo reducido en 3 meses.
- **Núcleo de bala militar** : W-90Mo-Ni (18,5 g/cm<sup>3</sup>), cálculo DFT de fase estable de Mo (5%), verificación FEA de resistencia a altas temperaturas (900 MPa), profundidad de penetración aumentada en un 15%.
- **Blindaje médico** : W-95Ni-Fe/WC (17,5 g/cm<sup>3</sup>), resistencia al desgaste prevista MD (dureza 550 HV), sinterización optimizada CALPHAD (1400 °C), vida útil un 40 % más larga.

### 12.3.6 Desafíos técnicos y soluciones para la simulación y la computación

#### Desafío

- **Precisión computacional** : MD y DFT aumentan el error de los sistemas complejos (>5 elementos) al 10%-15%.
- **Costo de cálculo** : Las simulaciones de alta precisión requieren supercomputación (50 a 100 horas por receta, costo de \$500 a \$1000).
- **Verificación experimental** : Los resultados de la simulación requieren una gran cantidad de calibración experimental y el costo aún representa el 30%.

#### Solución

- **Mejora de la precisión** : combinado con el aprendizaje automático (ML) para corregir el error DFT al 5%, optimizar el campo de fuerza MD.
- **Reducción de costes** : computación en la nube (10 dólares por hora), supercomputación doméstica (reducción de costes del 50%).
- **Optimización de la validación** : el modelo multiescala (MD+FEA) reduce el número de experimentos en un 50% e integra la validación de la base de datos.

### 12.3.7 El potencial futuro de la simulación y la computación

#### Tendencia

- **Integración de múltiples escalas** : MD, DFT y FEA están conectados a la perfección y la precisión de predicción es de hasta el 98%.
- **Simulación en tiempo real** : la computación acelerada por IA reduce el tiempo necesario para una sola receta a 1 hora.
- **Construcción de base de datos** : base de datos global de simulación de aleaciones de tungsteno,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

que abarca 100 fórmulas y comparte costos de I+D.

**Predicción de caso:** En 2030, W-99Ni-Fe (19,3 g/cm<sup>3</sup>) está diseñado con AI+FEA, con un error de predicción de densidad e intensidad de <2%, y el ciclo de desarrollo se acorta a 1 mes.

### 12.3.8 Resumen de tablas de simulación y cálculo

proyecto	contenido
<b>Tecnología analógica</b>	MD, DFT, FEA, CALPHAD
<b>Predicción del rendimiento</b>	La densidad es de 19,2 g/cm <sup>3</sup> , la resistencia es de 1150 MPa y la resistencia a la temperatura es de 2000 °C.
<b>Optimización de procesos</b>	Sinterización 1450°C, SLM 4000 W, grano <1 μm
<b>Ejemplos de aplicación</b>	Contrapesos de aviación, núcleos de balas militares, blindaje médico
<b>desafío</b>	Precisión, costo, validación
<b>solución</b>	Corrección de ML, Computación en la nube, Bases de datos
<b>Potencial futuro</b>	Integración multiescala, simulación en tiempo real, construcción de bases de datos

### 12.4 Diseño asistido por IA y aleación de tungsteno personalizada con alta gravedad específica

El rápido desarrollo de la tecnología de inteligencia artificial (IA) ha proporcionado nuevas herramientas para el diseño y la personalización de aleaciones de tungsteno con alta gravedad específica. Mediante el aprendizaje automático (ML), el aprendizaje profundo (DL) y el modelado basado en datos, la IA puede analizar rápidamente recetas, optimizar procesos y predecir el rendimiento para satisfacer las necesidades de materiales personalizados en los sectores aeroespacial, militar, médico, etc. Esta sección explorará la aplicación de la IA en la I+D de aleaciones de tungsteno y su potencial.

#### 12.4.1 Antecedentes e importancia del diseño asistido por IA

##### Fondo

El diseño de aleaciones tradicionales de tungsteno con alta gravedad específica (p. ej., W-Ni-Fe) se basa en la experimentación y la experiencia, y el desarrollo de una nueva formulación puede tardar meses o años y costar entre decenas y cientos de miles de dólares. La IA acelera este proceso mediante el análisis y la simulación de big data, especialmente en el contexto de los crecientes requisitos de personalización, como densidades específicas y resistencia a la temperatura.

##### Significado

- Ganancias de eficiencia** : reducción del 50%-70% en los ciclos de desarrollo, de meses a semanas.
- Ahorro de costes** : reducción del 60% en el número de experimentos y reducción del 30%-50% en el coste.
- Personalización** : Responda rápidamente a necesidades específicas con una precisión de más del 95%.

#### 12.4.2 Aplicación de la tecnología de IA en el diseño de aleaciones de tungsteno

##### Tecnologías específicas

###### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Aprendizaje automático (ML):**
  - **Métodos** : El aprendizaje supervisado (por ejemplo, bosque aleatorio, máquina de vectores de soporte) predijo el rendimiento y los componentes optimizados del modelo de regresión.
  - **Aplicación** : Entrada de relación W, Ni, Fe, densidad de salida ( $19,0 \text{ g/cm}^3$ ) e intensidad (1100 MPa) con un error de  $<5\%$ .
  - **Herramientas**: Python+Scikit-learn , conjunto de datos de entrenamiento de 1000 a 5000 grupos.
- **Aprendizaje profundo (DL):**
  - **Métodos** : Se utilizó una red neuronal convolucional (CNN) para analizar la microestructura y generar una nueva fórmula para el diseño de redes antagónicas (GAN).
  - **Aplicación** : Predicción del tamaño de grano ( $<1 \mu\text{m}$ ) a partir de imágenes SEM para generar formulaciones W-95Ni-Fe-La.
  - **Herramienta** : TensorFlow, que tarda entre 5 y 10 horas por modelo.
- **Aprendizaje por refuerzo (AR):**
  - **Método** : Optimizar los parámetros del proceso (por ejemplo, temperatura de sinterización 1450 °C, presión 300 MPa).
  - **Aplicación** : Ajustar los parámetros SLM (potencia 4000 W) y aumentar la densidad al 99,8%.
  - **Herramienta** : OpenAI Gym, 1000 iteraciones.
- **basado en datos :**
  - **Métodos** : Se integraron datos experimentales y de simulación para construir una base de datos de rendimiento.
  - **Aplicación** : Predicción de la deformación de W-98Ni-Fe a 2000°C ( $<0,01 \text{ mm}$ ).
  - **Herramienta** : Pandas+Thermo-Calc , tamaño de base de datos  $> 10^4$ .

### Características técnicas

ML es adecuado para la predicción del rendimiento, DL es adecuado para estructuras complejas, RL optimiza los procesos y la integración basada en datos de información de múltiples fuentes.

### 12.4.3 Aplicación de la IA en la predicción del rendimiento y el diseño de formulaciones

#### Aplicaciones específicas

- **Densidad e intensidad** : ML predijo W-98Ni-Fe ( $19,2 \text{ g/cm}^3$ , 1150 MPa) con un error de  $<3\%$ , lo que fue mejor que el método tradicional de prueba y error.
- **Resistencia a altas temperaturas** : análisis DL W-90Mo-Ni, punto de fusión previsto 2000 °C, resistencia 900 MPa, consistencia de verificación del 95 %.
- **Resistencia a la abrasión** : Fórmula W-90Ni-Fe/WC optimizada por RL, dureza 550 HV, coeficiente de fricción 0,3, consistencia experimental 98%.
- **Requisitos personalizados** : entrada "densidad  $19,0 \text{ g/cm}^3$ , resistencia a la temperatura 1800 °C", salida AI W-95Ni-Fe-Mo (Mo 5%), tiempo de desarrollo 2 semanas.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Datos de rendimiento

W-95Ni-Fe-La: densidad prevista por IA de 18,9 g/cm<sup>3</sup>, tenacidad de 23 MPa·m<sup>1/2</sup>, desviación experimental de <2%, ahorro del 70% del coste de prueba.

## 12.4.4 Aplicación de la IA en la optimización de procesos y fabricación

### Aplicaciones específicas

- **Optimización de la sinterización** : sinterización W-95Ni-Fe ajustada por RL (1450 °C, 2 horas), la porosidad disminuyó al 0,04 % y la densidad aumentó en 0,2 g/cm<sup>3</sup>.
- **SLM personalizado** : parámetros láser optimizados DL (4000 W, espesor de capa 50 μm), con una precisión de ± 0,02 mm y una tensión residual de < 40 MPa para piezas complejas.
- **Microcontrol** : ML predijo un tiempo de molienda de bolas (15 horas, 600 rpm), un tamaño de grano < 1 μm y una tenacidad aumentada en un 15 %.

**Caso:** Una fábrica utiliza IA para optimizar el proceso SLM W-98Ni-Fe, con una densidad de 19,2 g/cm<sup>3</sup> y una resistencia de 1200 MPa, aumentando la eficiencia de producción en un 30% y reduciendo el coste en un 20%.

## 12.4.5 Análisis de caso práctico de diseño asistido por IA

### Casos específicos

- **Contrapeso de aviación** : W-98Ni-Fe (19,2 g/cm<sup>3</sup>), fórmula de predicción ML (W 98%, Ni:Fe = 5:5), deformación verificada por FEA (<0,01 mm), para componentes de cohetes, ciclo de desarrollo reducido a 3 semanas.
- **Núcleo de bala militar** : W-90Mo-Ni (18,5 g/cm<sup>3</sup>), contenido de Mo de diseño DL (5%), sinterización optimizada RL (1500 °C), profundidad de penetración aumentada en un 15%, coste reducido en un 30%.
- **Blindaje médico** : W-95Ni-Fe/WC (17,5 g/cm<sup>3</sup>), dureza personalizada por IA 550 HV, vida útil 40 % más larga, utilizado en colimadores de máquinas de TC.

## 12.4.6 Desafíos técnicos y soluciones de la tecnología de IA

### Desafío

- **Calidad de los datos** : Los datos de entrenamiento son insuficientes (<1000 grupos) o están sesgados y el error de predicción aumenta al 10%-15%.
- **Recursos informáticos** : el modelo DL requiere clústeres de GPU (50 a 100 dólares por hora), algo que resulta difícil de costear para las pequeñas empresas.
- **Modelo explicativo** : La naturaleza de “caja negra” de la IA dificulta explicar el mecanismo físico, lo que limita el reconocimiento académico.

### Solución

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

- **Aumento de datos** : Al integrar simulación (MD, FEA) y datos experimentales, el tamaño de la muestra se incrementó a  $10^4$  grupos y el error se redujo al 5%.
- **Optimización de recursos** : plataforma de IA en la nube (5-10 dólares por hora), GPU doméstica (reducción de costos del 50%).
- **Mejora explicativa** : el análisis SHAP revela la importancia de las características (por ejemplo, el contenido de W contribuye en un 80 % a la densidad) y lo combina con la validación del modelo físico.

#### 12.4.7 Potencial futuro del diseño asistido por IA

##### Tendencia

- **Diseño en tiempo real** : IA + computación en la nube, el tiempo necesario para el diseño de una sola receta se reduce a 1 hora.
- **Personalización inteligente** : el usuario ingresa los requisitos (como "19,0 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la temperatura 2000 °C") y la IA genera automáticamente la receta y el proceso.
- **Colaboración global** : base de datos de aleaciones de tungsteno impulsada por IA, que comparte datos de nivel  $10^5$  y 3 veces más eficiencia en I+D.

El caso predice que en 2030, el diseño de IA de W-99Ni-Fe (19,3 g/cm<sup>3</sup>, 1300 MPa) optimizará los parámetros SLM en tiempo real, con un ciclo de desarrollo de 1 semana y una reducción de costos del 50%.

#### 12.4.8 Resumen del formulario de diseño asistido por IA

proyecto	contenido
Tecnología de IA	ML, DL, RL, modelado basado en datos
Predicción del rendimiento	La densidad es de 19,2 g/cm <sup>3</sup> , la resistencia es de 1150 MPa y la resistencia a la temperatura es de 2000 °C.
Optimización de procesos	Sinterización 1450°C, SLM 4000 W, grano <1 μm
Ejemplos de aplicación	Contrapesos de aviación, núcleos de balas militares, blindaje médico
Desafío	Calidad de datos, recursos informáticos, interpretabilidad
Solución	Aumento de datos, computación en la nube y análisis SHAP
Potencial futuro	Diseño en tiempo real, personalización inteligente, base de datos global

#### 12.5 Relación entre la aleación de tungsteno con alta gravedad específica y la aleación de alta entropía que contiene tungsteno

Como dos materiales de alto rendimiento, las aleaciones de tungsteno (como W-Ni-Fe) y las aleaciones de alta entropía (HEA) que contienen tungsteno están relacionadas y difieren en cuanto a su composición, diseño, microestructura y campos de aplicación. La aleación de tungsteno de alta gravedad específica

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

está compuesta principalmente por tungsteno, que busca alta densidad y alta resistencia; las aleaciones de alta entropía que contienen tungsteno están diseñadas con múltiples elementos principales para lograr un excelente rendimiento integral. Esta sección analizará la relación entre ambas y explorará su potencial de convergencia y desarrollo tecnológico.

### 12.5.1 Antecedentes y conceptos básicos

#### Aleación de tungsteno de alta gravedad específica

- **Definición** : Principalmente tungsteno (W, 85%-99%), complementado con una pequeña cantidad de fase aglutinante (como Ni, Fe, Cu), con una densidad de 17,0-19,3 g/cm<sup>3</sup> y una resistencia a la tracción de 700-1200 MPa.
- **Características** : alta densidad, alta resistencia, la microestructura es de partículas de tungsteno + estructura dúplex de fase aglutinante.
- **Aplicación** : Contrapeso de aviación, núcleo de bala militar, blindaje médico.

#### Aleaciones de alta entropía que contienen tungsteno

- **Definición** : Compuesto por 5 o más elementos (W, Mo, Ta, Nb, Zr, etc.), cada uno con un contenido de 5%-35%, y un valor de entropía alto (>1,5R, R es una constante de los gases).
- **Características** : Solución sólida monofásica (como la estructura BCC) con alta resistencia, resistencia a altas temperaturas y resistencia a la corrosión.
- **Aplicaciones** : Motores aeronáuticos, componentes de reactores nucleares.

La base de la relación es que ambos contienen tungsteno, aprovechando su alta densidad y alto punto de fusión (3422 °C), pero los conceptos de diseño son diferentes: la aleación de tungsteno con alta gravedad específica enfatiza el predominio del tungsteno, y el HEA que contiene tungsteno se centra en la sinergia de múltiples elementos.

### 12.5.2 Relaciones composicionales y estructurales

#### Comparación de ingredientes

- **Aleación de tungsteno de alta gravedad específica** : W representa entre el 85% y el 99%, se agregan Ni, Fe y otras cantidades pequeñas, y el valor de entropía es bajo (<1R), lo que está sesgado hacia el sistema de baja entropía.
- **El tungsteno HEA** : W representa entre el 10% y el 35%, lo que se equilibra con otros elementos con alto punto de fusión (como Mo 20% y Ta 20%) y tiene un alto valor de entropía (1,5-2R).

#### Comparación estructural

- **Aleación de tungsteno de alta gravedad específica** : estructura dúplex, partículas de tungsteno (BCC, tamaño 1-10 μm) están incrustadas en una matriz de Ni-Fe y la interfaz de fase es obvia.
- **HEA de tungsteno** : solución sólida BCC o FCC monofásica, grano uniforme (<5 μm), sin segunda fase obvia, alta impureza atómica.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Análisis de relaciones

- **Intersección** : El tungsteno como elemento común proporciona una base para una alta densidad y un alto punto de fusión.
- **Diferencias** : La aleación de tungsteno de alta gravedad específica se basa en el fortalecimiento de partículas de tungsteno, y la HEA se basa en el fortalecimiento de la solución y la distorsión reticular.

### 12.5.3 Conexiones y diferencias en el rendimiento

#### Comparación de rendimiento

- **Densidad** : 17,0-19,3 g/cm<sup>3</sup> para aleación de tungsteno con alta gravedad específica, 12,0-16,0 g/cm<sup>3</sup> para tungsteno HEA (menor contenido de W).
- **Resistencia** : aleación de tungsteno de alta gravedad específica 700-1200 MPa, tungsteno HEA 1000-2000 MPa (solución reforzada).
- **Resistencia a altas temperaturas** : aleación de tungsteno de alta gravedad específica 1500-2000 °C, tungsteno HEA 2000-2500 °C (multielemento estable).
- **Tenacidad** : aleación de tungsteno de alta gravedad específica, alargamiento del 5% al 20%, tungsteno HEA del 10% al 30% (la distorsión reticular ralentiza el agrietamiento).
- **Resistencia a la corrosión** : aleación de tungsteno de alta gravedad específica media (Ni fácil corrosión), tungsteno HEA excelente (Ta, resistencia a la oxidación de Nb).

### Análisis de relaciones

- **Contacto** : Ambos son resistentes a altas temperaturas y adecuados para ambientes extremos; El tungsteno aumenta la densidad y la resistencia.
- **Diferencias** : La aleación de tungsteno con alta gravedad específica tiene mayor densidad, y HEA tiene propiedades integrales más fuertes pero una densidad limitada.

#### Datos de prueba

- W-95Ni-Fe: 18,0 g/cm<sup>3</sup>, 1000 MPa, 1500 °C.
- WMoTaNbZr (各 20%): 14,5 g/cm<sup>3</sup>, 1800 MPa, 2200 °C.

### 12.5.4 Integración de procesos de fabricación

#### Comparación de procesos

- **Aleación de tungsteno de alta gravedad específica** : pulvimetallurgia (prensado + sinterización, 1450 °C), SLM (4000 W), HIP (300 MPa).
- **Tungsteno HEA** : fusión por arco al vacío (>3000 °C), pulvimetallurgia (1600 °C), fabricación aditiva (SLM).

#### Punto de intersección

- **Metalurgia de polvos** : Ambos pueden utilizar molienda de bolas de alta energía (600 rpm) para refinar el polvo y sinterizarlo y densificarlo.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Fabricación aditiva** : SLM es adecuado para ambos, y los HEA de tungsteno requieren mayor potencia (5000 W) para controlar el baño de fusión.
- **Tecnología Fusion** : La aleación de tungsteno de alta gravedad específica toma prestado el diseño de múltiples elementos de HEA, como W-90Mo-Ni-Ta, y tiene alta densidad (18,5 g/cm<sup>3</sup>) y resistencia a la temperatura (2000 °C).

**Caso:** Un instituto de investigación utilizó SLM para preparar W-80Mo-Ni-Ta (18,0 g/cm<sup>3</sup>), con una resistencia de 1300 MPa y una resistencia a la temperatura de 2100 °C, que combinaba las ventajas de dos tipos.

#### 12.5.5 Complementariedad y competencia en el ámbito de aplicación

##### Comparación de aplicaciones

- **Aleación de tungsteno de alta gravedad específica** : contrapeso (aviación), núcleo de bala (militar), blindaje (médico), se requiere alta densidad.
- **Tungsteno HEA** : Álabes de turbinas (aviación), componentes de reactores (nucleares), se requieren resistencia a altas temperaturas y fuerza.

##### Análisis de relaciones

- **Complementario** : La aleación de tungsteno de alta gravedad específica es adecuada para requisitos de alta densidad estática (por ejemplo, contrapeso), y el HEA de tungsteno es adecuado para escenarios dinámicos de alta temperatura (por ejemplo, cuchillas).
- **Competencia** : En el campo de la industria militar, ambos compiten entre sí, por ejemplo, el núcleo de la bala debe tener en cuenta tanto la densidad como la resistencia a la temperatura.

##### Comparación de casos

- **Contrapeso de aviación** : W-98Ni-Fe (19,2 g/cm<sup>3</sup>), tamaño pequeño, costo 30.000 dólares estadounidenses/tonelada.
- **Álabes del motor** : WMoTaNbZr (14,5 g/cm<sup>3</sup>), resistencia a la temperatura 2200°C, coste 50.000 dólares EE.UU./tonelada.

#### 12.5.6 Estudios de casos técnicos

##### Casos específicos

- **Aleación de tungsteno de alta gravedad específica** : W-95Ni-Fe (18,0 g/cm<sup>3</sup>, 1000 MPa), contrapeso de cohete, prioridad de densidad.
- **Tungsteno HEA** : WMoTaNb (15,0 g/cm<sup>3</sup>, 1800 MPa), hojas de aviación, se prefiere resistencia a la temperatura.
- **Diseño de fusión** : W-85Mo-Ni-Ta (18,2 g/cm<sup>3</sup>, 1400 MPa), teniendo en cuenta tanto la densidad como la resistencia a la temperatura, utilizado en piezas de misiles, con un rendimiento un 20% superior.

#### 12.5.7 Desafíos técnicos y soluciones en las relaciones

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Desafío

- **Relación densidad-resistencia** : HEA aumenta el contenido de W y aumenta la densidad, mientras que la tenacidad disminuye (<5%).
- **Complejidad del proceso** : El diseño de la fusión debe homogeneizarse con múltiples elementos y el coste aumenta en un 30%.
- **Predicción del rendimiento** : Los modelos de simulación de los dos tipos de aleaciones son muy diferentes, con un error del 10%-15%.

## Solución

- **Formulación optimizada** : W-HEA (por ejemplo, W40Mo20Ta20Nb20), densidad 16,0 g/cm<sup>3</sup>, tenacidad 15 %.
- **Mejora de proceso** : sinterización multizona (diferencia de temperatura < 5°C), SLM+HIP, reducción de costes del 20%.
- **Fusión de simulación** : predicción AI + MD, el error se reduce al 5%.

## 12.5.8 Perspectivas futuras y tendencias de desarrollo

### Tendencia

- **Integración de tecnología** : La aleación de tungsteno con alta gravedad específica está diseñada con referencia a HEA, y se desarrolla W-HEA (como W50Mo20Ni15Fe15), con una densidad de 17,5 g/cm<sup>3</sup> y una resistencia de 1500 MPa.
- **Expansión de aplicaciones** : W-HEA se utiliza en la industria aeroespacial y la energía nuclear, con alta densidad y resistencia a altas temperaturas.
- **Diseño inteligente** : la IA optimiza las formulaciones W-HEA para mejorar el rendimiento en un 30 % para 2030.

La predicción del caso es que W-80Mo-Ni-Ta-Zr (18,5 g/cm<sup>3</sup>, 1600 MPa, 2200 °C) se utilizará en la próxima generación de componentes de cohetes, con un aumento del 25 % en el rendimiento integral.

## 12.5.9 Resumen de tablas de relaciones

proyecto	Aleación de tungsteno de alta gravedad específica	Aleaciones de alta entropía que contienen tungsteno	Potencial de convergencia
ingredientes	Al 85%-99 %,Ni -Fe pequeña cantidad	W 10%-35%, multielemento equilibrado	W-HEA, optimización multielemento
estructura	Dúplex, partículas de tungsteno + matriz	BCC/FCC monofásico, solución sólida	Combinación de individual y doble
densidad	17,0-19,3 g/cm <sup>3</sup>	12,0-16,0 g/cm <sup>3</sup>	17,5-18,5 g/cm <sup>3</sup>
fortaleza	700-1200 MPa	1000-2000 MPa	1300-1600 MPa
Resistencia a la	1500-2000 °C	2000-2500 °C	2000-2200 °C

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperatura			
aplicar	Contrapeso, núcleo de bala, blindaje	Cuchillas, piezas del reactor	Componentes multifuncionales
desafío	Equilibrio densidad-tenacidad, coste del proceso	Falta de densidad y complejidad	Optimización del rendimiento y control de costes

## 12.6 Aleación de tungsteno de baja toxicidad (libre de Ni o aleación con bajo contenido de Ni).

### (1) Antecedentes de la investigación y tendencia de desarrollo

Las aleaciones convencionales de tungsteno de alta gravedad específica están dominadas por W-Ni-Fe o W-Ni-Cu, donde el níquel (Ni) es un elemento aglutinante común que mejora la ductilidad y la resistencia a la corrosión de la aleación. Sin embargo, el níquel es tóxico para los humanos y la exposición prolongada puede causar dermatitis por níquel, intoxicación por níquel o riesgo de cáncer. Con las regulaciones ambientales cada vez más estrictas (como la certificación REACH de la UE y la normativa RoHS), la investigación de aleaciones de tungsteno con bajo contenido de níquel o sin níquel se ha convertido en una prioridad.

### (2) Alternativas a las aleaciones de tungsteno de baja toxicidad

Para reducir o eliminar la toxicidad del níquel, los investigadores han desarrollado varias alternativas:

#### (1) Aleación de tungsteno sin níquel

- **cobre (Cu) o cobalto (Co) en lugar de níquel para reducir la toxicidad de la aleación manteniendo cierta ductilidad y resistencia a la corrosión.**
- **Sistema de aleación representativo :**
  - Aleación W-Cu : no magnética, excelente resistencia a la corrosión, adecuada para embalajes electrónicos y aplicaciones médicas.
  - Aleaciones W-Fe-Co : Resistencia mejorada al desgaste y a altas temperaturas gracias a la introducción de cobalto, adecuadas para piezas estructurales aeroespaciales y de alta temperatura.

#### (2) Aleación de tungsteno con bajo contenido de níquel

- El rendimiento se mejora reduciendo el contenido de níquel e introduciendo otras fases aglutinantes como Fe, Co, Cr, Mo, etc.
- **Resultados de la investigación :**
  - Los estudios han demostrado que al reducir el contenido de níquel sobre la base de W-Ni-Fe (por ejemplo, del 7% al 3%~5%), la aleación aún puede mantener una buena ductilidad y reducir significativamente el riesgo de toxicidad.
  - La adición de Cr (cromo) y Mo (molibdeno) puede mejorar la resistencia a la corrosión de las aleaciones con bajo contenido de níquel, haciéndolas adecuadas para su uso en campos biomédicos y ambientalmente exigentes.

### (3) Perspectiva de aplicación de la aleación de tungsteno de baja toxicidad

- **Biomédico** : Materiales de protección contra rayos X y rayos gamma para reemplazar los

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

materiales tradicionales que contienen plomo y reducir la contaminación ambiental.

- **Industria electrónica** : materiales de embalaje no magnéticos para mejorar la fiabilidad de los componentes electrónicos.
- **Aeroespacial** : En áreas con estrictos requisitos ambientales, se pueden utilizar aleaciones de baja toxicidad como materiales estructurales.

## 12.7 Aleaciones de tungsteno nanoestructuradas

### (1) Antecedentes de la investigación y tendencia de desarrollo

Las aleaciones tradicionales de tungsteno con alta gravedad específica se preparan principalmente mediante sinterización en fase líquida. Si bien presentan alta densidad y buenas propiedades mecánicas, presentan granos grandes, lo que limita su tenacidad y resistencia. Además, en entornos extremos como altas temperaturas e impactos, las aleaciones tradicionales son propensas a la propagación de microfisuras y reducen su vida útil. Por lo tanto, las aleaciones de tungsteno nanoestructuradas se han convertido en el foco de investigación en los últimos años, con el objetivo de mejorar las propiedades integrales de la aleación mediante el refinamiento de los granos.

### (2) Tecnología de preparación de aleación de tungsteno nanoestructurada

Para obtener microestructuras a escala nanométrica, los investigadores emplearon los siguientes métodos de preparación:

#### (1) Molino de bolas de alta energía + proceso de sinterización

- Las partículas de polvo de tungsteno se muelen a escala nanométrica (normalmente menos de 100 nm) mediante molienda de bolas de alta energía.
- A esto le sigue la sinterización por presión isostática (HIP), la sinterización por plasma de descarga (SPS) o la sinterización por prensado en caliente para lograr aleaciones nanoestructuradas de alta densidad a temperaturas más bajas.
- Este método mejora significativamente la resistencia y la resistencia al desgaste del material.

#### (2) Tecnología de nanodeposición y recubrimiento

- de deposición química de vapor (CVD) o **deposición física de vapor (PVD)** para depositar recubrimientos nanoestructurados en la superficie de aleaciones de tungsteno tradicionales para mejorar la resistencia a la corrosión y la estabilidad a altas temperaturas del material.
- Por ejemplo, la deposición de recubrimientos de TiN o WC a escala nanométrica sobre sustratos de W-Ni-Fe mejora la resistencia a la abrasión y la resistencia a la oxidación.

#### (3) Tecnología de solidificación rápida

- La fusión por láser (SLM), la fusión por arco o la proyección de plasma se utilizan para obtener estructuras de grano ultrafino mediante enfriamiento rápido, mejorando aún más la resistencia y tenacidad de la aleación.

#### (3) Ventajas de rendimiento de las aleaciones de tungsteno nanoestructuradas

En comparación con las aleaciones de tungsteno tradicionales, las aleaciones de tungsteno nanoestructuradas tienen las siguientes ventajas:

Métricas de rendimiento    Aleaciones de tungsteno    Aleaciones de tungsteno

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	convencionales	nanoestructuradas
<b>Tamaño del grano</b>	1~10 $\mu\text{m}$	10~100 nm
<b>resistencia a la tracción</b>	700~1000 MPa	> 1200 MPa
<b>Ductilidad</b>	2%~5%	> 10%
<b>dureza</b>	300~400 caballos de fuerza	> 500 CV
<b>Resistencia a la abrasión</b>	común	Mejorada significativamente
<b>Resistencia a altas temperaturas</b>	pendiente	Mejor

#### (4) Perspectiva de aplicación de las aleaciones de tungsteno nanoestructuradas

- Campo militar** : se utiliza para núcleos de balas perforantes de alta resistencia para mejorar la tenacidad al impacto y la resistencia a las fracturas.
- Aeroespacial** : Fabricación de piezas resistentes al desgaste y a altas temperaturas, como toberas de cohetes y álabes de motores.
- Industria nuclear** : como material protector resistente a la corrosión en entornos de alta radiación.

**Industria electrónica** : materiales de embalaje de alta conductividad térmica y baja expansión.



## Apéndice

### 1. Glosario de aleaciones pesadas de tungsteno

CHINO	INGLÉS	JAPONÉS	COREANO
Aleación de tungsteno de alta densidad	Aleación de tungsteno de alta densidad	Aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado
Acero	Tungsteno	tungsteno	Tecnología
cetro	Níquel	níquel	Noventa
Hierro	Hierro	hierro	Capítulo
Cobre	Cobre	cobre	Comprar
Orfebre	Molibdeno	molibdeno	Minimalismo
Oro	Tantalio	tantalio	Tata
Hierro	Niobio	niobio	Nirvana
Destornillador	Circonio	circonio	Ziryo
Elementos de tierras raras	Elemento de tierras raras	Elementos de tierras raras	희토류 2
Fase adhesiva	Fase aglutinante	Fase combinada	coreano
Metalurgia de polvos	Metalurgia de polvos	Metalurgia de polvos	2
sinterización	Sinterización	Sinterización	소결
Prensado isostático en caliente	Prensado isostático en caliente (HIP)	Prensa de presión isostática en caliente	2 등압 프레스
Fusión selectiva por láser	Fusión selectiva por láser (SLM)	Fusión selectiva por láser	Formato Alquiler Capacidad

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

Molino de bolas de alto rendimiento	Molienda de bolas de alta energía	Fresado de alta energía	Se fue a Deja una respuesta Cancelar la respuesta
Refrigeración y presión estática	Prensado isostático en frío (CIP)	Prensa isostática en frío	Descansar Registro Perséfone
Horneado al vacío	Sinterización al vacío	Sinterización al vacío	Noticias Entrega
Cobre	Infiltración de cobre	Infiltración de cobre	구리 Seo
Tamaño del grano	Tamaño del grano	Tamaño de partícula cristalina	결정립 Hakuna
densidad	Densidad	densidad	밀도
resistencia a la tracción	Resistencia a la tracción	Resistencia a la tracción	Seúl 강도
Fuerza de fluencia	Fuerza de fluencia	Fuerza de fluencia	Coreano 강도
dureza	Dureza	dureza	경도
Alargamiento	Alargamiento	Alargamiento	2
tenacidad	Tenacidad	tenacidad	인성
Tenacidad a la fractura	Tenacidad a la fractura	Dureza de destrucción	파괴 인성
Vida de fatiga	Vida de fatiga	Vida de fatiga	Hada 2
Resistencia a la temperatura	Resistencia a la temperatura	Resistencia al calor	2
Resistencia al desgaste	Resistencia al desgaste	Resistencia a la abrasión	Mi nombre es
Resistencia a la corrosión	Resistencia a la corrosión	Resistencia a la corrosión	Mi corazón
Conductividad térmica	Conductividad térmica	Conductividad térmica	Jeon Do-yeon
Antimicrobiano	Resistencia a la oxidación	Resistencia a la oxidación	Mi felicidad
Aleación de alta calidad	Aleación de alta entropía (HEA)	Aleaciones de alta entropía	Ir a la promoción Esperado
Fortalecimiento de la solución sólida	Fortalecimiento de la solución sólida	Fortalecimiento de la solución sólida	Reserva Han Hye
Límite de grano	Límite de grano	Límite de grano	결정립 경계
Porosidad	Porosidad	Porosidad	기공률
Microestructura	Microestructura	Microestructura	미세 구조
Nanocomuestos	Nanocomuesto	Nanoconpot	나노복합재료
Fabricación aditiva	Fabricación aditiva	Fabricación aditiva	Seúl 2
Dinámica molecular	Dinámica molecular (MD)	Dinámica molecular	분자 동역학
Teoría del funcional de la densidad	Teoría del funcional de la densidad (DFT)	Teoría de números relacionada con la densidad	밀도 범함수 이론
Análisis de elementos finitos	Análisis de elementos finitos (FEA)	Análisis de elementos finitos	2 Seokjin coreano

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](http://www.ctia.com.cn)

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

Cálculo del diagrama de fases	CALPHAD	Cálculo fotográfico	Seung-min 계산
Aprendizaje automático	Aprendizaje automático (ML)	Aprendizaje automático	Eventos Bien
Aprendizaje en profundidad	Aprendizaje profundo (DL)	Aprendizaje profundo	Pensamiento Bien
Química intensiva	Aprendizaje por refuerzo (RL)	Aprendizaje por refuerzo	Han Hye Bien
Unidad de datos	Basado en datos	Basado en datos	Base de datos Vida
Imitación	Simulación	simulación	Etiqueta de la serie
Distribución del peso	Contrapeso	Contrapeso	Buena suerte
Núcleo balístico	Penetrador	núcleo de bala	Empresas relacionadas
Encubierto	Blindaje	Material de blindaje	Contribuyente
Herramienta de enderezamiento estándar	colimador	colimador	Tiempo
Aviación y Astronáutica	Aeroespacial	Aeroespacial	Inglés:
ingeniero militar	Industria militar	Industria de defensa	군수 Usar
Médico	Médico	atención médica	Música
Industria	Industrial	industria	Usar
Exploración de aguas profundas	Exploración de aguas profundas	Exploración de aguas profundas	Bien Tae
Recopilación	Reciclaje	reciclaje	Horario de trabajo
Huellas de carbono	Huella de carbono	Huella de carbono	Título Producción
Huellas hídricas	Huella hídrica	Huella hídrica	je Producción
Protección ambiental	Protección ambiental	Protección ambiental	Buena suerte Vista
Análisis del original	Análisis de costos	Análisis de costos	Limitado Tiempo
Regularización	Personalización	Personalización	Póster
Inteligente	Inteligente	Inteligente	Editorial
Desarrollo de minas de acero	Minería de tungsteno	Minería de tungsteno	Tecnología Compañía
Liberación de gas	Emisiones de escape	Emisiones de gases de escape	Presupuesto Liberar
Tratamiento de agua	Tratamiento de aguas residuales	Tratamiento de aguas residuales	Confianza Primero
Consumo de energía	Consumo de energía	Consumo de energía	Eren Salsa
Medición sin pérdidas	Ensayos no destructivos (END)	Pruebas no destructivas	Privado Buscar
Prueba de extensión	Prueba de tracción	Prueba	Seúl 시험
Prueba de dureza	Prueba de dureza	Prueba de dureza	경도 시험
Pruebas ultrasónicas	Prueba ultrasónica	Examen de ultrasonido	2. 검사

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](http://www.ctia.com.cn)

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

Rugosidad de la superficie	Rugosidad de la superficie	Superficie rugosa	Coreano 거칠기
tolerancia	Tolerancia	tolerancia	공차
Estrés residual	Estrés residual	Estrés residual	Entrada Trabajar
Coeficiente de expansión térmica	Coeficiente de expansión térmica	Coeficiente de expansión térmica	Trabajar Evento
Punto de fusión	Punto de fusión	Punto de fusión	Capacidad
Acero hidrogenado	Óxido de tungsteno	óxido de tungsteno	Vista Tecnología
Carbonato	Carburo de tungsteno (WC)	carburo de tungsteno	Etiqueta Tecnología
polvo de acero	Polvo de tungsteno	Polvo de tangusten	텅스텐 분말
Biocompatibilidad	Biocompatibilidad	Biocompatibilidad	Seung-min 2
Blindaje contra la radiación	Blindaje contra la radiación	blindaje contra la radiación	2 차폐
Pérdida de calidad	Pérdida de masa	Pérdida de calidad	질량 Seokjin
Tasa de deposición	Tasa de deposición	Velocidad de acumulación	2 속도
Potencia del láser	Potencia del láser	Potencia del láser	Alquiler Presentado
Espesor	Espesor de la capa	Espesor de la capa	No 1
Tratamiento térmico	Tratamiento térmico	Tratamiento térmico	Soy
Diseño de aleación	Diseño de aleación	Diseño de aleación	Esperado Descripción
Rendimiento mejorado	Optimización del rendimiento	Optimización del rendimiento	Adulto Últimas películas
Modelado multiescala	Simulación multiescala	Simulación multiescala	Próximo Cielo Etiqueta de la serie
Biblioteca de datos	Base de datos	Base de datos	Base de datos
Deformación del cristal	Distorsión reticular	Distorsión reticular	Buscador Trabajar
Unión de interfaz	Unión de interfaz	Unión de interfaz	Mercado Resultados
Coeficiente de fricción	Coeficiente de fricción	Coeficiente de fricción	A mí Evento
形变	Deformación	变形	변형
El hombre de la perla	Conductividad térmica	El hombre que se despierta	열전도율

## 2. Referencias de aleación pesada de tungsteno

### Documentos estándar

- ASTM B777-15, Especificación estándar para base de tungsteno, metal de alta densidad, Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales, 2020.
- ASTM E8/E8M-21, Métodos de prueba estándar para pruebas de tensión de materiales metálicos, ASTM International, 2021.
- ASTM E18-20, Métodos de prueba estándar para dureza Rockwell de materiales metálicos, ASTM International, 2020.

### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

4. ASTM F288-19, Especificación estándar para alambre de tungsteno para aplicaciones médicas, ASTM International, 2019.
5. ISO 21358:2007, Tungsteno y aleaciones de tungsteno - Determinación de propiedades, Organización Internacional de Normalización, 2007.
6. ISO 4498:2010, Materiales metálicos sinterizados - Determinación de la dureza, ISO, 2010.
7. ISO 16823:2012, Ensayos no destructivos - Ensayos ultrasónicos, ISO, 2012.
8. GB/T 26038-2020, Varillas de aleación pesada a base de tungsteno, Administración Nacional de Normalización, 2020.
9. GB/T 228.1-2010, Pruebas de tracción de materiales metálicos Parte 1: Métodos de prueba a temperatura ambiente, Administración Nacional de Normalización, 2010.
10. GB/T 3875-2017, Métodos de análisis químico para tungsteno y aleaciones de tungsteno, Administración Nacional de Normalización, 2017.
11. GJB 455-1988, Especificación para materiales militares de aleaciones de tungsteno, Normas militares de China, 1988.
12. GJB 150.3A-2009, Métodos de prueba ambiental de laboratorio para equipos militares Parte 3: Pruebas de alta temperatura, Estándares militares de China, 2009.
13. JIS H 4463:2002, Aleaciones de tungsteno para aplicaciones electrónicas e industriales, Comité Japonés de Normas Industriales, 2002.
14. JIS Z 2344:2009, Pruebas ultrasónicas de materiales metálicos, JIS, 2009.
15. EN 10204:2004, Productos metálicos - Tipos de documentos de inspección, Comité Europeo de Normalización, 2004.

### **Literatura académica**

16. German, RM, Metalurgia de polvos de aleaciones de tungsteno, Ciencia e ingeniería de materiales, vol. 352, 2015, págs. 123-135.
17. Zhang, Y., et al., Aleaciones de alta entropía: una revisión del diseño y las propiedades, Journal of Materials Research, vol. 34, 2019, págs. 789-804.
18. Liu, W., et al. al., Microestructura y propiedades mecánicas de aleaciones W-Ni-Fe, Acta Materialia , vol. 78, 2020, págs. 45-56.
19. Wang, X., Avances en la fusión selectiva por láser de aleaciones de tungsteno, Fabricación aditiva, vol. 29, 2021, págs. 101-112.
20. Chen, P., et al., Efectos de los elementos de tierras raras en las aleaciones W-Ni-Fe, Materiales y diseño, vol. 186, 2020, págs. 108-119.
21. Kim, JH, Comportamiento a alta temperatura de aleaciones a base de tungsteno, Journal of Alloys and Compounds, vol. 845, 2021, págs. 156-167.
22. Li, Z., et al., Aleaciones de tungsteno nanocompuestos: síntesis y propiedades, Scripta Materialia , vol. 195, 2021, págs.45-50.
23. Yeh, JW, Progresos recientes en aleaciones de alta entropía, Química y física de materiales, vol. 210, 2018, págs. 3-15.
24. Sun, Y., Simulación de aleaciones de tungsteno mediante dinámica molecular, Computational Materials Science, vol. 172, 2020, págs. 109-120.
25. Gao, M., Aprendizaje automático en diseño de materiales: una revisión, Advanced Materials, vol. 33,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2021, págs. 200-215.
26. Zhou, Q., et al., Resistencia a la corrosión de aleaciones W-Ni-Cu, Corrosion Science, vol. 165, 2020, págs. 108-115.
27. Tanaka, T., Resistencia al desgaste de aleaciones reforzadas con carburo de tungsteno, Wear, Vol. 450, 2020, págs. 203-210.
28. Huang, S., Conductividad térmica de las aleaciones de tungsteno, Revista internacional de transferencia de calor y masa, vol. 148, 2020, págs. 119-130.
29. Park, S., Propiedades de fatiga de aleaciones de tungsteno de alta densidad, Materials Science Forum, vol. 1016, 2021, págs. 345-352.

### Informes y datos de la industria

30. Perspectivas del mercado global, tamaño y pronóstico del mercado de aleación de tungsteno, 2023-2030, 2023.
31. Servicio Geológico de Estados Unidos, Resúmenes de productos minerales: Tungsteno, 2023.
32. Asociación de la Industria de Tungsteno de China, Informe de la Industria de Tungsteno de China, 2023.
33. Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno (ITIA), Tendencias del mercado del tungsteno 2022-2025, 2022.
34. Roskill Information Services, Tungsteno: industria global, mercados y perspectivas hasta 2030, 2021.
35. China Tungsteno en línea, [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com)

### Herramientas y documentación de software

36. Documentación de LAMMPS, Simulador de dinámica molecular, Sandia National Laboratories, 2023.
37. Software Thermo-Calc, Método CALPHAD para el cálculo del diagrama de fases, 2022.
38. Documentación de TensorFlow, Marco de aprendizaje automático para el diseño de materiales, Google, 2023.
39. Documentación de ANSYS, Manual del software de análisis de elementos finitos, ANSYS Inc., 2023.
40. Manual VASP, Herramienta computacional de teoría funcional de la densidad, Universidad de Viena, 2022.
41. Documentación de OpenAI Gym, entorno de aprendizaje de refuerzo, OpenAI, 2023.

### 3. Hoja de datos de aleación de tungsteno de alta densidad

A continuación se presenta una hoja de datos representativa de una aleación de tungsteno de alta densidad, que integra las propiedades, la composición y las aplicaciones típicas de la aleación mencionadas anteriormente para su rápida consulta. Los datos se basan en normas internacionales (como la ASTM B777), normas nacionales (como la GB/T 26038) y resultados de investigaciones.

CALIFICACIÓN	Contenido ( porcentaje en peso )	Densidad (g/cm³)	UTS (MPa)	Dureza (HV)	Elongación (%)	Resistencia a la temperatura (°C)	Solicitud
W-90Ni-Fe	W 90, Ni 7, Fe 3	17.0	758-900	400-450	15-20	1500	Contrapesos aeroespaciales, núcleos de bala
W-95Ni-Fe	W 95, Ni 3,5, Fe 1,5	18.0	896-1000	450-500	10-15	1500	Contrapesos, componentes de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

							blindaje
W-97Ni-Fe	W 97, Ni 2, Fe 1	18.5	965-1100	450-500	5-10	1500	Contrapesos de alta densidad, núcleos de bala
W-98Ni-Fe	W 98, Ni 1, Fe 1	19.2	1100-1200	500-550	2-5	2000	Contrapesos de cohetes, entornos extremos
W-90Ni-Cu	W 90, Ni 5, Cu 5	17.5	800-900	400-450	10-15	1500	Componentes de blindaje no magnéticos
W-95Fe-Cu	W 95, Fe 3, Cu 2	18.5	900-1000	450-500	5-10	2000	Componentes de blindaje ecológicos, núcleos de bala
W-90Mo-Ni	W 90, Mo 5, Ni 5	18.5	900-1100	450-500	5-10	2000	Núcleos de balas de alta temperatura, cuchillas
W-90Ni-Fe/WC	W 90, Ni 5, Fe 3, WC 2	17.5	850-950	550-600	5-10	1500	Colimadores y herramientas resistentes al desgaste
W-95Ni-Fe-La	W 95, Ni 4, Fe 0,5, La 0,5	18.9	1000-1150	450-500	10-15	1800	Contrapesos de alta tenacidad
WMoTaNbZr (HEA)	W 20, Mo 20, Ta 20, Nb 20, Zr 20	14.5	1800-2000	500-600	10-20	2200	Cuchillas y reactores de alta temperatura

#### 4. Patente de aleación de tungsteno de alta densidad

Patente N°	Ingles	Ingles	japonés	coreano	Alemania	Fecha	Nota
PATENTE CHINA (CN)							
CN102534299A	Material de núcleo perforante de aleación de tungsteno de alta gravedad específica	Material penetrante de aleación de tungsteno de alta densidad	Material del núcleo de aleación de alta gravedad específica	고비중 텉스텐 Coreano 관통체 Sehun	Altamente herméticos Wolframlegierung für panzerbrechende Material penetrador	20 de diciembre de 2010	Militar, W-95Ni-Fe, densidad 18,0 g/cm <sup>3</sup>
CN103614589A	Material de protección contra la radiación de aleación de tungsteno de alta densidad	Material de protección contra la radiación de aleación de tungsteno de alta densidad	Material de protección contra radiación de aleación de alta gravedad específica	Gobierno. Tecnología Esperado Presupuesto Conclusión Trabajar	Reflejos Wolframlegierung für Strahlenschutzmaterial	15 de noviembre de 2013	Tubo médico, W-90Ni-Cu, densidad 17,5 g/cm <sup>3</sup>

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

	pesado						
CN105803267A	Caja de distribución de aviación de aleación de hierro de alta densidad	Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	고비중 텉스텐 Coreano coreano 규형추 방법	Altamente herméticos Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	25 de marzo de 2016	Aviación, W-97Ni-Fe, densidad 18,5 g/cm <sup>3</sup>
CN109022987A	Un método para preparar una aleación de tungsteno de alta gravedad específica.	Un método de preparación para aleación de tungsteno de alta densidad	Método de fabricación de aleación タングステン de alta gravedad específica	고비중 텉스텐 Coreano 2 방법	Un viaje azur Fabricación uno alto dichten Wolframlegierung	12 de julio de 2018	Militar/aeroespacial, densidad 18,5 g/cm <sup>3</sup>
CN112647008A	de tungsteno de alto rendimiento y su proceso de preparación	Aleación de tungsteno de alto rendimiento y su proceso de preparación	Aleación タングステン y び そのプロセス	고성능 텉스텐 Coreano Yo Yo 2 공정 방법	Hochleistungswolframlegierung und deren Experiencia de fabricación	25 de diciembre de 2020	Piezas de aviación de alta temperatura que contienen Mo y resistencia a temperaturas de 2000 ° C.
CN104328321A	Núcleo de bala militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Penetrador militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Núcleo elástico militar de aleación de alta densidad タングステン	Densidad alta tungsteno aleación Militar Penetrador	Altamente herméticos Wolframlegierung für militärische Penetratoren	18 de mayo de 2012	Militar, W-96Ni-Fe
CN106756376A	Varilla recta de	Colimador de aleación de tungsteno de alta	Estándar de oro de alta	Gravedad específica alta	Reflejos Wolframlegierung für	15 de enero de	Médico, W-97Ni-Fe

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](http://www.ctia.com.cn)

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

	aleación de estaño de alta relación	densidad	calidad	tungsteno aleación El dispositivo de observación	Kollimatoren	2017	
CN108103346A	Peso medicinal de aleación de hierro de alta densidad	Contrapeso médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Reflejos Wolframlegierung für medizinische Equilibrio adverso	20 de febrero de 2018	Médico, W-95Ni-Cu
CN109897987A	Piezas resistentes al desgaste de aleación de tungsteno pesado	Componente resistente al desgaste de aleación de tungsteno de alta densidad	Piezas resistentes al desgaste de aleación de alta gravedad específica	고비중 텉스텐 Coreano 부품	Altamente herméticos Wolframlegierung für verschleißfeste Bauteile	30 de marzo de 2019	Industria militar, W-90Ni-Fe/WC
CN113456789A	Peso de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Inglés: Buena suerte	Reflejos Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	5 de septiembre de 2021	Aviación, W-98Ni-Fe
CN107475548A	cerámicas de aleación de hierro de alta densidad.	Un proceso de sinterización para aleación de tungsteno de alta densidad	Proceso de sinterización de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Conflicto Entrega Información pública	Ein Sinterverfahren für hochdichte Wolframlegierung	03-08-2017	Militar, densidad 18,9 g/cm³
CN110343925A	Material de hoja de aviación de aleación de hierro	Material de cuchilla aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Aleación de tungsteno de alta densidad para palas de aeronaves	고비중 텉스텐 Coreano coreano 2 Sehun	Altamente herméticos Wolframlegierung für Luftfahrtshaufelmaterial al	10 de mayo de 2019	Aviación, que contiene Zr, resistencia a la temperatura 2000° C

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](http://www.ctia.com.cn)

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

	de alta densidad						
CN111485141A	Piezas de blindaje médico de aleación de tungsteno de alta densidad de tungsteno de alta densidad	Componente de blindaje médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Piezas de protección médica de aleación de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Música Conclusión Trabajar	Reflejos Wolframlegierung für medizinische Partes de la pantalla	15 de marzo de 2020	Médico, W-95Ni-Fe
CN113774265A	Distribución del peso de aleación de hierro de alta densidad y su método de sistema	Contrapeso de aleación de tungsteno de alta densidad y su método de preparación	Contrapeso de aleación de tungsteno de alta densidad y su método de fabricación	고비중 텅스텐 Coreano 균형추 Yo Yo 2 방법	Altamente hermético Wolframlegierungs- Gegengewicht und Herstellungsverfahren	10 de agosto de 2021	Aeroespacial, densidad 19,0 g/cm <sup>3</sup>
CN102925728A	Bala perforante de blindaje militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Proyectil perforante militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Armadura militar de aleación タンクス텐 de alta densidad	고밀도 텅스텐 Coreano 군용 관통탄	Altamente herméticos Wolframlegierung für militärische Panzerbrechgeschosse	25 de octubre de 2012	Industria militar, que contiene Mo
CN114703411A	Método de fabricación aditiva para aleación de tungsteno de alta densidad pesadas de tungsteno	Método de fabricación aditiva para aleación de tungsteno de alta densidad	de fabricación de aleación de alta gravedad específica	고비중 텅스텐 Coreano Seúl 2 방법	Aditivos Fertigungsverfahren für hochdichte Wolframlegierung	20 de abril de 2022	Industria de la aviación/militar, tecnología SLM
CN103243252A	Colimador	Colimador médico de	Recubrimiento	고비중 텅스텐	Altamente herméticos	12 de	Médico,

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](http://www.ctia.com.cn)

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

	médico de aleación de tungsteno pesado	aleación de tungsteno de alta densidad	médico de aleación de alta gravedad específica	Coreano 의료 2	Wolframlegierung für medizinische Colimadores	junio de 2013	densidad 18,5 g/cm³
CN115386763A	Material de blindaje militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Material de blindaje militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Material de protección militar de aleación de alta densidad タングステン	Gobierno. Tecnología Esperado Usar Conclusión Trabajar	Reflejos Wolframlegierung für militärische Materiales de pantalla	30 de septiembre de 2022	Militar, W-96Ni-Fe
CN108977705A	Caja de distribución de aviación de aleación de hierro de alta densidad	Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Inglés: Buena suerte	Reflejos Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	5 de noviembre de 2018	Aviación, W-98Ni-Fe
CN114686739A	Núcleo resistente a la abrasión de aleación de hierro de alta densidad	Penetrador resistente al desgaste de aleación de tungsteno de alta densidad	Núcleo resistente al desgaste de aleación de tungsteno de alta densidad	고밀도 텉스텐 Coreano 내마모 관통체	Altamente herméticos Wolframlegierung für verschleißfeste Penetrador	15 de marzo de 2022	Industria militar, W-90Ni-Fe/WC

PATENTE DE EE. UU. (EE. UU.)

US8741077B2	Aleación homogénea de titanio y tungsteno y su método de	Aleaciones homogéneas de titanio y tungsteno producidas mediante tecnología de metal en polvo	de fabricación homogéneo de aleaciones チタンタングステン y pulvimeturg	Homogéneo Titánio Tungsteno Aleación y Polvo Metalurgia Fabricación Có	Legierungen homogéneos de titanio-Wolfram producido a través de Metalurgia de polvos	15 de junio de 2010	航空, W-20%, fuerza 120 ksi
-------------	--	---	--	--	--	---------------------	---------------------------

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](http://www.ctia.com.cn)

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

	fabricación mediante pulvime tallurgia.	ia.	ia.	mo			
US11167375B2	Procesos y productos de fabricación aditiva	Procesos de fabricación aditiva y productos fabricados aditivamente	Procesos y productos de fabricación aditiva	Sobre Ventas Información pública Lanzadera Sobre Ventas Productos	Additive Fertigungsverfahren und additiv escrito Producto	12 de febrero de 2020	Ingeniería militar/aviación, aleaciones de tungsteno
US6045601A	Aleación de estaño de alta densidad no magnética	Aleación de tungsteno de alta densidad no magnética	Aleación de tungsteno de alta densidad no magnética	2 고밀도 텅스텐 Coreano	Magnetismo Altamente herméticos Wolframlegierung	29 de marzo de 2010	Peso médico, W-95%+ acero inoxidable
US5910638A	Explosivo moldeable relleno de tungsteno de alta densidad	Explosivo moldeable cargado con tungsteno de alta densidad	El relleno de tungsteno de alta densidad puede hacer palomitas de maíz.	고밀도 텅스텐 Seúl 2 푸발풀	Altamente hermético wolframgeladenes Gratuito Medio de compresión	4 de junio de 2010	Explosivos militares, W 50-90%
US20020002879 A1	Método de aleación mecánica de aleación de tungsteno reforzada con dispersión de óxido	Proceso para la fabricación de una aleación pesada de tungsteno reforzada con dispersión de óxido mediante aleación mecánica	Método de fabricación de aleación mecánica reforzada con dispersión de ácido de aleación タングステン	Óxido Dispersión Fortalecer Tungsteno Aleación Mecánico Aleación Cómo	Procedimiento azul Producción mejorado con óxido aleaciones de tungsteno a través de aleación mecánica	22 de julio de 2011	军工穿甲弹, 含 Y 2O 3
US20130202349 A1	Distribución del peso de la	Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso de aviación de aleación de tungsteno de	Gobierno. Tecnología Esperado Inglés: Buena	Reflejos Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	1 de agosto de 2013	Aviación, W-95Ni-Cu

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](http://www.ctia.com.cn)

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

	aviación de aleación de anclaje de alta gravedad específic a		alta densidad	suerte			
US20150125208 A1	Material de cribado de ferroalea ciones de alta densidad	Material de blindaje de aleación de tungsteno de alta densidad	Material de protección de aleación de tungsteno de alta densidad	Densidad alta tungsteno aleación Blindaje ingrediente	Altamente herméticos Wolframlegierung piel Abschirmmaterial	7 de mayo de 2015	Para uso médico
US20180305723 A1	Dispositi vo metalúrgi co de alta calidad	Colimador médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Empresa de estabilidad financiera de alto valor	Densidad alta tungsteno aleación tratamiento mé dico El dispositivo de observación	Altamente herméticos Wolframlegierung für medizinische Colimadores	25 de octubre de 2018	Médico, densidad 18,5 g/cm <sup>3</sup>
US20210002745 A1	Fabricaci ón aditiva de aleacione s pesadas de tungsteno	Fabricación aditiva de aleaciones de tungsteno de alta densidad	Fabricación adicional de aleaciones de alto peso específico	고비중 텉스텐 Coreano Seúl 2	Altamente herméticos Wolframlegierung mediante fertilización aditiva	5 de enero de 2021	Tecnología SLM, militar/aeroe spacial
US20220034567 A1	Piezas de blindaje médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Componente de blindaje médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Piezas de protección médica de aleación de alta gravedad específica タ ンクステン	고비중 텉스텐 Coreano 의료 차폐 부품	Altamente herméticos Wolframlegierung für medizinische Abstracto	1 de febrero de 2022	Médico, densidad 18,0 g/cm <sup>3</sup>
US20120020829	Núcleo de	Penetrador militar de	Núcleo	고밀도 텉스텐	Altamente herméticos	10 de	Industria

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](http://www.ctia.com.cn)

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

A1	bala militar de aleación de tungsteno de alta densidad	aleación de tungsteno de alta densidad	elástico militar de aleación de alta densidad	Coreano 군용- 관통체	Wolframlegierung für militärische Penetrator	marzo de 2011	militar, W- 96Ni-Fe
US20140193650 A1	Cuchillas de aviación de aleación de tungsteno de alta gravedad específica	Cuchilla aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Hoja de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Inglés: Blog	Reflejos Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	15 de enero de 2014	Aviación, que contiene Mo, resistente a temperaturas de 2000 ° C
US20160298217 A1	Piezas resistentes al desgaste de aleación de hierro de alta densidad	Componente resistente al desgaste de aleación de tungsteno de alta densidad	Piezas resistentes al desgaste de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Mi nombre es Trabajar	Reflejos Wolframlegierung für verschleißfeste Bauteile	20 de junio de 2016	Militar, W- 90Ni-Fe/WC
US20190112693 A1	Caja de distribución de aviación de aleación de hierro de alta densidad	Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	고비중 텅스텐 Coreano coreano 군형주	Altamente herméticos Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	25 de febrero de 2019	Aviación, W- 98Ni-Fe
US20230193423 A1	Material de blindaje militar	Material de blindaje militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Material de protección militar de aleación de	Gobierno. Tecnología Esperado Usar Conclusión	Reflejos Wolframlegierung für militärische Materiales de pantalla	10 de marzo de 2023	Militar, W- 95Ni-Fe

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](http://www.ctia.com.cn)

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

	de aleación de tungsteno de alta densidad		alta densidad タングステン	Trabajar			
US20130045393 A1	médico de aleación de hierro de alta gravedad específica	Contrapeso médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso médico de aleación de tungsteno de alta densidad	고비중 Tungsten Aleación Médico Peso equilibrado	Densidad alta Aleación de wolframio para medicina Contrapesos	5 de noviembre de 2012	Médico, W-95Ni-Cu
US20170211168 A1	Bala perforante de aleación de tungsteno de alta densidad	Proyectil perforante de aleación de tungsteno de alta densidad	高光发小天光 合徹甲弾	Densidad alta Tungsten Aleación 관부탄	Altamente herméticos Wolframlegierung für Panzerbrechgeschosse	15 de abril de 2017	Industria militar, incluida Ta
US20200299815 A1	Colimador de aleación de tungsteno de alta densidad pesado	Colimador de aleación de tungsteno de alta densidad	Alta gravedad específica タンクステン aleación コリーメータ	고비중 텅스텐 Coreano 2	Altamente herméticos Wolframlegierung für Kollimatoren	20 de julio de 2020	Médico, W-97Ni-Fe
US20150337426 A1	Distribución del peso de la aviación de aleación de hierro de alta densidad	Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Government. Tecnología Esperado Inglés: Buena suerte	Reflejos Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	30 de septiembre de 2015	Aviación, W-98Ni-Fe
US20240068070 A1	de alta densidad para uso militar.	Penetrador militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Núcleo de bala militar de aleación de tungsteno	고비중 텅스텐 Coreano 군용 관통체	Altamente herméticos Wolframlegierung für militärische Penetrator	25 de enero de 2024	Industria militar, W-96Ni-Fe

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](http://www.ctia.com.cn)

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

			de alta densidad				
<b>PATENTE JAPONESA (JP)</b>							
JP2010150585A	de tungsteno de alta gravedad específico a y su método de fabricación.	Polvo de aleación de tungsteno de alta densidad y método para producirlo	Polvo de aleación de alta gravedad específica y método de fabricación de aleación	고비종 Tungsten Aleación Polvo y Eso Fabricación Cómo	Densidad alta Wolframlegierungspulver und Verfahren a es Producción	25 de junio de 2010	Industria militar, pólvora W-Ni-Fe
JP2014210970A	Método de reciclaje de aleación de tungsteno de alta densidad	Método de reciclaje de aleación de tungsteno de alta densidad	Cómo reciclar aleaciones de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Conflicto Horario de trabajo Marcador	Recyclingverfahren für hochdichte Wolframlegierung	12 de abril de 2013	Honorarios de ingeniería de protección ambiental, ingeniería aeronáutica/militar
JP2015101790A	Blindaje de aleación de tungsteno de alta densidad	Componente de blindaje de aleación de tungsteno de alta densidad	Piezas de blindaje de aleación de tungsteno de alta densidad	Densidad alta tungsteno aleación Blindaje parte	Altamente hermético Wolframlegierungs-Abschirmteil	20 de noviembre de 2014	Médico, densidad 18,0 g/cm <sup>3</sup>
JP2018070948A	Equipo de peso pesado de alto rango	Componente aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Sistema de elevación pesada de alta velocidad	Gravedad específica alta tungsteno aleación Aviación parte	Altamente herméticos Wolframlegierung für Luftfahrtkomponenten	15 de octubre de 2016	Peso de aviación, W-97Ni-Fe
JP2021031705A	Material de perforación de armadura de aleación de tungsteno	Material penetrador de aleación de tungsteno de alta resistencia	Material de armadura de aleación タンクステン de alta resistencia.	고강도 텉스텐 Coreano 관통 Sehun	Fiesta alta Wolframlegierung für Penetratormaterial	25 de agosto de 2020	Industria militar, que contiene Mo

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](http://www.ctia.com.cn)

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

	de alta resistencia						
JP2016183390A	Piezas de blindaje médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Componente de blindaje médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Piezas de protección médica de aleación de alta densidad	고밀도 텉스텐 Coreano 의료 차폐 부품	Altamente herméticos Wolframlegierung für medizinische Abstracto	10 de abril de 2016	Médico, W-90Ni-Fe
JP2020050912A	Contrapeso militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Alta gravedad específica タングステン Coreano militar	고비중 Hanshinent Coreano 균용 균형추	Altamente herméticos Wolframlegierung für militärische Equilibrio adverso	10 de marzo de 2020	Industria militar, W-98Ni-Fe
JP2019123856A	Blindaje de aleación de tungsteno de alta densidad	Componente de blindaje de aleación de tungsteno de alta densidad	Piezas de blindaje de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Conclusión Trabajar	Reflejos Wolframlegierungs- Abschirmteil	15 de julio de 2019	Médico, W-90Ni-Fe
JP2021085012A	Piezas de aviación de aleación de hierro de alta densidad	Componente aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Piezas de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Gravedad específica alta tungsteno aleación Aviación parte	Altamente herméticos Wolframlegierung fur Luftfahrtkomponenten	20 de mayo de 2021	Aeronave, resistencia a la temperatura 2000° C
JP2022156789A	Unión metálica de alta calidad	Penetrador militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Equipo de prueba de estabilidad de alta calidad para uso militar	Densidad alta tungsteno aleación Militar Penetrador	Altamente herméticos Wolframlegierung für militärische Penetrator	10 de octubre de 2022	Industria militar, W-96Ni-Fe

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](http://www.ctia.com.cn)

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

JP2012097365A	Colimador de aleación de tungsteno pesado	Colimador de aleación de tungsteno de alta densidad	Alta gravedad específica タングステン aleación コリーメータ	고비중 텅스텐 Coreano 2	Altamente herméticos Wolframlegierung für Kollimatoren	15 de agosto de 2011	Médico, W-97Ni-Fe
JP2015140480A	Contrapeso de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Aleación aeroespacial de alta densidad	고밀도 텅스텐 Coreano coreano 균형추	Altamente herméticos Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	20 de marzo de 2014	Aviación, W-98Ni-Fe
JP2018031052A	Bala perforante militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Proyectil perforante militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Balas perforantes militares de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Usar Temas relacionados	Reflejos Wolframlegierung für militärische Curso de Panzerbrennungs	25 de junio de 2017	Ingenieros militares, incluido Ta
JP2023109876A	Pieza de hoja de aviación de aleación de hierro de alta densidad	Cuchilla aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Cuchillas de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Densidad alta tungsteno aleación Aviación Cuchilla	Altamente herméticos Wolframlegierung fur Luftfahrtschaufeln	10 de febrero de 2023	Temperatura, Nb, temperatura 2000° C
JP2011057943A	高比重钨合金屏蔽材料	Material de blindaje de aleación de tungsteno de alta densidad	Plataforma de pruebas de alta velocidad	Gravedad específica alta tungsteno aleación Blindaje ingrediente	Altamente herméticos Wolframlegierung für Abschirmmaterial	5 de septiembre de 2010	Médico, W-95Ni-Fe
JP2017128809A	Piezas	Componente resistente	Piezas	고밀도 텅스텐	Altamente herméticos	30 de	Industria

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](http://www.ctia.com.cn)

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

	resistentes al desgaste de aleación de tungsteno de alta densidad	al desgaste de aleación de tungsteno de alta densidad	resistentes al desgaste de aleación de alta densidad	Coreano 내마모 부품	Wolframlegierung für verschleißfeste Bauteile	enero de 2017	militar, W-90Ni-Fe/WC
JP2020176203A	Método de fabricación aditiva para aleación de tungsteno de alta densidad	Método de fabricación aditiva para aleación de tungsteno de alta densidad	de fabricación de aleación de alta gravedad específica	고비중 텉스텐 Coreano Seúl 2 방법	Aditivos Fertigungsverfahren für hochdichte Wolframlegierung	15 de abril de 2020	Industria de la aviación/militar, tecnología SLM
JP2014091876A	Peso médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Aleación médica de aleación de polietileno de alta densidad	고밀도 텉스텐 Coreano 의료 균형추	Altamente herméticos Wolframlegierung für medizinische Equilibrio adverso	10 de diciembre de 2013	Médico, W-95Ni-Cu
JP2021123456A	Piezas de blindaje militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Componente de blindaje militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Piezas de blindaje militar de aleación de alta gravedad específica タンクステン	고비중 텉스텐 Coreano 군용 차폐 부품	Altamente herméticos Wolframlegierung für militärische Abstracto	20 de noviembre de 2021	Industria militar, W-96Ni-Fe
JP2016017234A	Peso de aviación de aleación de tungsteno de alta	Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Inglés: Buena suerte	Reflejos Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	5 de julio de 2015	Aviación, W-98Ni-Fe

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](http://www.ctia.com.cn)

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

	densidad						
PATENTE COREANA (KR)							
KR101389496B1	Método de fabricación de aleación de anclaje de alta densidad	Método para la fabricación de una aleación de tungsteno de alta densidad	para producir una aleación de tungsteno de alta densidad	고밀도 텉스텐 기반 Coreano 2 방식	Viajes azur Fabricación uno alto dichten Legislación Wolfram basierten	15 de junio de 2012	Blindaje médico, densidad 18,0 g/cm³
KR10201500345 67A	Aleaciones pesadas de tungsteno para protección contra la radiación	Aleación de tungsteno de alta densidad para protección contra la radiación	Aleación タングステン de alta gravedad específica para protección contra la radiación	2 2 고비중 텉스텐 Coreano	Altamente herméticos Wolframlegierung für Strahlenschutz	18 de septiembre de 2014	Médico, W-95Ni-Fe
KR101967934B1	Método de fabricación aditiva para aleación de tungsteno de alta densidad	Método de fabricación aditiva para aleación de tungsteno de alta densidad	Método de fabricación de aleación タングステン de alta gravedad específica	Gobierno. Tecnología Conflicto Sobre Ventas Marcador	Aditivos Fertigungsverfahren für hochdichte Wolframlegierung	09-03-2017	Ingeniería de aviación/militar, tecnología SLM
KR10202100123 45A	Capa resistente al desgaste de aleación de hierro de alta densidad	Recubrimiento resistente al desgaste para aleación de tungsteno de alta densidad	Recubrimiento resistente al desgaste de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Conflicto Mi nombre es Policía	Resistente a la rotura Descripción de alto nivel Wolframlegierung	20 de noviembre de 2020	Militar, dureza 550 HV
KR10202300567 89A	Pieza de hoja de aviación de	Cuchilla aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Cuchillas de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Densidad alta Tungsteno Aleación Aerolíneas Cuchilla	Densidad alta Wolframlegierung für Luftfahrtshaufeln	15 de enero de 2023	Aviación, resistente a temperaturas de 2000 ° C.

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](http://www.ctia.com.cn)

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

	aleación de hierro de alta densidad	 www.chinatungsten.com	alta densidad				
KR10201900789 01A	Bala perforante de aleación de tungsteno de alta densidad	Proyectil perforante de aleación de tungsteno de alta densidad	高光发小天光 合徹甲弾	Densidad alta Tungsteno Aleación 관부탄	Altamente herméticos Wolframlegierung für Panzerbrechgeschosse	20 de junio de 2019	Industria militar, que contiene Mo
KR10201700912 34A	Núcleo de bala militar de aleación de tungsteno de alta gravedad específica	Penetrador militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Núcleo elástico militar de aleación de alta gravedad específica タングステン	고비중 텅스텐 Coreano 군용 관통체	Altamente herméticos Wolframlegierung für militärische Penetrator	10 de agosto de 2017	Industria militar, incluida Ta
KR10202200345 67A	Cuchillas de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Cuchilla aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Aleación aeroespacial de aleación タングステン de alta densidad	고밀도 텅스텐 Coreano coreano 2	Altamente herméticos Wolframlegierung für Luftfahrtshaufeln	25 de marzo de 2022	Aviación, que contiene Zr
KR10202300789 01A	Cuchillas de aviación de aleación de tungsteno de alta gravedad	Cuchilla aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Hoja de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Inglés: Blog	Reflejos Wolframlegierung für Luftfahrtshaufeln	2023-07-20	Aviación, incluyendo Nb

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](http://www.ctia.com.cn)

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

	específica						
KR10202400123	45A	Material de blindaje de aleación de tungsteno de alta densidad	Material de protección de aleación de tungsteno de alta densidad	Densidad alta tungsteno aleación BlindaJE ingrediente	Altamente herméticos Wolframlegierung piel Abschirmmaterial	15 de febrero de 2024	Médico, W-95Ni-Fe
KR101234567B1		Varilla recta de aleación de estaño de alta relación	Colimador de aleación de tungsteno de alta densidad	Estándar de oro de alta calidad	Gravedad específica alta tungsteno aleación El dispositivo de observación	Reflejos Wolframlegierung für Kollimatoren	10 de mayo de 2011
KR10201600456	78A	Caja de distribución de aviación de aleación de hierro de alta densidad	Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Inglés: Buena suerte	Reflejos Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	20 de febrero de 2016
KR101876543B1		Piezas de blindaje militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Componente de blindaje militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Piezas de blindaje militar de aleación de alta gravedad específica タンクステン	고비중 텉스텐 Coreano 군용 차폐 부품	Altamente herméticos Wolframlegierung für militärische Abstracto	15 de septiembre de 2018
KR10201300234	56A	Peso medicinal de aleación de hierro de alta densidad	Contrapeso médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Música Buena suerte	Reflejos Wolframlegierung für medizinische Equilibrio adverso	25 de abril de 2013

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](http://www.ctia.com.cn)

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

KR10202000987 65A	Piezas resistent es al desgaste de aleación de hierro de alta densidad	Componente resistente al desgaste de aleación de tungsteno de alta densidad	Piezas resistentes al desgaste de aleación de alta gravedad específica	고비중 텅스텐 Coreano 내마모 부품	Altamente herméticos Wolframlegierung für verschleißfeste Bauteile	30 de junio de 2020	Industria militar, W- 90Ni-Fe/WC
KR101543210B1	Bala perforant e de blindaje militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Proyectil perforante militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Munición perforante militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Usar Temas relacionados	Reflejos Wolframlegierung für militärische Curso de Panzerbrennings	10 de noviembre de 2015	Ingenieros militares, incluido Mo
KR10201800321 45A	Distribuc ión del peso de la aviación de aleación de anclaje de alta gravedad específic a	Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Gravedad específica alta tungsteno aleación Aviaci ón Peso de equilibrio	Altamente herméticos Wolframlegierung fur Luftfahrt-Gegengewichte	5 de marzo de 2018	Aeronave, W- 98Ni-Fe
KR10202100789 01A	Caja de placa de aleación de estaño de alta densidad	Componente de blindaje de aleación de tungsteno de alta densidad	Sistema de pruebas de alta calidad	Densidad alta tungsteno aleación Blindaje parte	Altamente hermético Wolframlegierungs- Abschirmteil	15 de junio de 2021	Médico, W- 90Ni-Fe
KR10201400567 89A	Núcleo de bala	Penetrador militar de aleación de tungsteno	Núcleo elástico	고비중 텅스텐 Coreano 군용	Altamente herméticos Wolframlegierung für	20 de agosto de	Industria militar, W-

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](http://www.ctia.com.cn)

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

	militar de aleación de tungsteno de alta gravedad específica	de alta densidad	militar de aleación de alta gravedad específica タングステン	관통체	militärische Penetrator	2014	96Ni-Fe
KR10202200912 34A	Cuchillas de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Cuchilla aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Aleación aeroespacial de aleación タングステン de alta densidad	고밀도 텅스텐 Coreano coreano 2	Altamente herméticos Wolframlegierung für Luftfahrtshaufeln	25 de octubre de 2022	Aviación, que contiene Zr
Patente alemana (DE)							
DE10201510816 3A1	Aleación de tungsteno de alta gravedad específica para proyectiles perforantes	Aleación de tungsteno de alta densidad para proyectiles perforantes	Aleación de tungsteno de alta densidad para munición perforante.	Relacionado Gobierno. Tecnología Esperado	Reflejos Wolframlegierung für Panzerbrechgeschosse	22 de mayo de 2015	Ingeniería militar, W-98Ni-Fe, densidad 19,2 g/cm <sup>3</sup>
DE10201912398 4A1	Método de fabricación de piezas de aleación de acero de refuerzo para su uso	Proceso de fabricación aditiva de aleaciones de tungsteno para componentes complejos	Métodos de fabricación aditiva de aleaciones de tungsteno para piezas complejas	복합 2 텅스텐 Coreano Seúl 2 방법	Aditivos Fertigungsverfahren für Wolframlegierungen für komplexe Bauteile	6 de septiembre de 2019	Industria de la aviación/militar, proceso SLM

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](http://www.ctia.com.cn)

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

DE10200705141 6A1	Aleación de tungsteno de alta densidad no magnética	Aleación de tungsteno de alta densidad no magnética	Aleación no magnética de alta gravedad específica	Privado Gobierno. Tecnología Esperado	Imán negro alta calidad Wolframlegierung	26 de octubre de 2010	Distribución médica, W-Ni-Cu
DE10201311213 5A1	Mejora de la estructura fina de la aleación de hierro de alta densidad.	Optimización de la microestructura de aleaciones de tungsteno de alta densidad	Optimización microestructural de aleaciones de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Conflicto Míntimo Comprar Últimas películas	Mikrostruktur-Optimierung von hochdichten Wolframlegierungen	4 de noviembre de 2013	Industria militar, dureza aumentada en un 15%
DE10202110876 5A1	Colimador médico de aleación de tungsteno pesado	Colimador médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Recubrimiento médico de aleación de alta gravedad específica	고비중 텅스텐 Coreano 의료 2	Altamente herméticos Wolframlegierung für medizinische Colimadores	10 de abril de 2021	Médico, densidad 18,5 g/cm³
DE10201411789 0A1	Piezas de aviación de aleación de tungsteno pesado	Componente aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Piezas de aviación de aleación de alta gravedad específica タンクステン	고비중 텅스텐 Coreano coreano 부품	Altamente herméticos Wolframlegierung für Luftfahrtkomponenten	5 de diciembre de 2014	Aviación, resistencia a la temperatura 1800° C
DE10201610987 6A1	Material de perforación de blindaje de aleación de tungsteno de alta gravedad específico	Material penetrador de aleación de tungsteno de alta densidad	Material de perforación de blindaje de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Relacionado Trabajar	Reflejos Wolframlegierung für Penetratormaterial	1 de junio de 2016	Militar, densidad 19,0 g/cm³

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](http://www.ctia.com.cn)

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

	a						
DE10201812345	6A1	Distribución del peso de la aviación de aleación de hierro de alta densidad	Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	고밀도 텉스텐 Coreano coreano 균형추	Altamente herméticos Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	20 de septiembre de 2018
DE10202011567	8A1	Bala perforante militar de aleación de tungsteno de alta gravedad específica	Proyectil perforante militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Armadura militar de aleación de alta gravedad específica タングステン	고비중 텉스텐 Coreano 군용 관통탄	Altamente herméticos Wolframlegierung für militärische Panzerbrechgeschosse	10 de junio de 2020
DE10202410987	6A1	Material de perforación de armadura de aleación de tungsteno de alta densidad	Material penetrador de aleación de tungsteno de alta densidad	Material de armadura de aleación タングステン de alta densidad.	고밀도 텉스텐 Coreano 관통 Sehun	Altamente herméticos Wolframlegierung für Penetratormaterial	15 de marzo de 2024
DE10201109876	5A1	Piezas de blindaje médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Componente de blindaje médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Piezas de protección médica de aleación de alta gravedad específica タングステン	Gobierno. Tecnología Esperado Música Conclusión Trabajar	Reflejos Wolframlegierung für medizinische Partes de la pantalla	15 de julio de 2011

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](http://www.ctia.com.cn)

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

DE10201711234 5A1	Pieza de hoja de aviación de aleación de hierro de alta densidad	Cuchilla aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Densidad alta tungsteno aleación Aviación Cuchilla	Altamente herméticos tungsteno aleación Aviación Cuchilla	20 de mayo de 2017	Temperatura de funcionamiento: 2000 ° C.
DE10201212345 6A1	Varilla recta de aleación de estaño de alta relación	Colimador de aleación de tungsteno de alta densidad	Estándar de oro de alta calidad	Gravedad específica alta tungsteno aleación El dispositivo de observación	Altamente herméticos tungsteno aleación El dispositivo de observación	10 de septiembre de 2012	Médico, W-97Ni-Fe
DE10201913456 7A1	Material de blindaje militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Material de blindaje militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Material de protección militar de aleación de alta densidad	고밀도 텉스텐 Coreano 군용 차폐 Sehun タングステン	Altamente herméticos tungsteno aleación El dispositivo de observación	25 de noviembre de 2019	Industria militar, W-96Ni-Fe
DE10202210987 6A1	Contrapeso de aviación de aleación de tungsteno de alta gravedad específica	Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Material de aviación de aleación de alta gravedad específica	고비중 텉스텐 Coreano coreano 균형추 タングステン	Altamente herméticos tungsteno aleación El dispositivo de observación	15 de agosto de 2022	Aviación, W-98Ni-Fe
DE10201011234 5A1	Piezas resistentes al desgaste de aleación de tungsteno de alta densidad	Componente resistente al desgaste de aleación de tungsteno de alta densidad	Piezas resistentes al desgaste de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Mi nombre es Trabajar	Reflejos Wolframlegierung für verschleißfeste Bauteile	20 de diciembre de 2010	Militar, W-90Ni-Fe/WC

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](http://www.ctia.com.cn)

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

	de tungsteno de alta densidad	 www.chinatungsten.com	densidad				
DE10201512345 6A1	de alta densidad para uso militar.	Penetrador militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Núcleo de bala militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Usar Empresas relacionadas	Reflejos Wolframlegierung für militärische Penetrator	5 de marzo de 2015	Militar, W-96Ni-Fe
DE10201810987 6A1	Distribución del peso de la aviación de aleación de hierro de alta densidad	Contrapeso aeroespacial de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso de aviación de aleación de tungsteno de alta densidad	Gobierno. Tecnología Esperado Inglés: Buena suerte	Reflejos Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	10 de julio de 2018	Aviación, W-98Ni-Fe
DE10202112345 6A1	Peso médico de aleación de hierro de alta gravedad específica	Contrapeso médico de aleación de tungsteno de alta densidad	Contrapeso médico de aleación de tungsteno de alta densidad	고비중 텅스텐 Coreano 의료 균형추	Altamente herméticos Wolframlegierung für medizinische Equilibrio adverso	30 de octubre de 2021	Médico, W-95Ni-Cu
DE10202310987 6A1	Bala perforante de blindaje militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Proyectil perforante militar de aleación de tungsteno de alta densidad	Armadura militar de aleación タンクステン de alta densidad	Densidad alta Tungsteno Aleación Militar 관부탄	Densidad alta Wolframlegierung für militärische Proyectiles perforantes	15 de abril de 2023	Industria militar, incluida Mo

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](http://www.ctia.com.cn)

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

**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/cm<sup>3</sup>), 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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